UNIVERSITATEA TEHNICĂ
“GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

FACULTATEA DE DESIGN INDUSTRIAL
ȘI MANAGEMENTUL AFACERILOR

ABORDĂRI ÎN DESIGNUL SUSTENABIL PENTRU INDUSTRIA MODEI

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Iuliana STREBA

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Antonela CURTEZA

IAȘI, 2026

ABORDĂRI ÎN DESIGNUL SUSTENABIL PENTRU INDUSTRIA MODEI

Iuliana STREBA

Domeniul Inginerie Industrială

Președinte comisie doctorat:

Conducător de doctorat: Prof. univ. dr. ing. Antonela CURTEZA

Referenți Oficiali:

CUPRINS:

INTRODUCERE 6

CAPITOLUL I – CADRUL TEORETIC ȘI STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII 13

1.1. Moda sustenabilă ca domeniu de cercetare interdisciplinar 13
1.2. Clarificări conceptuale fundamentale: design, modă, sustenabilitate 14
1.3. Evoluția istorică a abordărilor sustenabile în designul vestimentar 15
1.4. Modele teoretice dominante în designul sustenabil pentru industria modei 16
1.5. Taxonomia strategiilor de design sustenabil în modă 17
1.6. Tehnologii digitale și producția sustenabilă în modă 17
1.7. Stadiul actual al cercetării și lacune identificate 18
1.8. Concluzii și poziționarea cercetării doctorale în contextul cadrului teoretic 18

CAPITOLUL II – SUSTENABILITATE ȘI GREENWASHING: DIAGNOZĂ, TIPURI ȘI IMPLICAȚII CRITICE 20

2.1. Clarificări conceptuale: sustenabilitate și greenwashing în industria modei 20
2.2. Evoluția istorică a greenwashingului: de la publicitate înșelătoare la strategii sistemice 20
2.3. Tipologii și mecanisme ale greenwashingului în modă 21
2.4. Greenwashingul ca problemă structurală a industriei modei 21
2.5. Percepția consumatorilor și efectele asupra comportamentului de consum 22
2.6. Impacturi critice ale greenwashingului 22
2.7. Răspunsuri instituționale și instrumente de limitare a greenwashingului 23
2.8. Implicații pentru designul vestimentar și necesitatea unor abordări verificabile 23
2.9. Concluzii 24

CAPITOLUL III – MULTI-DESIGN CA STRATEGIE INTEGRATĂ PENTRU DEZVOLTAREA STRUCTURILOR MODULARE IMPRIMATE 3D ÎN CONTEXTUL MODEI SUSTENABILE 25

3.1. Necesitatea unei abordări integrate în designul vestimentar sustenabil 25
3.2. Abordări multi-design și multi-strategice în literatura de specialitate 26
3.3. Modularitatea ca infrastructură structurală pentru sustenabilitate 26
3.4. Dimensiunea relațională a designului sustenabil 27
3.5. Fabricația aditivă ca facilitator al designului sustenabil integrat 27
3.6. Multi-design ca strategie verificabilă și anti-greenwashing 28
3.7. Propunere de cadru multi-design pentru moda sustenabilă: strategii de design integrate 28
3.8. Concluzii 30

CAPITOLUL IV – IMPRIMAREA ADITIVĂ ȘI STRUCTURI MODULARE FABRICATE PRIN TEHNOLOGII DE IMPRIMARE 3D 31

4.1. Principiile fabricării aditive 31
4.2. Tehnologii de imprimare 3D în contextul modei 31
4.3. Structuri modulare fabricate prin tehnologii de imprimare 3D 32

4.3.1. Structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/ detașare ……. 33
4.3.2. Structuri modulare închise de tip zale …… 34
4.4. Concluzii 36

CAPITOLUL V – STUDIUL COMPORTAMENTULUI FIZICO-MECANIC AL STRUCTURILOR MODULARE IMPRIMATE 3D 38

5.1. Pregătirea epruvetelor în standardul "dog-bone" …… 38
5.2. Testarea epruvetelor realizate în standardul "dog-bone" …… 40
5.2.1. Structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/ detașare ……. 40
5.2.2. Structuri modulare închise de tip zale …… 45
5.2.3. Analiza comparativă a parametrilor măsurați pentru structurile modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/ detașare și a structurilor modulare închise de tip zale …….. 51
5.3. Pregătirea epruvetelor în standardul textil …… 51
5.4. Testarea epruvetelor realizate în standardul "textil" a structurilor modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/ detașare …… 53
5.5. Analiza comparativă a parametrilor măsurați în cele două standarde diferite ("dog-bone" și "textil") 55
5.6. Concluzii …….. 59

CAPITOLUL VI – STUDIUL COMPORTAMENTULUI FIZICO-MECANIC AL SISTEMULUI DE CLIPSARE/ DETAȘARE AL STRUCTURILOR MODULARE DESCHISE 60

6.1. Fundamentarea teoretică a comportamentului mecanic al sistemelor de clipsare/detașare 60
6.2. Descrierea geometrică a sistemului de clipsare/ detașare 61
6.3. Metodologia experimentală a testării mecanismului 61
6.4. Analiza forței de declipsare/ clipsare 63
6.5. Comportamentul mecanismului de clipsare în condiții de solicitare ciclică (test de oboseală) 67
6.6. Concluzii 71

CAPITOLUL VII –TRANSPUNEREA SISTEMELOR MODULARE ÎN ANSAMBLURI VESTIMENTARE CONFIGURABILE 72

7.1. Fundamentarea alegerii studiului de caz 72
7.2. Arhitectura sistemului modular și logica de asamblare 72
7.3. Transpunerea sistemului modular în tipar vestimentar 73
7.4. Configurații vestimentare rezultate și comparație evolutivă …… 75
7.5. Diversificarea cromatică și potențialul configurativ 77
7.6. Potențialul combinatoric al sistemului modular 80
7.7. Analiză critică, limite și direcții de dezvoltare 81
7.8. Concluzii 82

CAPITOLUL VIII – CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE 83

8.1. Concluzii generale 83
8.2. Contribuții originale și direcții viitoare de cercetare 87

BIBLIOGRAFIE 93

WEBOGRAFIE 99

INTRODUCERE

Industria modei se află astăzi într-un moment de tensiune profundă între dinamica accelerată a consumului, nevoia de diferențiere estetică și presiunea tot mai mare exercitată de imperativele sustenabilității. Pe de o parte, sistemul contemporan al modei funcționează prin reînnoire permanentă, diversificare rapidă, înlocuire frecventă și producție intensificată. Pe de altă parte, efectele ecologice, materiale și culturale ale acestui model devin din ce în ce mai greu de ignorat. În acest context, designul vestimentar nu mai poate fi înțeles exclusiv ca activitate orientată spre formă, stil sau expresie vizuală, ci trebuie reconsiderat ca practică strategică, responsabilă și capabilă să intervină asupra modului în care produsele sunt concepute, realizate, utilizate și transformate în timp.

În cadrul acestei mutații de perspectivă, conceptul de design sustenabil a dobândit o relevanță deosebită. Totuși, sustenabilitatea în modă nu poate fi redusă la simpla utilizare a unor materiale mai puțin poluante sau la adaptarea punctuală a unor tehnici de producție considerate mai eficiente. O asemenea abordare, deși necesară, rămâne insuficientă în lipsa unei reconsiderări mai profunde a logicii produsului vestimentar. Într-un sens mai amplu, sustenabilitatea presupune proiectarea unor sisteme capabile să reducă risipa, să extindă durata de viață a produsului, să permită repararea, reconfigurarea sau reutilizarea și să creeze o relație mai flexibilă între produs și utilizator. Din această perspectivă, interesul pentru structuri deschise, adaptabile și configurabile devine nu doar justificat, ci esențial.

În paralel, dezvoltarea tehnologiilor de fabricație aditivă a introdus în designul vestimentar o serie de posibilități noi, atât la nivel formal cât și la nivel constructiv. Imprimarea 3D a fost utilizată în modă mai ales pentru prototipare rapidă, pentru elemente decorative, accesorii sau experimente vizuale spectaculoase. Cu toate acestea, potențialul său nu se epuizează la nivelul obiectului singular sau al efectului vizual. Atunci când este pusă în relație cu o logică de sistem, fabricația aditivă poate deveni suport pentru dezvoltarea unor structuri modulare articulate, în care produsul nu mai este un obiect închis și definitiv, ci o structură compusă din unități discrete, compatibile și reconfigurabile.

În acest sens, modularitatea oferă un cadru de reflecție și acțiune deosebit de fertil. În domeniul designului, modularitatea a fost asociată frecvent cu flexibilitatea, adaptabilitatea și optimizarea utilizării resurselor. În domeniul modei, însă, aceasta rămâne insuficient explorată ca principiu de proiectare vestimentară în relație directă cu sustenabilitatea, comportamentul materialului și fabricația aditivă. De cele mai multe ori, sistemele modulare sunt abordate fie ca soluții decorative, fie ca mecanisme de asamblare parțială, fără a fi investigate sistematic în raport cu performanța lor mecanică, cu logica tiparului produsului și cu potențialul de a genera produse configurabile la scară reală. Tocmai această zonă de intersecție constituie miza centrală a prezentei cercetări.

Teza pornește de la premisa că sistemele modulare imprimate 3D pot reprezenta o direcție relevantă pentru designul vestimentar sustenabil, în măsura în care acestea sunt dezvoltate nu doar ca experimente formale, ci ca infrastructuri coerente, capabile să integreze funcții constructive, configurative și estetice. În această perspectivă, modularitatea nu este tratată doar ca strategie geometrică sau ca metodă de compunere, ci ca principiu operațional prin care produsul vestimentar poate deveni extensibil, reconfigurabil și susceptibil de diversificare fără modificarea completă a bazei sale constructive. Cercetările realizate nu vizează doar posibilitatea obținerii unei suprafețe din unități repetitive, ci mai ales capacitatea acestor unități de a funcționa împreună ca sistem, de

a suporta solicitări mecanice, de a răspunde la utilizare repetată și de a fi transpuse într-un produs vestimentar articulat.

Din punct de vedere metodologic, cercetarea se bazează pe o abordare mixtă, care combină analiza teoretică, observația comparativă, experimentul material și demersul proiectiv aplicat:

- În prima parte a lucrării, investigația are caracter conceptual și analitic, urmărind poziționarea temei în raport cu literatura de specialitate din domeniul designului sustenabil, al modei, al modularității și al fabricației aditive.
- În a doua parte, metodologia capătă un caracter experimental, prin analiza comparativă a unor structuri modulare realizate din filamente diferite și evaluate prin teste mecanice și funcționale.
- În a treia parte, cercetarea devine proiectiv-aplicativă, prin selectarea unui studiu de caz, transpunerea acestuia într-o configurație vestimentară și analizarea potențialului său de diversificare. Această structură metodologică este esențială pentru demersul tezei, deoarece permite articularea dintre rigoarea tehnică și deschiderea creativă specifică designului.

Obiectivul general (OG) al tezei constă în investigarea și fundamentarea sistemelor modulare imprimate 3D ca infrastructuri configurabile pentru designul vestimentar sustenabil, prin articularea unui cadru teoretic integrat, a unei evaluări experimentale a comportamentului fizico-mecanic și a unei aplicații orientate spre dezvoltarea unor ansambluri vestimentare reconfigurabile.

Pentru îndeplinirea Obiectivului General (OG), au fost propuse următoarele **obiective specifice (OS),** sistematizate pe capitole în Figura 1, stabilite într-o interconexiune cu demersul cercetării și structurii tezei de doctorat:

OS1. Clarificarea cadrului teoretic și conceptual al designului sustenabil în industria modei, prin raportare la modelele dominante, strategiile de design și integrarea tehnologiilor digitale în producția vestimentară contemporană.

OS2. Analiza critică a fenomenului de "greenwashing" în industria modei și evidențierea implicațiilor sale asupra credibilității sustenabilității și asupra necesității unor abordări verificabile în designul vestimentar.

OS3. Formularea unui cadru integrat de tip multi-design pentru dezvoltarea structurilor modulare imprimate 3D în contextul modei sustenabile, ca alternativă la abordările fragmentare sau exclusiv declarative.

OS4. Investigarea relației dintre fabricația aditivă și dezvoltarea structurilor modulare pentru design vestimentar, prin identificarea, clasificarea și analizarea unor structuri fabricate prin tehnologii de imprimare 3D.

OS5. Evaluarea comportamentului fizico-mecanic al structurilor modulare imprimate 3D în funcție de geometrie, material și standard de testare, în vederea identificării unei structuri adecvate pentru aplicații vestimentare configurabile.

OS6. Analiza comportamentului fizico-mecanic al sistemului de clipsare/detașare al structurilor modulare deschise, inclusiv în condiții de solicitare ciclică, pentru a evalua viabilitatea funcțională a interconectării repetate.

OS7. Realizarea unui studiu de caz relevant prin transpunerea unui sistem modular într-un ansamblu vestimentar configurabil, prin raportare la tiparul vestimentar, modelarea digitală și extinderea bibliotecii de piese precum și investigarea potențialului de diversificare morfologică, cromatică și combinatorică a aceleiași infrastructuri modulare, în vederea evidențierii capacității sale de a genera variante multiple fără modificarea fundamentală a bazei constructive.



Figura 1: Obiectivele specifice în demersul cercetării

Întrebările de cercetare care au stat la baza acestui studiu sunt:

Î1. Cum poate fi definit și conceptualizat designul sustenabil în industria modei astfel încât să integreze simultan dimensiunile tehnologice, estetice, funcționale și critice ale proiectării?

Î2. În ce măsură fenomenul de greenwashing afectează credibilitatea discursului despre sustenabilitate în modă și cum poate designul verificabil contribui la delimitarea dintre soluțiile reale și cele pur declarative?

Î3. Poate o abordare integrată de tip multi-design oferi un cadru metodologic pertinent pentru dezvoltarea unor structuri modulare imprimate 3D în contextul modei sustenabile?

Î4. Cum influențează geometria structurii, materialul utilizat și standardul de testare comportamentul fizico-mecanic al structurilor modulare imprimate 3D?

Î5. În ce măsură sistemul de clipsare/detașare al structurii modulare deschise poate să își păstreze funcționalitatea în condiții de utilizare repetată?

Î6. Cum poate fi transpus un sistem modular imprimat 3D într-un ansamblu vestimentar configurabil, astfel încât să răspundă atât exigențelor constructive, cât și celor de adaptare la tipar și la forma corpului?

Î7. În ce măsură aceeași infrastructură modulară poate susține diversificare morfologică, cromatică și combinatorică fără reluarea integrală a procesului de proiectare și fără multiplicare materială proporțională?

Ipoteza generală se axează pe structurile modulare imprimate 3D care - atunci când sunt dezvoltate și evaluate într-o logică integrată care corelează designul sustenabil, comportamentul fizico-mecanic și configurabilitatea - pot constitui baza unor ansambluri vestimentare reconfigurabile, relevante atât din punct de vedere tehnic cât și din punct de vedere estetic și sustenabil.

Ipotezele specifice constau în:

I1. Designul sustenabil în modă poate fi înțeles mai adecvat printr-un cadru integrat care depășește abordările centrate exclusiv pe material și include dimensiuni strategice, relaționale și tehnologice.

I2. O abordare de tip multi-design poate funcționa ca instrument verificabil și anti-greenwashing pentru dezvoltarea unor soluții vestimentare sustenabile bazate pe modularitate și fabricație aditivă.

I3. Comportamentul fizico-mecanic al structurilor modulare imprimate 3D este determinat de interacțiunea dintre geometria modulului, proprietățile materialului și modul de transfer al sarcinii în rețeaua structurală, ceea ce face posibilă selecția unei structuri mai adecvate pentru aplicații vestimentare.

I4. Sistemele de clipsare/detașare ale structurilor modulare deschise pot susține utilizare repetată și configurare/reconfigurare funcțională, însă performanța lor depinde de material și de comportamentul mecanic al mecanismului de interconectare.

I5. Transpunerea unei structuri modulare într-un ansamblu vestimentar coerent necesită nu doar repetarea unui modul standard, ci și dezvoltarea unei biblioteci de piese specializate pentru contur, compatibilizare locală și modelare vestimentară.

I6. Aceeași infrastructură modulară poate susține un număr ridicat de variante morfologice și cromatice, ceea ce indică existența unui potențial configurativ și combinatoric semnificativ, relevant pentru designul vestimentar sustenabil.

Demersul cercetării este structurat gradual, de la fundamentarea teoretică și critică a temei către validarea experimentală și, ulterior, către aplicarea proiectivă a rezultatelor într-un studiu de caz vestimentar. Într-o primă etapă, cercetarea construiește cadrul conceptual al tezei, prin

clarificarea noțiunilor fundamentale asociate designului, modei și sustenabilității, prin analiza evoluției a abordărilor sustenabile în designul vestimentar și prin examinarea modelelor teoretice dominante și a strategiilor de design relevante pentru industria modei. În această etapă sunt analizate, de asemenea, implicațiile tehnologiilor digitale și ale producției sustenabile, precum și lacunele existente în literatura de specialitate.

Într-o a doua etapă, cercetarea introduce o dimensiune critică, prin analiza greenwashingului ca problemă structurală a industriei modei și prin evidențierea necesității unor abordări verificabile, capabile să distingă între sustenabilitatea declarată și soluțiile proiective susținute metodologic și experimental. Această etapă creează cadrul pentru formularea unei strategii integrate de tip multi-design, propusă în Capitolul III ca răspuns la fragmentarea abordărilor sustenabile și ca instrument de articulare între modularitate, relaționalitate, fabricație aditivă și verificabilitate.

Într-o a treia etapă, lucrarea se deplasează spre domeniul fabricației aditive și al structurilor modulare imprimate 3D. Sunt analizate principiile imprimării aditive, relevanța diferitelor tehnologii de imprimare 3D pentru modă și tipologiile de structuri modulare fabricate digital, cu accent pe structurile deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare și pe structurile închise de tip zale. Această etapă are rolul de a identifica un repertoriu relevant de structuri și de a pregăti cadrul pentru evaluarea lor experimentală.

Etapa a patra este una experimentală și urmărește studiul comportamentului fizico-mecanic al structurilor modulare imprimate 3D. Este examinat comportamentul structurilor în standarde diferite de testare, se compară performanța structurilor deschise și închise și se analizează efectele geometriei, materialului și modului de organizare asupra parametrilor măsurați. În continuare, într-o etapă distinctă, este studiat comportamentul fizico-mecanic al sistemului de clipsare/detașare al structurilor modulare deschise, inclusiv în condiții de solicitare ciclică, pentru a evalua rezistența și viabilitatea utilizării repetate.

Pe baza rezultatelor experimentale, într-o a cincea etapă, este selectat un studiu de caz relevant pentru transpunerea în produs vestimentar. Capitolul VII dezvoltă această etapă aplicativă, în care sistemul modular este raportat la tiparul vestimentar, la modelarea digitală și la extinderea bibliotecii de piese prin elemente specializate de contur și adaptare locală. În această fază, cercetarea urmărește atât obținerea unei configurații vestimentare purtabile, cât și compararea unor variante de dezvoltare, de la agregarea panourilor standard la configurații adaptate geometric pe baza tiparului.

În etapa finală, cercetarea investighează potențialul configurativ, cromatic și combinatoric al aceleiași infrastructuri modulare, evidențiind capacitatea sistemului de a genera variante vizuale multiple fără modificarea fundamentală a bazei constructive. În acest mod, demersul tezei se încheie nu doar cu validarea unei soluții tehnice sau a unui prototip vestimentar, ci cu formularea unei perspective mai largi asupra modularității ca principiu de proiectare vestimentară sustenabilă, configurabilă și deschisă dezvoltărilor ulterioare.

Structura tezei este organizată într-o succesiune de capitole care urmăresc gradual trecerea de la fundamentarea teoretică a temei la validarea experimentală și, ulterior, la aplicarea proiectivă a rezultatelor în cadrul unui studiu de caz vestimentar. Această structură reflectă caracterul interdisciplinar al cercetării și logica de construcție a demersului, bazată pe articularea dintre design sustenabil, fabricație aditivă, comportament fizico-mecanic și dezvoltare vestimentară configurabilă.

- **Introducerea** are rolul să poziționeze tema cercetării în raport cu problematica actuală a modei și sustenabilității, formulând contextul general, relevanța temei, obiectivele și ipotezele de lucru, întrebările de cercetare și demersul metodologic adoptat.
- **Capitolul I** dezvoltă cadrul teoretic al cercetării, prin clarificarea relației dintre design, modă și sustenabilitate. Sunt analizate definițiile și evoluțiile conceptului de design sustenabil, principalele modele și strategii relevante pentru industria modei, precum și implicațiile noilor tehnologii și ale producției sustenabile asupra practicilor contemporane de proiectare vestimentară. Capitolul urmărește să evidențieze faptul că sustenabilitatea nu reprezintă doar o problemă legată de materiale sau tehnologii, ci o chestiune de strategie de design și de reconfigurare a logicii produsului.
- **Capitolul II** introduce o dimensiune critică și metodologică suplimentară, concentrându-se asupra fenomenului de greenwashing în industria modei și asupra limitelor discursurilor sustenabile pur declarative.
- În continuare, **Capitolul III** formulează cadrul integrat de tip multi-design propus în teză, prin care modularitatea, fabricația aditivă și designul vestimentar sustenabil sunt puse în relație într-o logică sistemică și verificabilă.
- **Capitolul IV** este dedicat structurilor modulare imprimate 3D și raportului lor cu fabricația aditivă. Sunt analizate tehnologiile relevante pentru imprimarea 3D în modă, tipologiile de structuri modulare și repertoriul de sisteme selectate pentru investigația experimentală, punând bazele selecției structurilor ce urmează a fi testate și comparate ulterior.
- **Capitolul V** urmărește evaluarea comportamentului fizico-mecanic al structurilor modulare imprimate 3D. Sunt analizate comparativ structuri diferite, realizate din mai multe tipuri de filament și testate în standarde distincte, cu scopul de a evidenția influența geometriei, a materialului și a modului de organizare structurală asupra parametrilor măsurați. Acest capitol are un rol central în fundamentarea selecției studiului de caz și în validarea tehnică a modularității.
- **Capitolul VI** aprofundează analiza prin investigarea comportamentului fizico-mecanic al sistemului de clipsare/detașare specific structurilor modulare deschise. Accentul este pus pe funcționarea mecanismului în condiții de solicitare repetată, pe degradarea sau persistența funcției de interconectare și pe relevanța acestor rezultate pentru dezvoltarea unor produse configurabile și reconfigurabile.
- **Capitolul VII** valorifică rezultatele experimentale anterioare într-o direcție aplicativă, prin transpunerea sistemului modular selectat în ansambluri vestimentare configurabile. Capitolul urmărește arhitectura sistemului modular, dezvoltarea bibliotecii de piese, raportarea la tipar, generarea unei configurații vestimentare și compararea variantelor rezultate. Tot aici sunt analizate diversificarea cromatică, potențialul configurativ și dimensiunea combinatorică a aceluiași sistem, fiind evidențiată capacitatea infrastructurii modulare de a susține variante multiple fără modificarea fundamentală a bazei constructive.
- În **Capitolul VIII** sunt formulate concluziile generale ale tezei, prin care sunt sintetizate principalele rezultate obținute în urma demersului teoretic, experimental și aplicativ, fiind evidențiată relevanța modularității imprimate 3D ca direcție de proiectare vestimentară sustenabilă. Totodată, sunt delimitate contribuțiile originale ale cercetării și sunt propuse direcții viitoare de dezvoltare, orientate către optimizarea structurilor modulare, diversificarea materialelor și tehnologiilor de imprimare, extinderea testărilor mecanice și

funcționale, integrarea analizei prin element finit și explorarea unor aplicații vestimentare configurabile, reparabile și adaptabile la contexte diferite de utilizare.

Prin această structură, teza urmărește să demonstreze că sistemele modulare imprimate 3D pot fi înțelese și dezvoltate nu doar ca experimente formale sau tehnologice, ci ca infrastructuri vestimentare configurabile, capabile să articuleze performanța tehnică, expresia estetică și potențialul sustenabil într-un model coerent de proiectare.

CAPITOLUL I – CADRUL TEORETIC ȘI STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII

Industria modei se află într-un moment critic, confruntându-se cu provocări de mediu și sociale fără precedent, care impun transformarea fundamentală a practicilor de design, a sistemelor de producție și a modelelor de consum (Bick și colab., 2018; Peters și colab., 2021). Fiind una dintre cele mai intensive industrii din punct de vedere al consumului de resurse și al poluării la nivel global, moda contribuie semnificativ la emisiile de carbon, la consumul de apă, la poluarea chimică și la generarea de deșeuri textile (Bailey și colab., 2022; Centobelli și colab., 2022). Ascensiunea modelelor de afaceri de tip fast fashion începând cu sfârșitul secolului al XX-lea a accelerat aceste efecte negative, generând un sistem liniar de tip „preia-produce-aruncă" („take-make-dispose"), caracterizat prin cicluri rapide de producție, obsolescență planificată și fluxuri masive de deșeuri (Aponte și colab., 2024; Li și colab., 2024). Această traiectorie nesustenabilă a generat apeluri urgente pentru schimbare sistemică, poziționând designul sustenabil ca un mecanism esențial pentru transformarea industriei (Kozlowski și colab., 2018; Claxton și colab., 2020).

1.1. Moda sustenabilă ca domeniu de cercetare interdisciplinar

Designul vestimentar sustenabil reprezintă o schimbare de paradigmă față de practicile convenționale de design, solicitând designerilor să ia în considerare impacturile de mediu, sociale și economice pe întreg ciclul de viață al produsului (Fletcher, 2013; Niinimäki, 2018). Această transformare depășește îmbunătățirile incrementale și implică o reconceptualizare fundamentală a rolului, scopului și metodelor designului în cadrul sistemului modei (Kozlowski, 2023; Sakaue, 2023). Abordările contemporane ale designului sustenabil se bazează pe cadre teoretice diverse precum „Design pentru sustenabilitate" („Design for Sustainability - DfS"), eco-design, economia circulară și gândirea bazată pe ciclul de viață ("Life Cycle Thinking - LCT") - fiecare oferind perspective distincte asupra modului în care designul poate contribui la atingerea obiectivelor de sustenabilitate (Moorhouse & Moorhouse, 2017; Dissanayake și colab., 2021).

Tehnologiile digitale - inclusiv imprimarea 3D, inteligența artificială, blockchain și instrumentele de design virtual - au devenit factori facilitatori puternici ai producției sustenabile, oferind posibilități pentru reducerea deșeurilor, personalizare și transparență în lanțul de aprovizionare (Pasricha și Kadolph, 2018; Wang și colab., 2023; Nisa și colab., 2025). În paralel, bio-inovația și progresele în știința materialelor au extins paleta materialelor sustenabile, de la fibre regenerate la alternative bio-fabricate (D'Itria și colab., 2022; Rognoli și colab., 2022; Cho și colab., 2024).

În pofida progreselor semnificative, persistă lacune importante în înțelegerea modului în care abordările de design sustenabil pot fi implementate eficient, scalate și integrate în sistemele existente ale modei (Kozlowski și colab., 2019; Abbate și colab., 2023). Provocările metodologice legate de evaluarea performanței în raport cu obiectivele sustenabilității, tensiunile teoretice dintre diferite cadre conceptuale și dovezile empirice limitate provenite din contexte geografice și organizaționale diverse restricționează dezvoltarea domeniului (Luo și colab., 2021; Fonseca și colab., 2023).

1.2. Clarificări conceptuale fundamentale: design, modă, sustenabilitate

Conceptul de "Design sustenabil în modă" pornește de la coroborarea celor trei concepte componente: design, modă și sustenabilitate. Structura conceptuală a sintagmei „design sustenabil în modă", rezultată din corelarea noțiunilor de design, modă și sustenabilitate, este sintetizată în Figura 1.1.

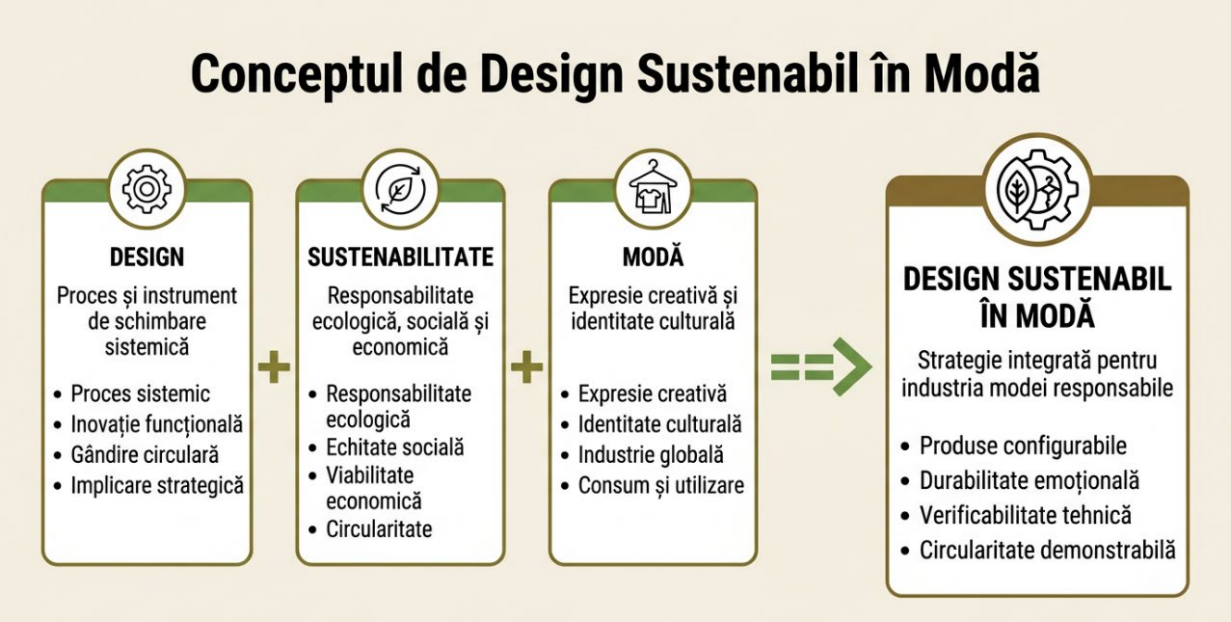


Figura 1.1. Conceptul de "Design Sustenabil în Modă"

Designul, în contextul modei sustenabile, depășește noțiunile tradiționale de creație estetică sau rezolvare funcțională a problemelor, pentru a include intervenții sistemice capabile să transforme sistemele de producție și consum (Kozlowski, 2023; Sakaue, 2023). Această conceptualizare extinsă poziționează designul nu doar ca o activitate care modelează produse individuale, ci ca o practică strategică ce influențează lanțuri valorice întregi, modele de afaceri și sisteme socio-tehnice (Claxton și colab., 2020; Dan și colab., 2021).

Moda, ca domeniu de studiu, include nu doar obiectele vestimentare, ci și sistemele sociale, culturale și economice care le produc, le distribuie, le consumă și le valorizează simbolic. Această perspectivă extinsă este importantă pentru cercetarea de față, deoarece sustenabilitatea nu poate fi analizată doar la nivelul materialului sau al produsului, ci trebuie înțeleasă în relație cu practicile de consum, cu durata de utilizare, cu mecanismele de producție și cu semnificațiile culturale ale obiectului vestimentar.

Sustenabilitatea în modă cuprinde dimensiuni de mediu, sociale și economice, fiind conceptualizată frecvent prin cadrul triple bottom line (Pal, 2017; Nayak, 2024). Sustenabilitatea de mediu vizează impacturi precum schimbările climatice, epuizarea resurselor, poluarea apei, contaminarea chimică și pierderea biodiversității (Bailey și colab., 2022; Rehman și colab., 2024). Sustenabilitatea socială include drepturile muncii, condițiile de lucru, salariile echitabile, impactul asupra comunităților și conservarea culturală (Clarke-Sather și colab., 2019; Kozlowski, 2023). Sustenabilitatea economică implică viabilitatea afacerii, crearea de valoare și distribuirea echitabilă a beneficiilor (Pedersen și colab., 2019; Burnstine și colab., 2025).

Prezenta cercetare adoptă un cadru comprehensiv al sustenabilității care integrează dimensiunile de mediu, sociale și economice, recunoscând interdependențele și potențialele tensiuni dintre acestea. Această abordare admite că designul vestimentar sustenabil trebuie să răspundă simultan unor obiective multiple precum reducerea impacturilor asupra mediului, asigurarea justiției sociale și menținerea viabilității economice, gestionând totodată compromisurile și sinergiile dintre aceste scopuri.

1.3. Evoluția istorică a abordărilor sustenabile în designul vestimentar

Evoluția istorică a abordărilor sustenabile în designul vestimentar prezintă transformarea progresivă a strategiilor de sustenabilitate în industria modei - de la practici tradiționale precum designul circular, utilizarea materialelor sustenabile și reducerea deșeurilor, către inovații moderne precum "Cradle to Cradle", biomimetica, eco-designul și inovațiile textile. Principalele etape ale evoluției istorice a abordărilor sustenabile în designul vestimentar sunt prezentate sintetic în Figura 1.2.

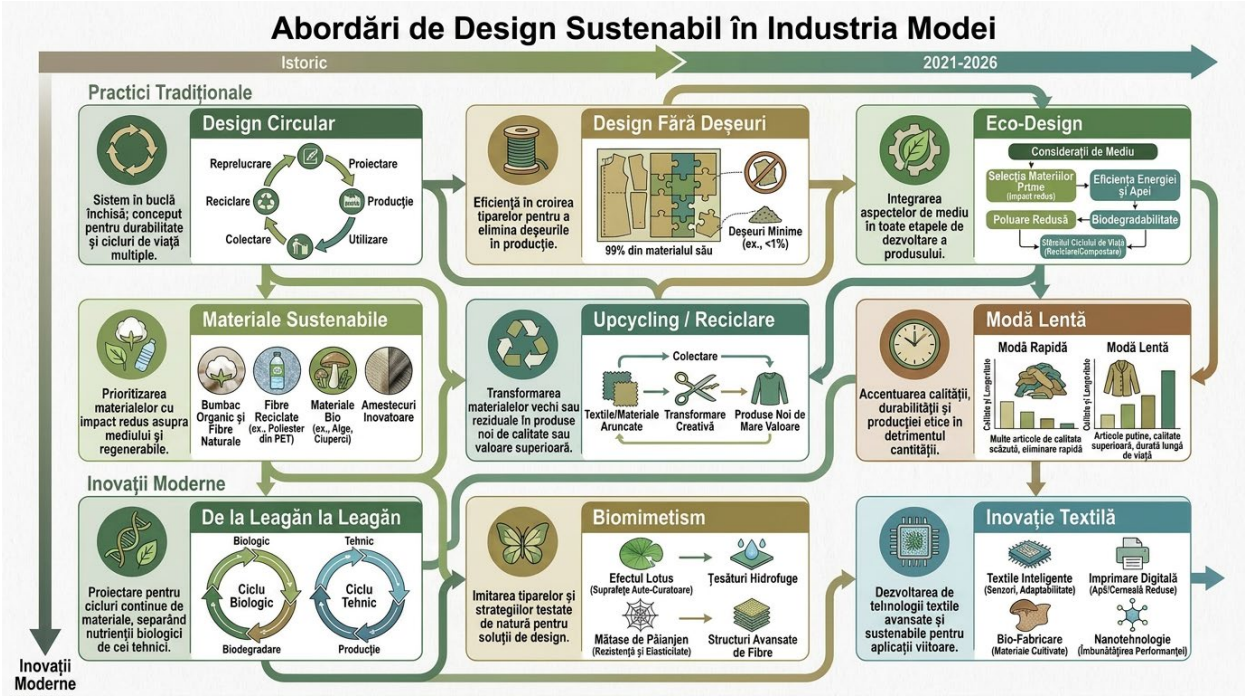


Figura 1.2. Evoluția istorică a abordărilor sustenabile în designul vestimentar

Designul vestimentar sustenabil contemporan se sprijină pe rădăcini istorice profunde, ancorate în practicile tradiționale de realizare a textilelor și a îmbrăcămintei, care încorporau principii de ingeniozitate, durabilitate și minimizare a deșeurilor (McQuillan și colab., 2018; Kim și colab., 2023). Producția vestimentară preindustrială era caracterizată de procese artizanale intensive din punct de vedere al muncii, aprovizionare locală cu materiale și practici culturale care valorizau longevitatea produselor, repararea și reutilizarea.

În perioada contemporană, dezvoltarea abordărilor sustenabile în modă a fost influențată de preocupările privind impacturile de mediu ale industriei, de consolidarea conceptelor de eco-design, economie circulară și „Life Cycle Thinking", precum și de apariția unor noi materiale, tehnologii și modele de producție. În contextul preocupărilor actuale pentru materiale alternative

și soluții bio-bazate, Figura 1.3 ilustrează exemple de materiale prezentate în cadrul proiectului HEREWEAR, Romanian Creative Week Iași 2022. Evoluțiile în politicile publice s-au accelerat, prin inițiative precum Strategia UE pentru Textile Durabile și Circulare (2022), scheme de responsabilitate extinsă a producătorului și cerințe de eco-design (Manshoven și colab., 2022). Aceste cadre de politici creează factori de reglementare pentru designul sustenabil, stabilind standarde și cerințe pentru produse textile mai durabile, reparabile, reutilizabile și reciclabile.



Figura 1.3. Materiale Biobased prezentate în cadrul proiectului HEREWEAR, Romanian Creative Week Iași 2022

1.4. Modele teoretice dominante în designul sustenabil pentru industria modei

Analiza literaturii de specialitate evidențiază existența unui câmp teoretic divers și aflat în continuă dezvoltare, în care mai multe abordări conceptuale, dezvoltate independent, dar convergente prin preocupările lor fundamentale, oferă repere complementare pentru înțelegerea și aplicarea designului sustenabil în industria modei. Deși fiecare abordare pornește de la premise și priorități distincte, toate susțin ideea că sustenabilitatea nu poate fi redusă la intervenții punctuale asupra materialelor sau proceselor, ci necesită transformarea relației dintre produs, utilizator, sistem de producție și mediu.

Design for Sustainability (DfS) constituie un cadru teoretic cuprinzător care poziționează designul ca un sistem strategic pentru atingerea obiectivelor de sustenabilitate de mediu, sociale și economice (Fletcher, 2013; D'Itria și colab., 2024). Eco-designul reprezintă una dintre cele mai vechi și mai consolidate abordări în proiectarea pentru reducerea impactului asupra mediului, concentrându-se asupra integrării criteriilor ecologice în dezvoltarea produsului. Economia circulară oferă o schimbare fundamentală față de modelul liniar „preia-produce-aruncă”, promovând menținerea materialelor și produselor în circulație cât mai mult timp posibil, prin reutilizare, reparare, refabricare și reciclare.

Gândirea bazată pe ciclul de viață oferă o perspectivă esențială asupra impacturilor cumulative ale produselor vestimentare, de la extracția materiilor prime până la sfârșitul ciclului de viață. Aplicarea LCA în modă a generat dovezi empirice extinse privind impacturile de mediu ale diferitelor materiale, procese de producție și opțiuni de design (Moazzem și colab., 2021; Gonzalez și colab., 2024). În ciuda aplicării sale extinse, LCA în modă se confruntă cu provocări și limitări metodologice semnificative (Luo și colab., 2021; Fonseca și colab., 2023).

1.5. Taxonomia strategiilor de design sustenabil în modă

Trecerea de la fundamentarea teoretică la practica proiectării presupune transpunerea principiilor sustenabilității în strategii concrete de design, prin decizii deliberate privind materialele, construcția, structura și ciclul de viață al produsului vestimentar. În ultimele decenii, literatura de specialitate a dezvoltat un ansamblu amplu și divers de astfel de strategii, formulate adesea independent, în contexte disciplinare diferite, și clasificate după criterii variate.

Strategiile de prevenție urmăresc eliminarea sau minimizarea generării deșeurilor la sursă prin decizii de design care reduc consumurile materiale, optimizează procesele de producție și evită risipa inutilă (Rahee și colab., 2024; Zdonek și colab., 2025). Strategiile de durabilitate urmăresc prelungirea vieții produselor vestimentare, reducând ritmul de înlocuire și consumul de resurse asociat producerii de noi articole. Strategiile de circularitate urmăresc menținerea materialelor și produselor în cicluri de utilizare cât mai lungi, prin reparare, reutilizare, refabricare, reciclare și proiectare pentru sfârșitul ciclului de viață. Strategiile relaționale și comportamentale se concentrează asupra relației dintre utilizator și produs, urmărind creșterea atașamentului, implicării și responsabilității față de obiectul vestimentar.

Strategiile de integrare digitală valorifică tehnologiile digitale pentru a permite practici sustenabile de design, producție și consum (Colombi și colab., 2023; Wang și colab., 2023). Aceste strategii pornesc de la premisa că tehnologiile digitale - inclusiv imprimarea 3D, inteligența artificială, blockchain, instrumentele de design virtual și platformele digitale - pot transforma fundamental sistemele modei către sustenabilitate prin facilitarea unor noi metode de producție, modele de afaceri și forme de interacțiune cu utilizatorul.

1.6. Tehnologii digitale și producția sustenabilă în modă

Dacă strategiile de design analizate în secțiunea anterioară definesc direcțiile prin care produsul vestimentar poate fi proiectat diferit, tehnologiile digitale oferă mijloacele prin care aceste strategii pot fi implementate cu un grad mai ridicat de precizie, control și adaptabilitate. Dezvoltarea unui ecosistem tehnologic digital, care include fabricația aditivă, designul parametric, prototiparea virtuală, inteligența artificială și sistemele de trasabilitate bazate pe blockchain, a extins posibilitățile de intervenție ale designerului asupra produsului, procesului și lanțului de valoare.

Fabricația aditivă, cunoscută în mod obișnuit sub denumirea de imprimare 3D, a apărut ca o tehnologie transformatoare pentru producția sustenabilă în modă, oferind posibilități de eliminare a deșeurilor, personalizare, producție la cerere și manufactură locală (Pasricha și Kadolph, 2018; Xiao și colab., 2022). Spre deosebire de procesele convenționale subtractive, care presupun croirea reperelor din materialul textil, fabricația aditivă construiește produsele strat cu strat, pe baza unui model digital.

Aceste tehnologii nu funcționează izolat, ci pot fi integrate în fluxuri complementare: proiectarea digitală poate sprijini fabricația aditivă, inteligența artificială poate contribui la prognoza cererii și la producția la comandă, iar sistemele de trasabilitate pot susține verificarea și comunicarea informațiilor privind originea, compoziția și performanța de sustenabilitate a produselor. Totuși, adoptarea tehnologiilor digitale nu este lipsită de limitări. Consumul energetic, costurile infrastructurii, competențele tehnice necesare, accesibilitatea tehnologică și riscul unor forme noi de supra-producție sau supra-consum trebuie evaluate critic.

1.7. Stadiul actual al cercetării și lacune identificate

Sinteza realizată în secțiunile precedente, privind modelele teoretice dominante, taxonomia strategiilor de design și rolul tehnologiilor digitale, evidențiază un domeniu de cercetare dinamic, caracterizat printr-o creștere semnificativă a interesului științific. Cu toate acestea, numărul tot mai mare al publicațiilor nu echivalează în mod automat cu maturitatea sau coerența domeniului. Analiza critică a literaturii relevă persistența unor lacune structurale care limitează atât profunzimea cunoașterii, cât și transferabilitatea rezultatelor în practică.

Aceste lacune se manifestă la mai multe niveluri: metodologic, prin instrumente de evaluare încă nestandardizate, incomplete sau insuficient validate; teoretic, prin aplicarea frecvent izolată a unor modele conceptuale, fără integrare sistemică; empiric, prin numărul redus al dovezilor privind eficiența reală a strategiilor de design, adesea fragmentare și rar comparative; și contextual, prin subreprezentarea anumitor segmente ale industriei, zone geografice și tipologii de produs.

Identificarea acestor lacune nu reprezintă doar un exercițiu critic, ci are o funcție metodologică importantă în structura prezentei teze. Ea delimitează spațiul de cercetare în care se înscrie demersul doctoral și justifică relevanța abordării propuse: o investigație experimentală, verificabilă și orientată spre evaluarea performanței fizico-mecanice, într-un domeniu în care discursul despre sustenabilitate depășește adesea nivelul dovezilor măsurabile.

1.8. Concluzii și poziționarea cercetării doctorale în contextul cadrului teoretic

Analiza cadrului teoretic realizată în Capitolul I evidențiază faptul că designul sustenabil în industria modei este un domeniu caracterizat de complexitate conceptuală, fragmentare metodologică și tensiuni structurale între idealurile sustenabilității și realitățile economice ale sistemului modei contemporane. Literatura de specialitate confirmă existența unor multiple cadre teoretice relevante - Design pentru sustenabilitate, eco-design, economia circulară, Life Cycle Thinking, modele de inovare sustenabilă, design participativ, design emoțional și abordări sistemice - însă aceste cadre sunt adesea aplicate fragmentar, fără o integrare suficientă la nivel de produs, utilizare și sistem.

În acest context, cercetarea doctorală se poziționează la intersecția dintre designul sustenabil, modularitate și fabricație aditivă, urmărind dezvoltarea unei abordări verificabile prin care principiile sustenabilității să fie transpuse într-o infrastructură vestimentară concretă. Alegerea imprimării 3D este justificată și prin compatibilitatea acesteia cu strategiile de design urmărite în cercetare. Fabricația aditivă permite controlul geometriei modulelor, al sistemelor de îmbinare, al densității structurale și al relației dintre formă, material și funcție, aspecte relevante pentru dezvoltarea unor produse vestimentare modulare, configurabile și reparabile. În sinteză, designul sustenabil în modă poate fi înțeles ca o abordare holistică, în care dimensiunile de mediu,

sociale, economice, tehnologice și relaționale sunt interdependente, conform schemei prezentate în Figura 1.4.

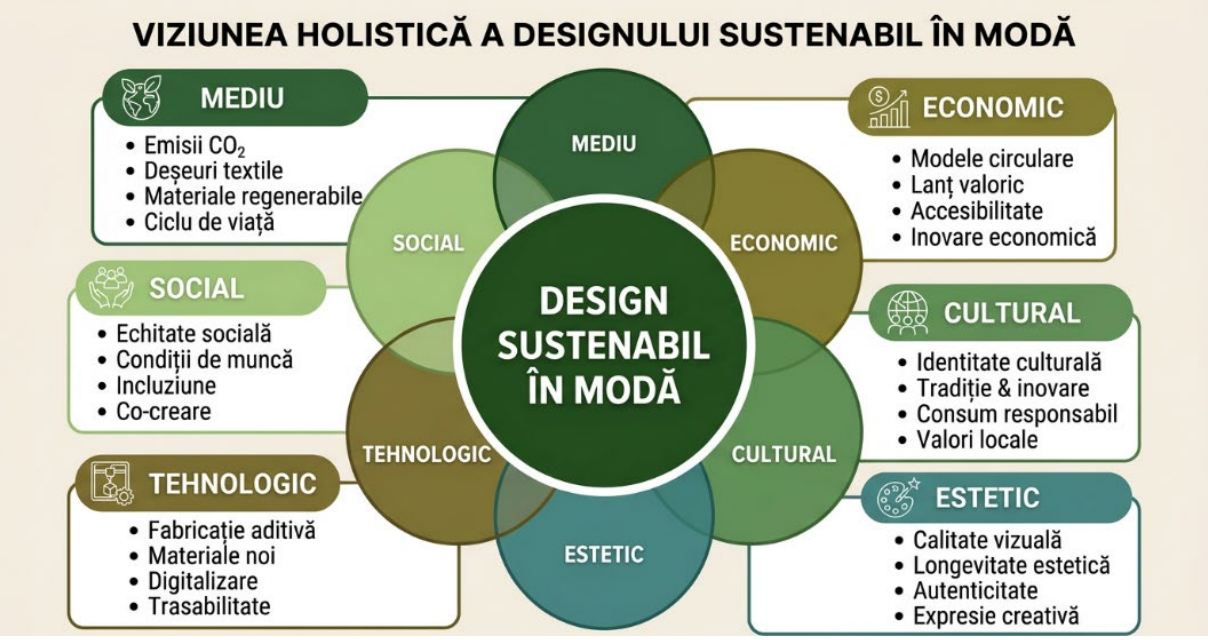


Figura 1.4. Dimensiunile în viziunea holistică a "Designului sustenabil în modă"

CAPITOLUL II – SUSTENABILITATE ȘI GREENWASHING: DIAGNOZĂ, TIPURI ȘI IMPLICAȚII CRITICE

Implicarea industriei modei în sustenabilitate a devenit din ce în ce mai complexă, necesitând o clarificare conceptuală precisă atât a sustenabilității, cât și a greenwashingului în acest context specific. Cu toate acestea, operaționalizarea sustenabilității rămâne contestată și multifațetată, cercetătorii identificând tensiuni persistente între idealurile teoretice și practicile industriei (Moorhouse și Moorhouse, 2018).

2.1. Clarificări conceptuale: sustenabilitatea și greenwashingul în industria modei

Henninger și colab. (2016) oferă o definiție fundamentală, conceptualizând moda sustenabilă ca o abordare care ia în considerare impacturile pe întreg ciclul de viață al produselor vestimentare, abordând totodată preocupările legate de justiția socială de-a lungul lanțului de aprovizionare (Henninger și colab., 2016). Această definiție subliniază interconectarea dintre responsabilitatea față de mediu și responsabilitatea socială, contestând accentul istoric al industriei pus exclusiv pe valoarea estetică și economică. Conceptul depășește simpla substituire a materialelor sau îmbunătățirile incrementale, incluzând transformări fundamentale ale sistemelor de producție, tiparelor de consum și modelelor de afaceri (Niinimäki, 2015).

Greenwashingul, în schimb, reprezintă antiteza sustenabilității autentice, o practică deliberată sau neglijentă de transmitere a unor afirmații de mediu înșelătoare pentru a crea iluzia responsabilității ecologice fără acțiuni substanțiale corespunzătoare (Alizadeh și colab., 2024). În contextul modei, greenwashingul se manifestă printr-un ansamblu sofisticat de tactici înșelătoare care exploatează preocupările ecologice ale consumatorilor, menținând în același timp practici de afaceri fundamental nesustenabile (Puteri și colab., 2025).

Complexitatea industriei modei — caracterizată prin lanțuri globale de aprovizionare fragmentate, diversitate de materiale și multiple etape de producție — creează provocări inerente atât pentru realizarea, cât și pentru comunicarea unei sustenabilități autentice (Moroaca și colab., 2024). Această complexitate oferă un teren fertil pentru greenwashing, deoarece brandurile pot evidenția selectiv îmbunătățiri minore, în timp ce ascund impacturi majore asupra mediului (Mousavi și colab., 2024).

2.2. Evoluția istorică a greenwashingului: de la publicitate înșelătoare la strategii sistemice

Traiectoria istorică a greenwashingului în modă relevă o sofisticare progresivă, de la publicitate simplu înșelătoare la strategii complexe, sistemice, integrate în ansamblul operațiunilor și comunicării corporative. Deși termenul „greenwashing” a apărut în anii 1980, practica înșelării privind impactul asupra mediului în modă are rădăcini mai vechi, evoluând ca răspuns la creșterea conștientizării acestor probleme și la presiunile de reglementare (Badhwar și colab., 2024).

Faza timpurie a greenwashingului în modă, care se întinde din anii 1990 până la începutul anilor 2000, a implicat în principal afirmații false sau exagerate privind caracterul ecologic în publicitate și etichetarea produselor (Li și Zhao, 2009). În această perioadă, brandurile făceau afirmații generale, nefondate, despre prietenia față de mediu, fără a furniza dovezi sau verificare din partea unor terți (Chandra, 2017).

Greenwashingul contemporan, începând aproximativ din 2020, reflectă o integrare și mai sofisticată a mesajelor de mediu în poziționarea centrală a brandului și în strategia de afaceri

(Puteri și colab., 2025). Marii retaileri de modă au adoptat ținte și angajamente ambițioase privind sustenabilitatea, adesea formulate în jurul principiilor economiei circulare, neutralității carbonului și transparenței lanțului de aprovizionare (Kaplan și Gürel, 2022). Cu toate acestea, dovezile sugerează că aceste angajamente sunt frecvent lipsite de planuri concrete de implementare, etape măsurabile sau verificare independentă (Maratos, 2023).

Analiza traiectoriei istorice arată că greenwashingul a evoluat dintr-o tactică periferică de marketing într-un răspuns strategic central la presiunile legate de sustenabilitate (Alizadeh și colab., 2024). Această transformare reflectă recunoașterea de către industria modei a faptului că preocupările de mediu reprezintă atât un risc reputațional, cât și o oportunitate de piață, stimulând aparența de sustenabilitate chiar și atunci când transformarea substanțială rămâne dificilă din punct de vedere economic sau operațional (Moroaca și colab., 2024).

2.3. Tipologii și mecanisme ale greenwashingului în modă

Tipologiile și mecanismele greenwashingului în modă evidențiază diversitatea formelor prin care afirmațiile de sustenabilitate pot deveni înșelătoare, incomplete sau imposibil de verificat. Greenwashingul nu se reduce la afirmații false explicite, ci include un ansamblu de tactici discursive, vizuale, materiale și simbolice prin care brandurile construiesc o imagine de responsabilitate ecologică fără transformări proporționale ale practicilor de producție și consum.

În industria modei, greenwashingul poate apărea prin utilizarea unui lexic ecologic vag, prin imagistică simbolică „eco", prin certificări ecologice neverificate, prin încadrare morală emoțională și prin afirmații nefondate (Puteri și colab., 2025). Aceste practici exploatează preocupările consumatorilor pentru mediu și creează impresia unei responsabilități mai mari decât cea susținută de date, procese sau rezultate verificabile.

O problemă importantă este caracterul selectiv al comunicării. Brandurile pot evidenția un atribut pozitiv al produsului, cum ar fi utilizarea parțială a unui material reciclat, fără a comunica impacturile asociate producției, transportului, volumului de produse sau sfârșitului de viață. În acest mod, sustenabilitatea este fragmentată în afirmații punctuale, care nu reflectă comportamentul real al produsului sau al companiei pe întreg ciclul de viață.

2.4. Greenwashingul ca problemă structurală a industriei modei

Greenwashingul nu reprezintă doar o problemă de comunicare, ci o problemă structurală a industriei modei. Aceasta este alimentată de modelul de afaceri al fast fashionului, de presiunea constantă pentru noutate, de lanțuri de aprovizionare globale și opace, de dificultatea verificării impacturilor reale și de discrepanța dintre ritmul producției și ritmul transformărilor sustenabile.

Problema structurală se extinde și la aranjamentele instituționale privind verificarea și certificarea sustenabilității (Mousavi și colab., 2024). Proliferarea eco-etichetelor, standardelor de sustenabilitate și schemelor de certificare — multe dintre ele lipsite de rigoare, independență sau acoperire cuprinzătoare — generează confuzie și permite greenwashingul prin selectarea oportunistă a certificărilor și prin etichetare proprie (Mousavi și colab., 2024). Absența unor cerințe obligatorii și standardizate de raportare a informațiilor privind sustenabilitatea permite brandurilor să prezinte selectiv informații favorabile, ascunzând impacturile negative (Costantini și colab., 2022).

Modelele de cerere ale consumatorilor și dinamica pieței contribuie, de asemenea, la dimensiunile structurale ale greenwashingului (Busalim și colab., 2022). În ciuda preocupărilor

declarate pentru mediu, comportamentul de cumpărare al consumatorilor rămâne puternic influențat de preț, comoditate și tendințele modei, ceea ce limitează stimulentele de piață pentru investiții autentice în sustenabilitate (Lu și colab., 2022). Această discrepanță între preferințele declarate și cele manifestate în practică încurajează greenwashingul, deoarece brandurile pot obține beneficii reputaționale prin poziționarea ca sustenabile fără a suporta costurile unei transformări substanțiale (Naumova și Naumova, 2024).

2.5. Percepția consumatorilor și efectele asupra comportamentului de consum

Percepția consumatorilor asupra greenwashingului și efectele acestuia asupra comportamentului de consum reprezintă dimensiuni critice ale fenomenului, întrucât eficiența greenwashingului depinde, în ultimă instanță, de modul în care consumatorii reacționează la afirmațiile legate de mediu și de consecințele comportamentale generate atât de încredere, cât și de scepticism (Busalim și colab., 2022).

Literatura analizată relevă tipare complexe și uneori contradictorii în modul în care consumatorii percep, procesează și reacționează la afirmațiile de sustenabilitate din modă (Lu și colab., 2022). Wang și colab. (2025) analizează reacțiile consumatorilor chinezi la diferite tipuri de greenwashing în modă și constată că expunerea la greenwashing generează atitudini negative față de brand, scăderea încrederii și diminuarea intenției de cumpărare, efecte care se extind dincolo de situația specifică de greenwashing (Wang și colab., 2025).

Această erodare a încrederii conduce la o „criză de credibilitate", în care consumatorii devin sceptici față de toate afirmațiile de sustenabilitate, indiferent de veridicitatea lor (Busalim și colab., 2022). Confruntați cu dificultatea de a distinge între sustenabilitatea autentică și greenwashing, consumatorii adoptă diverse strategii, inclusiv apelul la certificări terțe de încredere, preferința pentru branduri sustenabile consacrate, scepticism generalizat față de toate afirmațiile de mediu sau renunțarea la considerentele de sustenabilitate în deciziile de cumpărare (Busalim și colab., 2022).

Consecințele comportamentale ale greenwashingului depășesc deciziile individuale de cumpărare și influențează tiparele mai largi de consum și dinamica pieței (Naumova și Naumova, 2024). Greenwashingul pe scară largă contribuie la perpetuarea consumului fast fashion, creând iluzia că opțiuni sustenabile sunt ușor disponibile și că actul consumului în sine poate fi responsabil din punct de vedere ecologic (Kaplan și Gürel, 2022).

2.6. Impacturi critice ale greenwashingului

Impacturile greenwashingului depășesc cu mult înșelarea individuală a consumatorilor, generând consecințe sistemice care distorsionează piețele, erodează încrederea instituțională și creează bariere fundamentale în calea transformării autentice către sustenabilitate în industria modei (Alizadeh și colab., 2024). Aceste impacturi critice operează la multiple niveluri — individual, organizațional, de piață și societal — generând bucle de feedback care perpetuează practici nesustenabile (Kaplan și Gürel, 2022).

Distorsiunile de piață reprezintă o categorie principală de impacturi ale greenwashingului, modificând în mod fundamental dinamica competitivă și alocarea resurselor într-un mod care dezavantajează eforturile autentice de sustenabilitate (Li și Zhao, 2009). Greenwashingul creează avantaje competitive neloiale pentru brandurile care investesc în marketing înșelător în locul

îmbunătățirilor reale de mediu, penalizând astfel companiile care realizează investiții costisitoare și autentice în sustenabilitate (Moroaca și colab., 2024).

Dincolo de piață, greenwashingul afectează credibilitatea inițiativelor autentice de sustenabilitate, slăbește încrederea consumatorilor și întârzie transformarea sistemică a industriei. În acest sens, fenomenul nu trebuie înțeles doar ca abatere punctuală de comunicare, ci ca mecanism care menține și reproduce modelul nesustenabil al industriei modei.

2.7. Răspunsuri instituționale și instrumente de limitare a greenwashingului

Răspunsurile instituționale la greenwashing includ reglementări, mecanisme de protecție a consumatorilor, scheme de certificare, standarde de raportare, inițiative ale societății civile, campanii educaționale și sisteme tehnologice de transparență și trasabilitate. Totuși, eficiența acestor instrumente rămâne limitată de fragmentarea instituțională, de lipsa armonizării între jurisdicții și de dificultatea verificării afirmațiilor formulate de branduri.

Organizațiile societății civile au un rol important în expunerea greenwashingului și în exercitarea presiunii publice. McConkey (2024) analizează campania Greenpeace Detox My Fashion, orientată spre eliminarea substanțelor chimice periculoase din industria modei, ca studiu de caz al funcției de „câine de pază" a societății civile, evidențiind modul în care presiunea publică poate determina schimbări în comportamentul corporativ. Cu toate acestea, capacitatea organizațiilor societății civile este limitată comparativ cu amploarea greenwashingului, iar eficiența lor depinde de atenția mediatică și implicarea publicului, care sunt dificil de menținut pe termen lung (McConkey, 2024).

Inițiativele de educație și alfabetizare a consumatorilor reprezintă răspunsuri instituționale preventive, menite să îmbunătățească capacitatea consumatorilor de a identifica și respinge greenwashingul (Bingaman și colab., 2022). Totuși, eficiența educației consumatorilor este limitată de complexitatea sustenabilității în modă și de sofisticarea tacticilor de greenwashing, care depășesc capacitatea și motivația majorității consumatorilor de a procesa informații detaliate (Ende și colab., 2023).

Sistemele de transparență și trasabilitate facilitate de tehnologie oferă mecanisme instituționale emergente pentru combaterea greenwashingului (Mizrachi și Tal, 2022). Trasabilitatea bazată pe blockchain, pașapoartele digitale ale produselor și sistemele de informare prin coduri QR promit să furnizeze informații verificabile despre originea produselor, materiale și impacturi de mediu (Mizrachi și Tal, 2022). Totuși, implementarea este încă limitată, iar eficiența acestor sisteme depinde de calitatea datelor, verificarea independentă și implicarea consumatorilor, aspecte care nu au fost demonstrate la scară largă (Costantini și colab., 2022).

Fragmentarea și coordonarea limitată între răspunsurile instituționale reprezintă o slăbiciune critică (Mizrachi și Tal, 2022). Cadrele de reglementare diferă între jurisdicții, schemele de certificare nu sunt armonizate, inițiativele industriale operează independent, iar eforturile societății civile rămân dispersate (Dobos și colab., 2022).

2.8. Implicații pentru designul vestimentar și necesitatea unor abordări verificabile

Pervasivitatea greenwashingului în modă are implicații profunde pentru practica designului, necesitând schimbări fundamentale în modul în care designerii conceptualizează, dezvoltă și comunică atributele de mediu ale produselor vestimentare (Niinimäki, 2015). Depășirea greenwashingului impune abordări de design care prioritizează verificabilitatea, transparența și

performanța de mediu substanțială în detrimentul gesturilor simbolice de sustenabilitate (Mousavi și colab., 2024).

Strategiile de design verificabile reprezintă cerința fundamentală pentru combaterea greenwashingului încă din etapa de proiectare (Mousavi și colab., 2024). Designerii trebuie să adopte metodologii care permit verificarea independentă a afirmațiilor de mediu prin dovezi documentate, indicatori măsurabili și validare terță parte (Costantini și colab., 2022). Aceasta presupune depășirea sustenabilității pur estetice sau conceptuale și asumarea unei evaluări riguroase a ciclului de viață, a transparenței materialelor și a cuantificării impactului (Patwary, 2020).

Selecția și specificarea materialelor constituie puncte critice de intervenție pentru reducerea riscului de greenwashing (Henninger și colab., 2016). Designerii trebuie să depășească afirmațiile vagi de tip „material sustenabil" și să specifice exact compoziția fibroasă, originea materialelor, metodele de procesare și certificările de mediu (Mousavi și colab., 2024). Aceasta necesită cunoștințe detaliate despre materiale și implicare în transparența lanțului de aprovizionare, dincolo de practica tradițională a designului (Dobos și colab., 2022).

În relație cu obiectivele prezentei teze, această concluzie justifică necesitatea unei cercetări în care modularitatea și fabricația aditivă nu sunt tratate doar ca soluții estetice sau tehnologice, ci ca posibile mecanisme de verificare a unor afirmații legate de durabilitate, reparabilitate, reconfigurare și utilizare extinsă.

2.9. Concluzii

Capitolul II a extins analiza teoretică prin investigarea critică a fenomenului de greenwashing în industria modei. Analiza a arătat că greenwashingul nu reprezintă doar o practică de comunicare înșelătoare, ci o problemă structurală a unui sistem industrial în care presiunea de a părea sustenabil poate depăși transformarea efectivă a practicilor de producție, distribuție și consum. Au fost analizate tipologii și mecanisme ale greenwashingului, formele sale vizuale, simbolice, materiale și discursive, precum și efectele asupra consumatorilor, asupra pieței și asupra credibilității inițiativelor autentice de sustenabilitate.

O concluzie esențială a Capitolului II este că sustenabilitatea nu poate rămâne la nivelul declarațiilor, al etichetelor sau al imaginii de brand, ci trebuie să fie susținută prin structuri, procese și mecanisme verificabile. În relație cu obiectivele tezei, această concluzie are un rol important, deoarece justifică nevoia de a trata modularitatea și fabricația aditivă nu ca simple soluții estetice sau tehnologice, ci ca posibile mecanisme de verificare a unor afirmații legate de durabilitate, reparabilitate, reconfigurare și utilizare extinsă. Prin urmare, Capitolul II creează legătura critică dintre discursul despre sustenabilitate și necesitatea validării tehnice.

CAPITOLUL III – MULTI-DESIGN CA STRATEGIE INTEGRATĂ PENTRU DEZVOLTAREA STRUCTURILOR MODULARE IMPRIMATE 3D ÎN CONTEXTUL MODEI SUSTENABILE

În acest cadru conceptual, modularitatea apare ca infrastructură structurală esențială, care permite repararea, reconfigurarea și circularitatea (Casciani, 2023; Zhang și colab., 2024), în timp ce fabricația aditivă oferă posibilități pentru producerea de structuri modulare de tip textil, cu conectori mecanici integrați (Bloomfield și Borstrock, 2018; Xiao și colab., 2022). În paralel, abordările de design participativ și co-creare promit consolidarea atașamentului emoțional și extinderea duratei de viață a produselor prin implicarea utilizatorilor în procesele de design și realizare (Cramer, 2011; Niinimäki, 2011). Cu toate acestea, aceste strategii rămân fragmentate, insuficient validate și slab integrate în cadre coerente care să coreleze performanța tehnică cu rezultate sustenabile măsurabile.

Sinteza literaturii de specialitate valorifică dovezi publicate în principal în perioada 2016–2026, completate cu lucrări anterioare considerate fundamentale pentru dezvoltarea domeniului. Demersul analitic este structurat în jurul a șase dimensiuni interconectate: necesitatea abordărilor integrate în contextul limitărilor intervențiilor bazate pe o singură strategie; multi-designul și cadrele multi-strategice în literatura actuală; modularitatea ca infrastructură structurală pentru sustenabilitate; dimensiunea relațională a designului sustenabil prin abordări participative și durabilitate emoțională; fabricația aditivă ca facilitator al designului sustenabil integrat; și verificabilitatea și mecanismele anti-greenwashing prin validare tehnică și evaluarea ciclului de viață.

3.1. Necesitatea unei abordări integrate în designul vestimentar sustenabil

Dovezile empirice demonstrează în mod constant că intervențiile de sustenabilitate focalizate pe dimensiuni unice — substituția materialelor, programe de circularitate sau îmbunătățiri ale durabilității — produc rezultate parțiale și generează frecvent compromisuri neintenționate de natură ecologică, socială sau economică. Intervențiile bazate pe o singură strategie nu reușesc să surprindă complexitatea sistemului modei, în care materialele, procesele de producție, utilizarea, întreținerea, durata de viață, sfârșitul ciclului de viață și modelele de afaceri sunt interdependente.

Analiza cuprinzătoare „Tools for Sustainable Fashion Design” a examinat instrumentele existente de design și a constatat că numeroase euristici și ghiduri nu includ protocoale de testare integrate și indicatori-cheie de performanță măsurabili, limitând capacitatea acestora de a confirma dacă afirmațiile de design — precum reciclabilitatea, separabilitatea sau calitatea fibrei în procesele de reciclare de la fibră la fibră — se mențin în condiții reale de procesare. Acest deficit de validare creează oportunități pentru afirmații de sustenabilitate bine intenționate, dar nefundamentate, care nu pot rezista unei examinări tehnice riguroase.

Studiile de caz empirice oferă contraste relevante. Burnstine și Ghattas (2025) au analizat branduri care au combinat inovația modelului de afaceri, strategii de design și sisteme operaționale, incluzând programul „Worn Wear” al Patagonia și inițiativa „Renew” a Eileen Fisher, și au documentat rezultate măsurabile. França și colab. (2023) au demonstrat necesitatea validării inginerești prin dezvoltarea unui prototip „Fiber Shredder” pentru reciclarea textilelor în sistem de la textile-la-textile. Testările mecanice realizate au arătat că parametrii de proces influențează semnificativ calitatea materialului rezultat și fezabilitatea utilizării acestuia în aplicații pentru o a

doua viață. Convergența dovezilor stabilește că intervențiile de sustenabilitate bazate pe o singură strategie produc în mod constant rezultate incomplete și pot genera transferuri ale impacturilor către alte componente ale sistemului atunci când sunt implementate fără integrare la nivel tehnic, operațional și sistemic.

3.2. Abordări multi-design și multi-strategice în literatura de specialitate

Modelele integrate care combină gândirea sistemică, perspectivele de tip ciclu de viață și evaluarea multimodală reprezintă o evoluție semnificativă în cercetarea designului sustenabil în modă. Aceste modele integrate împărtășesc elemente comune, precum gândirea sistemică, colaborarea interdisciplinară și atenția acordată intervențiilor la multiple niveluri. Totuși, ele diferă în ceea ce privește accentul și domeniul de aplicare.

LCT colaborativ prioritizează validarea tehnică prin integrarea LCA (Goldsworthy și Ellams, 2019), C2CAD se concentrează pe validarea sustenabilității la nivel de proces în producția hibridă (Huang și Jin, 2024), PPP pune în prim-plan implicarea stakeholderilor și implementarea ancorată local (Real Earley și Goldsworthy, 2018), iar modelarea hibridă evidențiază analiza cantitativă a dinamicii sistemului (Lee, 2022). Fiecare cadru oferă puncte forte distincte, dar evidențiază totodată limitări în abordarea complexității complete a transformării sustenabile în modă.

Analiza critică relevă existența unor compromisuri persistente, pe care modelele integrate le fac vizibile, dar nu le elimină. Designerii trebuie să echilibreze atractivitatea estetică, performanța funcțională, obiectivele de sustenabilitate și viabilitatea economică — compromisuri care devin mai evidente, dar nu neapărat mai ușor de rezolvat prin utilizarea cadrelor integrate (Huang și Jin, 2024; Goldsworthy și Ellams, 2019). Zhang și colab. (2024) au dezvoltat un model integrat de suport decizional AHP-DEMATEL pentru proiectarea lanțurilor de aprovizionare vestimentare în buclă închisă și alinierea stakeholderilor, combinând procesul analitic ierarhic și metoda DEMATEL pentru structurarea compromisurilor complexe și armonizarea priorităților diverselor părți interesate.

3.3. Modularitatea ca infrastructură structurală pentru sustenabilitate

Modularitatea aplicată produselor vestimentare și structurilor de tip textil se conturează drept o infrastructură structurală importantă pentru susținerea reparării, reconfigurării și circularității. Acest potențial devine relevant atunci când sistemele modulare sunt asociate cu proiectarea robustă a conectorilor, cu principii de proiectare pentru dezasamblare și cu soluții centrate pe utilizator. Totuși, sistemele modulare nu sunt sustenabile în mod automat. Ele pot contribui la sustenabilitatea produselor vestimentare doar atunci când prelungirea demonstrată a duratei de utilizare, posibilitatea reparării și procesarea eficientă la sfârșitul ciclului de viață compensează consumul suplimentar de material și impacturile inițiale asociate conectorilor și interfețelor.

Designul pentru dezasamblare și modularitatea devin strategii sustenabile numai atunci când avantajele obținute prin utilizare prelungită și recuperare materială compensează impacturile inițiale generate de complexitatea constructivă suplimentară. Din literatura analizată pot fi extrase recomandări practice de design: utilizarea interfețelor mecanice detașabile care permit înlocuirea manuală fără cusut sau unelte specializate (Lukáč și colab., 2025; Lindsay, 2025), prioritizarea durabilității conectorilor și testarea ciclurilor de solicitare sub îndoire, întindere și uzură (Stanley

și colab., 2022; Casciani, 2023), precum și planificarea separării materialelor și reciclabilității la sfârșitul vieții, evitând conectorii multi-material care complică reciclarea (Schischke și colab., 2019; Nash, 2022).

Zhang și colab. (2024) arată că modularitatea oferă mecanisme promițătoare pentru extinderea duratei de viață și reducerea deșeurilor, prin adaptabilitate la modificări ale mărimii corporale, preferințelor stilistice și nevoilor funcționale. Totuși, beneficiile de sustenabilitate depind critic de comportamentul utilizatorilor, de implicarea acestora în reconfigurare, reparare și utilizare prelungită. Casciani (2023) argumentează că modularitatea ca strategie de design pentru sustenabilitate trebuie abordată la nivel sistemic, incluzând nu doar produsul, ci și suportul pentru utilizator, infrastructura de reparare și modelele de afaceri care stimulează utilizarea prelungită.

3.4. Dimensiunea relațională a designului sustenabil

Practici precum designul participativ, co-crearea și abordările centrate pe utilizator sunt frecvent propuse ca modalități de consolidare a relației purtător–vestimentație și de încurajare a utilizării îndelungate a articolelor vestimentare. Cu toate acestea, baza empirică rămâne în mare parte calitativă și orientată pe termen scurt. Multiple studii documentează creșterea sensului, a implicării și a intenției de îngrijire atunci când utilizatorii participă la procesele de design sau de realizare a produselor.

Cramer (2011) susține că modelele participative, incluzând croitoria la comandă, personalizarea în masă și co-designul, pot crește semnificația unui produs vestimentar și intenția purtătorului de a-l păstra mai mult timp, întrucât implicarea generează un sentiment de unicitate și relevanță personală. Autoarea poziționează designul participativ ca strategie pentru longevitatea produsului, argumentând că produsele co-create capătă o semnificație emoțională care depășește ciclurile modei și utilitatea funcțională.

Hur și Beverley (2023) au desfășurat ateliere de co-creare și au dezvoltat instrumente utilizate împreună cu designeri, specialiști în marketing și antreprenori, pentru a stimula inovația în moda sustenabilă. Instrumentele de ideare și formatele de workshop au generat concepte percepute de participanți ca fiind mai relevante și mai sustenabile decât abordările convenționale. Totuși, cercetarea privind sustenabilitatea emoțională în modă nu dispune încă de studii riguroase, longitudinale și bazate pe indicatori obiectivi care să demonstreze că participarea extinde cauzal durata de viață a produselor și reduce obsolescența emoțională.

3.5. Fabricația aditivă ca facilitator al designului sustenabil integrat

Fabricația aditivă în modă acoperă în prezent o gamă largă de aplicații, de la piese couture experimentale la produse funcționale și articole hibride care integrează elemente imprimate în textile convenționale. Literatura de specialitate evidențiază diversitatea materialelor, proceselor tehnologice și ariilor de aplicare, precum și diferențele semnificative dintre rutele de fabricație utilizate.

Xiao și colab. (2022) au realizat o analiză sistematică a dezvoltării tehnologiei de imprimare 3D și a aplicațiilor acesteia în designul textil și vestimentar, identificând patru direcții principale de fabricație: imprimarea fibrelor, imprimarea structurilor flexibile, imprimarea pe textile și imprimarea modulelor articulate. Fiecare direcție oferă capabilități distincte și implică provocări tehnice specifice. Imprimarea fibrelor permite realizarea unor structuri similare firelor ce pot fi ulterior țesute sau tricotate, însă obținerea flexibilității și a drapajului specifice

materialelor textile rămâne dificilă. Imprimarea structurilor flexibile permite generarea de componente vestimentare sau accesorii cu rigiditate și elasticitate controlate prin design de tip rețea și selecția materialului. Imprimarea pe materiale textile conduce la construcții hibride ce combină țesături convenționale cu elemente imprimate decorative sau funcționale. Imprimarea modulelor articulate produce ansambluri de tip zale care imită comportamentul textil prin conexiuni mecanice articulate.

Bloomfield și Borstrock (2018) au dezvoltat sistemul Modeclix, bazat pe panouri articulate imprimate din poliamidă prin sinterizare selectivă cu laser. Sistemul demonstrează utilizarea fabricației aditive la scară industrială pentru aplicații vestimentare, panourile imprimate putând fi vopsite, reparate și redimensionate pentru realizarea de articole personalizate. Astfel, imprimarea aditivă devine punctul de convergență între dimensiunea structurală, dimensiunea relațională și dimensiunea tehnică. În loc să fie analizată exclusiv ca tehnologie de producție, aceasta trebuie înțeleasă ca instrument de integrare sistemică în cadrul strategiilor multi-design.

3.6. Multi-design ca strategie verificabilă și anti-greenwashing

Validarea tehnică și măsurabilă — prin LCA, testare mecanică, evaluarea performanței și sisteme transparente de evaluare prin scoruri — este esențială pentru fundamentarea afirmațiilor de sustenabilitate, prevenirea greenwashingului și orientarea deciziilor de design către rezultate verificabile. Absența protocoalelor standardizate de validare și a instrumentelor integrate de evaluare reprezintă o lacună critică ce limitează credibilitatea și eficacitatea inițiativelor de modă sustenabilă.

Gonçalves și Silva (2021) subliniază că metricile cantitative bazate pe ciclul de viață, în special emisiile echivalente CO_2 derivate din LCA de mediu, oferă cea mai solidă bază pentru fundamentarea afirmațiilor de sustenabilitate în domeniul îmbrăcămintei. Analiza lor asupra abordărilor bazate pe evaluarea prin scoruri din industria modei relevă metodologii eterogene și practici selective de divulgare a informațiilor, care subminează comparabilitatea și facilitează greenwashingul.

Integrarea validării tehnice în procesele de design rămâne insuficient dezvoltată. Mai multe studii semnalează un decalaj persistent în care deciziile creative de design avansează fără validare inginerească sistematică sau, invers, în care testarea inginerească are loc izolat de iterațiile de design (Kozlowski, 2023; França și colab., 2023). Reducerea acestui decalaj presupune dezvoltarea unor fluxuri de lucru integrate care să includă testarea mecanică, evaluarea durabilității și cuantificarea pe ciclul de viață în cadrul procesului de design, permițând designerilor să realizeze compromisuri informate și să valideze faptul că intențiile de sustenabilitate se traduc în performanțe măsurabile.

3.7. Propunere de cadru multi-design pentru moda sustenabilă: strategii de design integrate

Sinteza dovezilor analizate în subcapitolele 3.1–3.6 — respectiv necesitatea abordărilor integrate în designul vestimentar sustenabil, abordările multi-design și multi-strategice, modularitatea ca infrastructură structurală pentru sustenabilitate, dimensiunea participativă și emoțională a designului sustenabil, fabricația aditivă ca facilitator tehnologic și mecanismele de verificabilitate anti-greenwashing — evidențiază atât necesitatea, cât și provocările dezvoltării unor strategii integrate de tip multi-design pentru moda sustenabilă.

Abordările bazate pe o singură strategie generează în mod constant rezultate parțiale și compromisuri neintenționate, iar fragmentarea practicilor, instrumentelor și sistemelor de date împiedică obținerea unui impact cumulativ. Modelele integrate care combină gândirea sistemică, analiza ciclului de viață și luarea deciziilor multicriteriale oferă direcții promițătoare, însă lacunele persistente privind validarea, standardizarea și implementarea operațională limitează eficiența și scalabilitatea acestora.

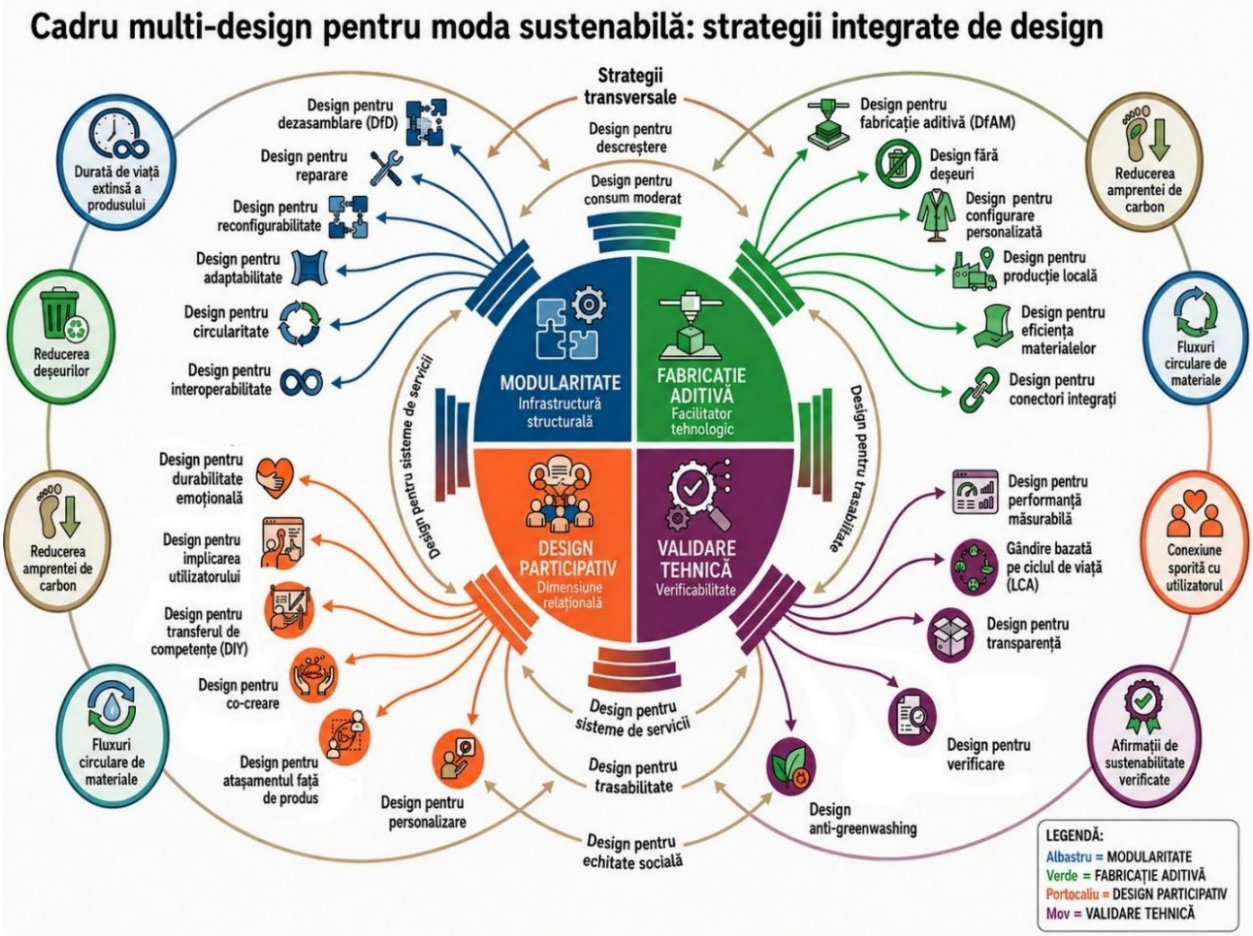


Figura 3.1.: Cadru multi-design pentru moda sustenabilă: Strategii de design integrate

Tranziția către moda sustenabilă presupune depășirea intervențiilor izolate și a practicilor fragmentate, în favoarea unor strategii integrate de tip multi-design care coordonează inovația tehnică, implicarea utilizatorului și validarea măsurabilă în cadrul unor modele de afaceri și politici publice adecvate. Cadrul integrat de tip Multi-Design pentru moda sustenabilă este structurat în jurul a patru piloni interconectați: modularitate, fabricație aditivă, design participativ și validare tehnică. Fiecare pilon este asociat cu strategii specifice de design — precum design pentru dezasamblare, reconfigurabilitate, personalizare, eficiență materială, testare mecanică și evaluare pe ciclul de viață — care converg către obiective comune: reducerea deșeurilor, diminuarea amprentei de carbon, fluxuri circulare de materiale, creșterea duratei de viață a produsului și prevenirea greenwashingului.

3.8. Concluzii

Capitolul III a analizat modul în care strategiile multi-design, modularitatea, fabricarea aditivă, designul participativ și validarea tehnică pot converge în vederea dezvoltării unor sisteme de modă sustenabilă verificabile. Analiza demonstrează că intervențiile de sustenabilitate bazate pe o singură strategie generează în mod constant rezultate incomplete și compromisuri neintenționate, iar fragmentarea practicilor, instrumentelor și sistemelor de date împiedică obținerea unui impact cumulativ. Modelele integrate care combină gândirea sistemică, analiza ciclului de viață și luarea deciziilor multicriteriale oferă direcții promițătoare, însă lacunele persistente privind validarea, standardizarea și implementarea operațională limitează eficiența și scalabilitatea acestora.

Modularitatea oferă mecanisme promițătoare pentru extinderea duratei de viață și reducerea deșeurilor, prin adaptabilitate la modificări ale mărimii corporale, preferințelor stilistice și nevoilor funcționale. Totuși, beneficiile de sustenabilitate depind de extinderea demonstrată a duratei de utilizare, de existența unor sisteme de reparare și de infrastructura capabilă să proceseze produse modulare. Designul participativ, co-crearea și abordările DIY consolidează atașamentul emoțional și intențiile de prelungire a utilizării produselor (Cramer, 2011; Niinimäki, 2011; Hur și Beverley, 2023), dar dovezile sunt predominant calitative și pe termen scurt. Imprimarea 3D permite dezvoltarea de structuri textile modulare, conectori mecanici integrați și optimizare geometrică pentru eficiență materială (Bloomfield și Borstrock, 2018; Xiao și colab., 2022; Ghimouz și colab., 2023), însă compromisurile de sustenabilitate — intensitate energetică, disponibilitate limitată a materialelor reciclabile și incertitudini privind sfârșitul ciclului de viață — rămân nerezolvate.

Prin urmare, Capitolul III a formulat cadrul conceptual central al cercetării: multi-designul ca strategie integrată pentru dezvoltarea structurilor modulare imprimate 3D în contextul modei sustenabile. Acest cadru reunește modularitatea, fabricația aditivă, dimensiunea relațională a designului și validarea tehnică, propunând o abordare prin care sustenabilitatea nu este tratată ca atribut declarativ, ci ca rezultat al unor mecanisme verificabile. Cadrul multi-design propus permite poziționarea cercetării dincolo de o simplă testare a unor mostre imprimate 3D și oferă o logică de ansamblu prin care structurile modulare pot fi evaluate simultan ca obiecte tehnice, sisteme de design și posibile infrastructuri pentru produse vestimentare configurabile.

Capitolul IV își propune, prin urmare, să transpună cadrul teoretic prezentat anterior într-o analiză aplicată a structurilor modulare fabricate prin tehnologii de imprimare 3D, investigând tipologii structurale, sisteme de îmbinare și comportament mecanic, interacțiunea material–geometrie–performanță, precum și implicațiile acestora asupra durabilității, reparabilității și potențialului circular.

CAPITOLUL IV – IMPRIMAREA ADITIVĂ ȘI STRUCTURI MODULARE FABRICATE PRIN TEHNOLOGII DE IMPRIMARE 3D

Capitolul IV prezintă principiile fundamentale ale fabricării aditive, principalele tehnologii de imprimare 3D utilizate în contextul modei și introduce tipologiile de structuri modulare imprimate 3D care vor constitui obiectul analizei comportamentului fizico-mecanic detaliate în capitolele V și VI.

4.1. Principiile fabricării aditive

Fabricarea aditivă, cunoscută în mod curent sub denumirea de imprimare 3D, reprezintă o abatere fundamentală de la paradigmele tradiționale de fabricație. Această tehnologie permite realizarea obiectelor tridimensionale prin adăugarea succesivă de material, strat cu strat, pe baza unor fișiere digitale de proiectare, contrastând puternic cu metodele de fabricație subtractivă, care presupun îndepărtarea materialului din blocuri inițiale de dimensiuni mai mari (Yap și colab., 2014). Procesul de construcție stratificată începe cu un model digital tridimensional, realizat de regulă cu ajutorul software-ului de proiectare asistată de calculator (CAD), care este ulterior convertit într-un format standard de fișier, precum STL (Lim și colab., 2014). Un software specializat de tip "slicer" împarte modelul digital în secțiuni orizontale și generează instrucțiuni lizibile de către mașină (G-code), care controlează mișcările imprimantei 3D, depunerea materialului și alți parametri de proces (Farhana și colab., 2025; Manaia și colab., 2023).

Procesul de fabricație aditivă oferă o serie de avantaje teoretice relevante pentru aplicațiile din domeniul modei. În primul rând, această tehnologie permite realizarea unei complexități geometrice ridicate fără costuri suplimentare, oferind designerilor posibilitatea de a crea structuri, modele și forme complexe care ar fi imposibil de realizat sau prohibitiv de costisitoare prin metodele tradiționale (Pasupuleti, 2024; Xiao și colab., 2022). În al doilea rând, fabricația aditivă facilitează personalizarea în masă, permițând ca fiecare obiect imprimat să fie adaptat în mod unic specificațiilor individuale, fără a necesita modificări ale uneltelor sau ale setărilor de producție (Wang, 2025; Khajavi, 2021).

4.2. Tehnologii de imprimare 3D în contextul modei

Mai multe tehnologii de imprimare 3D au fost adaptate aplicațiilor în modă, fiecare având caracteristici, capabilități și limitări distincte. Modelarea prin depunere de material topit, numită și fabricație cu filament topit, este una dintre cele mai utilizate tehnologii în cercetarea și practica din domeniul modei, datorită accesibilității, costului relativ redus și compatibilității cu materiale flexibile. FDM funcționează prin încălzirea filamentului termoplastic până la punctul de topire și extrudarea acestuia printr-o duză care se deplasează după trasee precise, construind obiectul strat cu strat.

Sinterizarea selectivă cu laser (SLS) utilizează lasere de mare putere pentru a fuziona materiale sub formă de pulbere, de regulă nailon sau poliamidă, transformându-le în structuri solide (Lim și colab., 2014). SLS oferă avantaje relevante pentru aplicațiile vestimentare, inclusiv posibilitatea realizării de geometrii complexe fără necesitatea structurilor de suport, întrucât pulberea ne-sinterizată susține obiectul în timpul procesului de imprimare (Riabchuk, 2023). Tehnologia produce piese cu proprietăți mecanice bune și a fost utilizată în special pentru încălțăminte și accesorii (Farhana și colab., 2025).

Stereolitografia utilizează lasere ultraviolete pentru a polimeriza și solidifica rășini fotopolimerice lichide, strat cu strat (Corral și colab., 2017). Deși SLA permite obținerea unor piese cu rezoluție ridicată și finisaje de suprafață netede, natura rigidă a majorității rășinilor fotopolimerice limitează aplicabilitatea acestei tehnologii în realizarea articolelor vestimentare flexibile (Xiao și colab., 2022).

Printre tehnologiile emergente se numără Direct Ink Writing și Electro-Hydrodynamic Direct Writing, care permit imprimarea cu o gamă mai largă de materiale, inclusiv cerneluri conductive utilizate în textile inteligente (Riabchuk, 2023). Imprimarea 3D cu jet de cerneală presupune depunerea materialelor lichide sub formă de picături și oferă potențial pentru imprimarea multi-material și multi-color (Xiao și colab., 2022). De asemenea, tehnicile de extrudare a materialului au fost adaptate pentru imprimarea directă pe substraturi textile existente, rezultând structuri hibride care combină elemente imprimate 3D cu textile tradiționale (Loh și colab., 2019; Wengerkiewicz și colab., 2022).

4.3. Structuri modulare fabricate prin tehnologii de imprimare 3D

În mediile de distribuție digitală dedicate fabricației aditive pot fi identificate diverse tipologii de structuri modulare propuse pentru a fi realizate prin imprimare 3D. În cadrul prezentei cercetări au fost analizate și clasificate astfel de structuri, care au fost grupate în două categorii principale, în funcție de principiul lor constructiv: structuri deschise, prevăzute cu sisteme de conectare și detașare, și structuri închise, de tip zale. Această clasificare permite o analiză comparativă a comportamentului mecanic și funcțional al diferitelor soluții modulare ce pot fi utilizate în contexte de design sustenabil.

Modelele originale au fost analizate din perspectiva tipului de modul, a geometriei elementelor, a mecanismului de conectare, a gradului de articulare, a posibilității de deformare și a potențialului de adaptare pentru testare experimentală. Structurile analizate au fost grupate în două categorii principale, în funcție de principiul constructiv: structuri modulare deschise, prevăzute cu sisteme de conectare și detașare, și structuri modulare închise de tip zale, bazate pe articulare și mobilitate relativă între elemente. Această clasificare permite compararea modului în care tipul de conexiune, geometria modulului, gradul de articulare și organizarea ansamblului influențează comportamentul mecanic și funcțional al soluțiilor modulare analizate.

Selecția structurilor a urmărit criterii legate de relevanța pentru designul vestimentar modular și sustenabil, posibilitatea realizării prin imprimare 3D, existența unor mecanisme de conectare, detașare sau articulare, potențialul de flexibilitate și conformare la suprafețe complexe, precum și posibilitatea adaptării geometriei în vederea realizării epruvetelor necesare testării experimentale. Pe baza acestor criterii au fost selectate 19 structuri modulare, grupate în două tipologii principale: 6 structuri modulare deschise, prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, și 13 structuri modulare închise de tip zale.

Criteriile care au stat la baza selecției structurilor modulare analizate sunt prezentate sintetic în Tabelul 4.1. Acestea au fost formulate pentru a asigura relevanța modelelor selectate în raport cu obiectivele cercetării, posibilitatea adaptării lor pentru testare experimentală și respectarea condițiilor de utilizare prevăzute de licențele asociate.

Referitor la regimul de licențiere și utilizarea legală a structurilor analizate, structurile modulare analizate în prezenta teză sunt preluate din surse online care specifică în mod explicit utilizarea sub licența Creative Commons Attribution–NonCommercial–ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0). Această licență permite utilizarea, reproducerea, distribuirea și

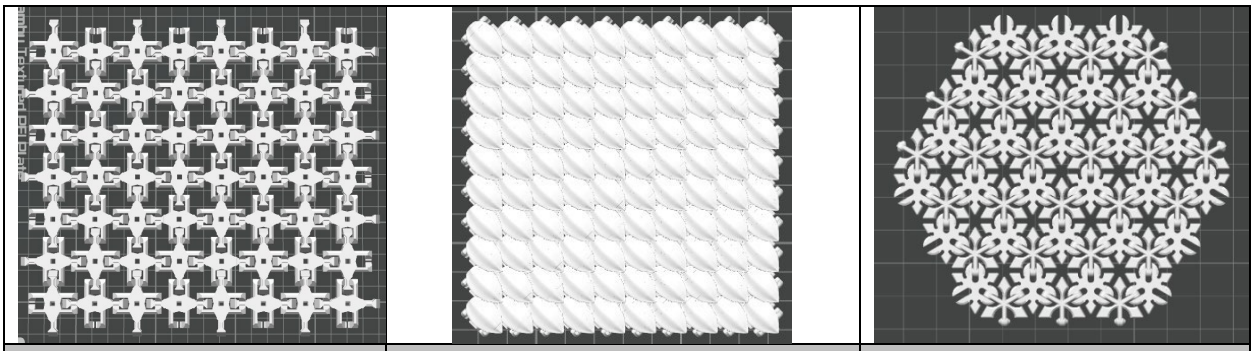
adaptarea materialelor, cu respectarea condițiilor de atribuire, utilizare necomercială și distribuire în aceleași condiții a eventualelor lucrări derivate. În contextul prezentei cercetări doctorale, utilizarea acestor structuri are exclusiv scop academic, analitic și științific, fără finalitate comercială. Imaginile, schemele sau modelele sunt utilizate pentru analiză critică, evaluare comparativă și studiu al comportamentului fizico-mecanic, iar sursele originale sunt citate explicit în conformitate cu normele academice de referențiere.

Tabelul 4.1. Criterii de selecție și constituire a corpusului experimental

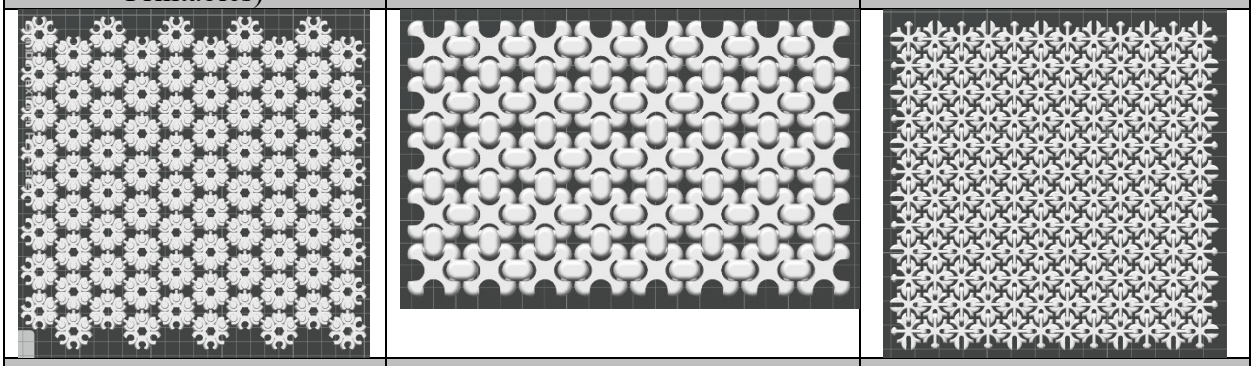
Criteriu de selecție	Justificare în cadrul cercetării
Disponibilitatea publică a modelului digital	A permis accesul la geometrii modulare existente în comunitățile de fabricație aditivă și utilizarea lor ca repere constructive pentru analiză.
Regimul de licențiere compatibil cu utilizarea academică	Au fost selectate modele disponibile sub licențe care permit utilizarea, analiza și adaptarea în scop necomercial, cu respectarea condițiilor de atribuire.
Relevanța pentru designul vestimentar modular	Au fost vizate structuri care pot funcționa ca suprafețe flexibile, elemente articulabile, module conectabile sau sisteme cu potențial de integrare în produse vestimentare.
Existența unui principiu constructiv clar	Selecția a urmărit structuri cu mecanisme identificabile de clipsare, interblocare, articulare sau conectare/detașare, pentru a permite analiza comparativă.
Posibilitatea realizării prin imprimare 3D	Modelele selectate au fost compatibile cu procese de fabricație aditivă și au putut fi pregătite pentru imprimare și testare experimentală.
Diversitatea geometrică și funcțională	Au fost incluse structuri cu geometrii, grosimi, tipuri de module și mecanisme de îmbinare diferite, pentru a permite investigarea influenței arhitecturii asupra comportamentului mecanic.
Potențialul de flexibilitate și conformare	Au fost selectate structuri care pot genera suprafețe flexibile, capabile să se adapteze la deformări locale sau la suprafețe complexe.
Potențialul de reconfigurare, reparare sau reutilizare	Criteriul este relevant pentru analiza modularității în raport cu principiile designului sustenabil, ale reparabilității și ale circularității.
Adaptabilitatea pentru epruvete experimentale	Au fost avute în vedere structuri care puteau fi scalate, decupate, configurate sau adaptate dimensional pentru realizarea probelor necesare testelor fizico-mecanice.

4.3.1. Structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare

Structurile modulare deschise (Figura 4.1) analizate în cadrul cercetării sunt prevăzute cu sisteme de conectare/detașare și sunt caracterizate prin posibilitatea reconfigurării și intervenției locale asupra modulelor. Această categorie include următoarele structuri: „Chainmail 3D Printed Fabric”, „Dragon Scales Chainmail”, „Hexagonal Fabric”, „3D Printed Fabric/Armor”, „FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh” și „Flat fabric”.



Structura modulară "Chainmail 3D Printed Fabric" (k.makesstuff, Printables)	Structura modulară „Dragon Scales Chainmail" (DotCom Artwork, Printables)	Structura modulară „ Hexagonal Fabric" (tuxcat, Thingiverse)



Structura modulară „3D Printed Fabric/ Armour" (drewrokebythomas, Cults)	Structura modulară „ FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh" (neobobkrause, Thingiverse)	Structura modulară „ Flat fabric (3mm)" (jbergmans, Thingiverse)

Figura 4.1. Structurile modulare deschise prevăzute cu sistem de conectare/ detașare

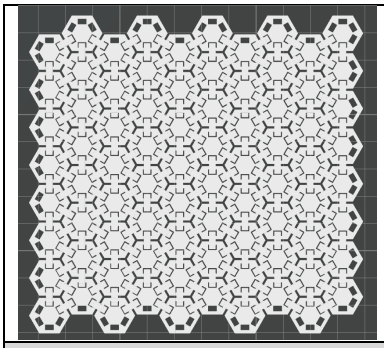
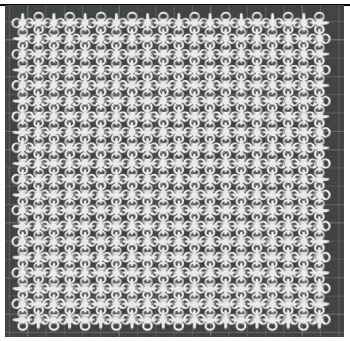
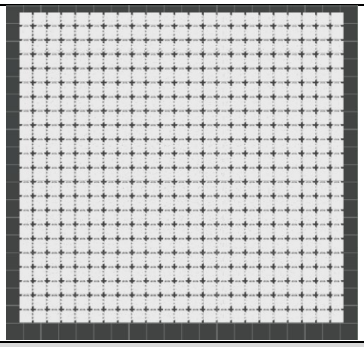
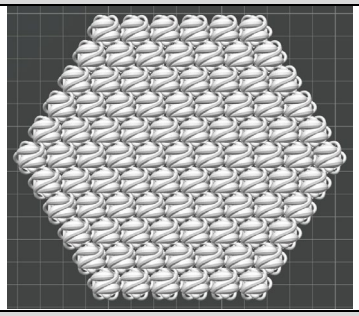
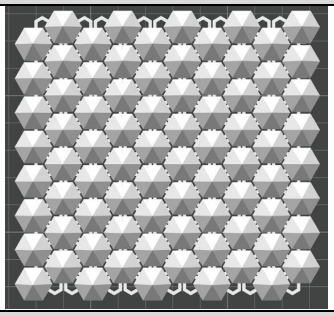
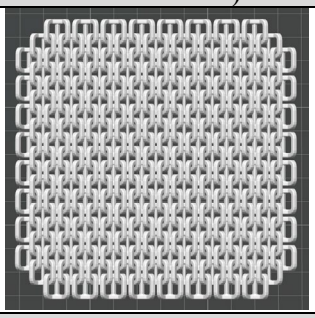
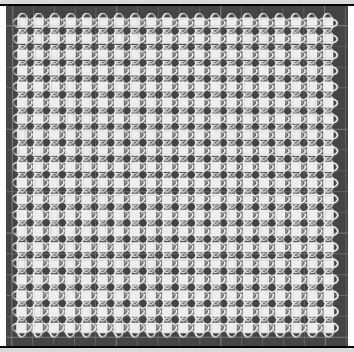
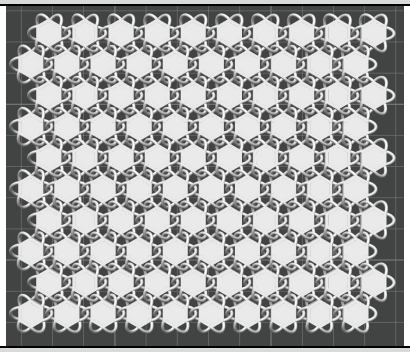
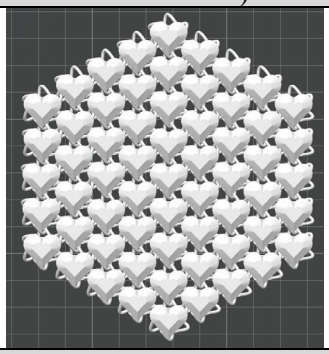
În cadrul studiului experimental, aceste structuri au fost utilizate ca referințe geometrice, fiind ulterior supuse unei scalări uniforme pentru adaptarea la dimensiunile epruvetelor de testare, cu păstrarea topologiei și a mecanismului de conectare.

4.3.2. Structuri modulare închise de tip zale

Structurile modulare închise de tip zale (Figura 4.2) se disting de structurile deschise prin faptul că nu sunt concepute pentru conectare și detașare locală după imprimare, ci funcționează ca rețele articulate continue, în care flexibilitatea și adaptabilitatea rezultă din geometria și articularea elementelor interconectate. Această categorie include 13 structuri: „Extra Supple HexMaille Fabric", „Fabric 19 – Extreme Flexibility", „Fabric Fidget – Large", „3D Printed Crochet Fabric", „Spiky HexMaille Fabric", „Chainmail – Fabric of Thyme", „Fabric fun 2", „Fabric fun 3", „Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)", „Fabric Fidget/Coaster", „Fabric Fidget", „NASA Fabric – X" și „Cyberpunk Armor".

În cazul acestor structuri, mobilitatea ansamblului este determinată de articulațiile dintre module și de mobilitatea relativă a elementelor componente. Spre deosebire de structurile modulare deschise, bazate pe sisteme de conectare/detașare, structurile închise funcționează ca

rețele articulate continue, în care solicitările sunt distribuite prin module și prin elementele de legătură. Prin urmare, analiza lor permite compararea unor principii constructive diferite: pe de o parte, sisteme modulare deschise, reconfigurabile, bazate pe clipsare/detașare, iar pe de altă parte, structuri închise, articulate, cu comportament de tip chainmail.

		
Structura modulară „Extra Supple HexMaille Fabric” (LoboCNC, Makerworld)	Structura modulară „Fabric 19 – Extreme Flexibility” (Triple G Workshop, Makerworld)	Structura modulară „ Fabric Fidget - Large” (Type1Printing, Makerworld)
		
Structura modulară „3d Printed Crochet Fabric” (VRsculpts, Makerworld)	Structura modulară „ Spiky HexMaille Fabric” (Remixed by LoboCNC)	Structura modulară „Chainmail – Fabric of Thyme” (3DCaseFactory), Makerworld)
		
Structura modulară „Fabric fun 2” (WardCons), Makerworld)	Structura modulară „Fabric fun 3” (WardCons), Makerworld)	Structura modulară „Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)” (Sairae), Makerworld)

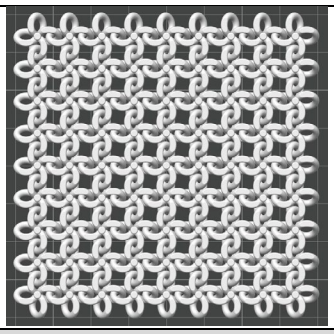
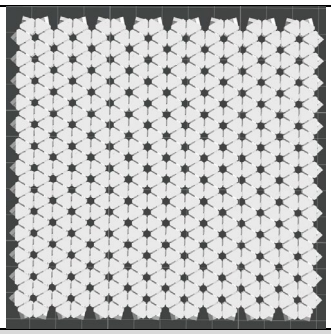
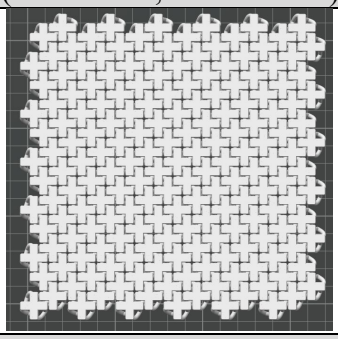
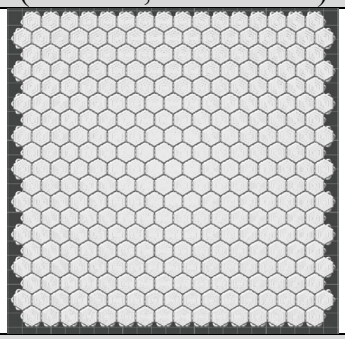
	
Structura modulară „Fabric Fidget/ Coaster” (Nature Hut, Makerworld)	Structura modulară „Fabric Fidget” (Hamstah, Makerworld)
	
NASA Fabric - X” (FCore Design, Makerworld)	Structura modulară „Cyberpunk Armor” (protomota, Makerworld)

Figura 4.2. Structurile modulare închise de tip zale

4.4. Concluzii

Capitolul IV a avut rolul de a fundamenta teoretic și aplicativ utilizarea tehnologiilor de imprimare 3D în realizarea structurilor modulare destinate designului vestimentar, clarificând atât principiile fabricării aditive, cât și particularitățile tehnologiilor relevante în contextul modei.

Analiza principiilor fabricării aditive a evidențiat avantajele specifice acestor tehnologii: libertatea geometrică, posibilitatea integrării funcționale a elementelor de îmbinare, controlul parametric al densității și flexibilității, precum și potențialul de personalizare și producție la cerere. În același timp, au fost subliniate limitările asociate proceselor FDM și SLS, precum anisotropia mecanică, influența parametrilor de printare asupra comportamentului structural și constrângerile legate de materialele disponibile.

În contextul aplicării în modă, imprimarea 3D s-a dovedit un instrument capabil să genereze structuri de tip textil și sisteme modulare cu funcționalități integrate, depășind logica construcției textilelor convenționale. Au fost prezentate două tipologii structurale distincte, cu implicații diferite asupra comportamentului mecanic și a potențialului de utilizare vestimentară: 6 structuri modulare deschise, prevăzute cu sistem de îmbinare/detașare, caracterizate prin posibilitatea reconfigurării și intervenției locale asupra modulelor, și 13 structuri modulare închise de tip zale, în care flexibilitatea și adaptabilitatea rezultă din geometria și articularea elementelor interconectate.

Diferențele morfologice și constructive dintre cele două categorii sugerează ipoteze distincte privind comportamentul lor fizico-mecanic: structurile deschise pot prezenta zone critice concentrate în elementele de conectare, în timp ce structurile închise distribuie solicitările prin mecanism de articulare continuă. De asemenea, tipologia conexiunilor, grosimea elementelor,

geometria modulelor și orientarea straturilor de imprimare sunt factori susceptibili de a influența rezistența la tracțiune, alungirea și modulul de elasticitate.

Prin urmare, Capitolul IV a stabilit cadrul conceptual și constructiv necesar pentru etapa experimentală, definind obiectul cercetării aplicative: cele 19 structuri modulare imprimate 3D, care urmează a fi supuse caracterizării fizico-mecanice.

CAPITOLUL V – STUDIUL COMPORTAMENTULUI FIZICO-MECANIC AL STRUCTURILOR MODULARE IMPRIMATE 3D

În urma fundamentării teoretice și constructive prezentate în Capitolul IV, prezentul capitol marchează tranziția către etapa experimentală a cercetării, având ca obiectiv evaluarea comportamentului fizico-mecanic al structurilor modulare imprimate 3D. Analiza performanței mecanice reprezintă o etapă esențială în validarea aplicabilității acestor structuri în designul vestimentar, întrucât proprietățile de rezistență, deformabilitate și rigiditate influențează direct confortul, durabilitatea și funcționalitatea produsului final.

În acest context, cele 19 tipologii structurale imprimate 3D, respectiv 6 structuri modulare deschise cu sistem de conectare/detașare și 13 structuri modulare închise de tip zale, sunt investigate prin testări experimentale la tracțiune, utilizând dinamometrul, în vederea determinării parametrilor mecanici relevanți: forța maximă, rezistența la rupere raportată la lățime, alungirea și modulul lui Young. Analiza individuală și comparativă a rezultatelor urmărește identificarea corelațiilor dintre morfologia structurală, tipul de conexiune, materialul utilizat și comportamentul mecanic, contribuind astfel la fundamentarea științifică a utilizării structurilor modulare imprimate 3D în aplicații vestimentare sustenabile.

5.1. Pregătirea epruvetelor în standardul „dog-bone”

Alegerea standardului de epruvetă de tip „dog-bone”, conform ASTM D638 și ISO 527, pentru realizarea și testarea structurilor modulare imprimate 3D din filamente PLA, TPU și PETG a fost determinată de necesitatea obținerii unor rezultate mecanice comparabile, reproductibile și relevante pentru evaluarea aplicabilității acestor structuri în proiectarea și realizarea unor produse vestimentare. Geometria standardizată permite o distribuție controlată a solicitărilor uniaxiale în zona de măsurare, facilitând determinarea parametrilor mecanici fundamentali — forța maximă, rezistența la rupere sau desprindere, alungirea și modulul lui Young — și compararea acestora între materiale cu comportamente mecanice distincte.

Utilizarea acestui standard a oferit un cadru coerent pentru analizarea performanței a două tipuri de arhitecturi modulare: structuri deschise, prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, și structuri modulare închise de tip zale. Modelele digitale ale structurilor au fost adaptate dimensional, cu păstrarea topologiei modulare și a mecanismelor de conectare sau articulare, astfel încât să poată fi încadrate în geometria epruvetelor necesare testării mecanice.

Forma și dimensiunile epruvetei de tip „dog-bone” sunt prezentate în Figura 5.1.

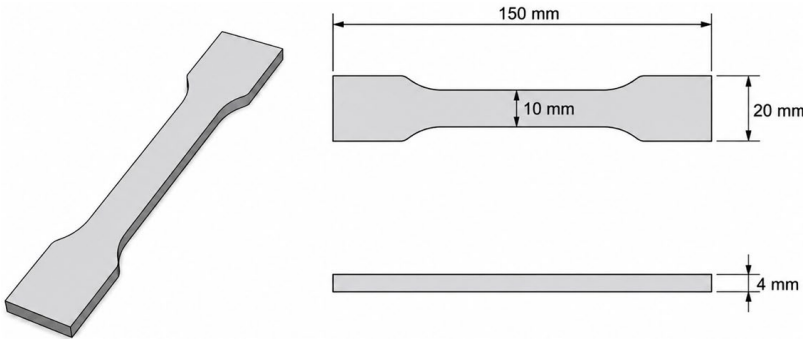


Figura 5.1. Forma și dimensiunile epruvetei de tip “dog-bone”

Epruvetele au fost fabricate prin tehnologie aditivă FFF/FDM, utilizând imprimante Bambu Lab P1S și P1P, cu duză de 0,4 mm. Parametrii de imprimare au fost menținuți constanți pentru toate probele, pentru a reduce influența variabilelor de proces asupra rezultatelor mecanice. Fluxul de lucru adoptat pentru pregătirea epruvetelor este prezentat în Figura 5.2.

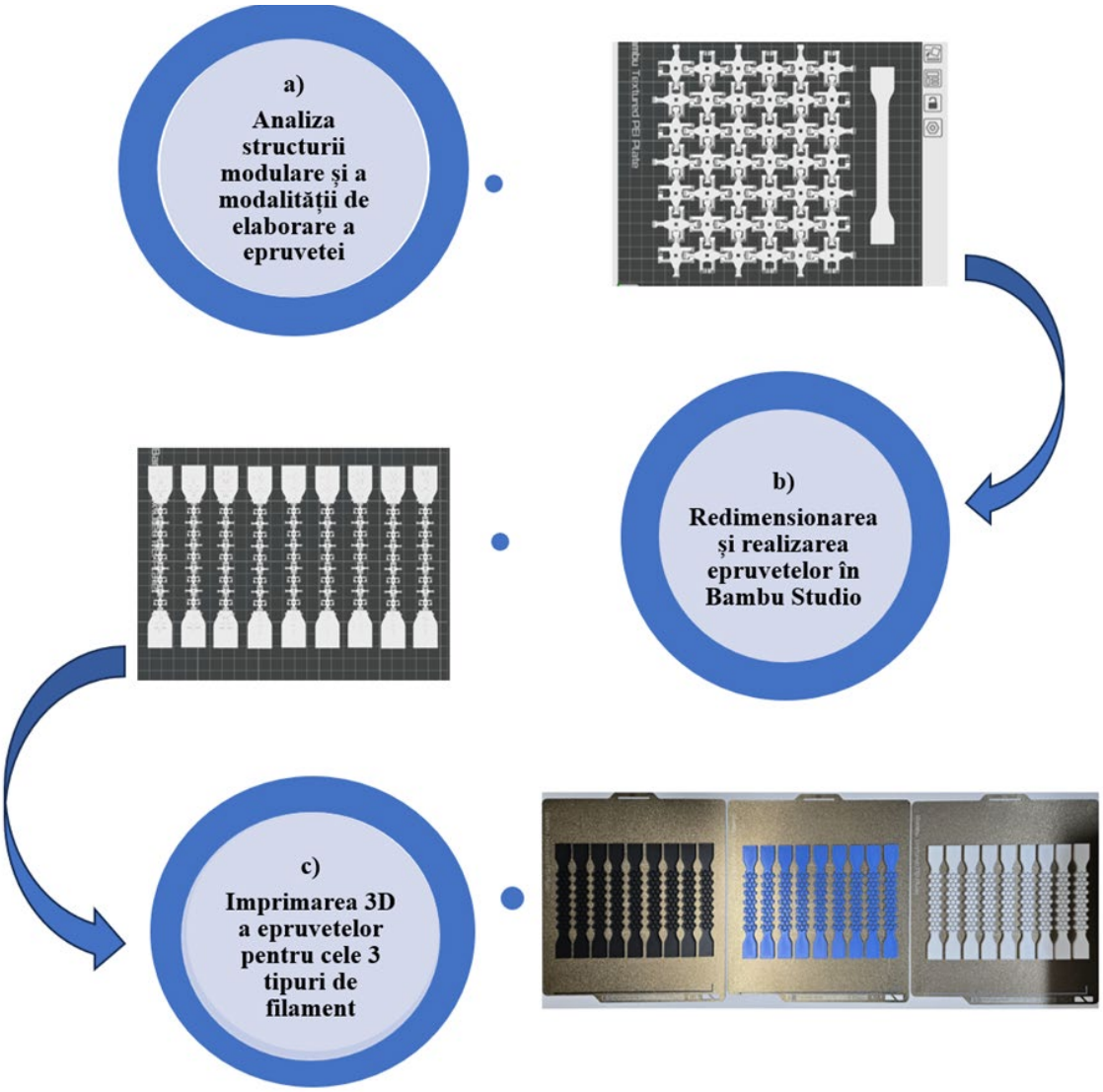


Figura 5.2. Fluxul de lucru adoptat pentru pregătirea epruvetelor destinate testelor mecanice: (a) analizarea structurilor modulare și a mecanismelor de îmbinare, în vederea stabilirii modului de integrare în geometria epruvetei; (b) redimensionarea uniformă și adaptarea conturului epruvetelor în mediul Bambu Studio, cu păstrarea topologiei și a mecanismelor de conectare; (c) imprimarea 3D a epruvetelor prin tehnologie FDM, utilizând trei tipuri de filament (PLA, TPU și PETG).

5.2. Testarea epruvetelor realizate în standardul „dog-bone”

Testarea epruvetelor realizate în standard „dog-bone” a urmărit evaluarea comportamentului mecanic al structurilor modulare imprimate 3D în condiții de solicitare uniaxială. Pentru fiecare structură și fiecare material au fost realizate câte nouă epruvete, ceea ce a permis obținerea unei baze experimentale ample și comparabile. Testele au urmărit determinarea unor parametri relevanți pentru evaluarea comportamentului mecanic: forța maximă, rezistența la rupere raportată la lățime, alungirea și modulul lui Young.

5.2.1. Structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare

Structurile modulare deschise analizate — „Chainmail 3D Printed Fabric”, „Dragon Scales Chainmail”, „Hexagonal Fabric”, „3D Printed Fabric/Armor”, „FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh” și „Flat fabric” — se caracterizează prin prezența unor sisteme discrete de îmbinare, care permit conectarea, detașarea și, în anumite condiții, reconfigurarea ansamblului. Din acest motiv, comportamentul lor mecanic nu este determinat exclusiv de materialul imprimat, ci și de stabilitatea mecanismelor de prindere, de modul în care modulele se pot roti, repoziționa sau desprinde și de capacitatea îmbinărilor de a transmite solicitările în timpul tracțiunii.

În cazul structurilor deschise, cedarea nu s-a produs întotdeauna prin ruperea materialului propriu-zis, ci frecvent prin declipsarea, deschiderea sau deteriorarea sistemului de conectare/detașare. Această particularitate explică, în multe cazuri, valorile mai reduse ale forței maxime și ale rezistenței la rupere raportate la lățime, comparativ cu unele structuri închise de tip zale. Totuși, aceste structuri prezintă avantaje importante din perspectiva designului vestimentar modular, deoarece permit montajul, demontajul, înlocuirea locală a modulelor, repararea și reconfigurarea suprafeței.

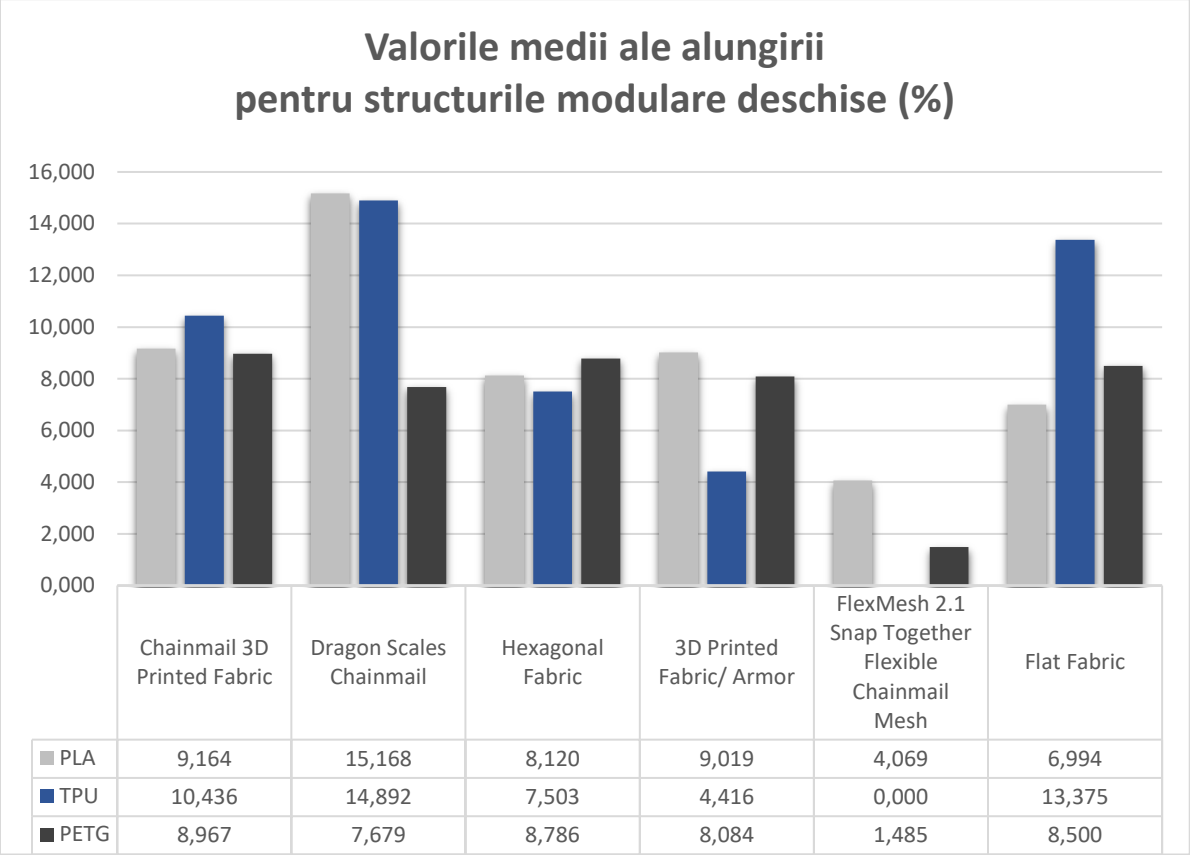
Alungirea structurilor deschise trebuie interpretată cu precauție, deoarece deformarea globală nu provine doar din deformarea elastică a filamentului, ci și din reorientarea modulelor, închiderea jocurilor dintre îmbinări, deplasarea locală a elementelor și, în unele cazuri, declipsarea progresivă a sistemului de conectare. Acest comportament confirmă faptul că structurile modulare deschise nu se comportă ca materiale omogene, ci ca sisteme arhitecturate, în care răspunsul mecanic depinde de interacțiunea dintre material, geometrie și mecanismul de conectare.

Analiza comparativă a alungirii

Diagrama 5.1 prezintă valorile medii ale alungirii la rupere pentru cele șase structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, realizate din PLA, TPU și PETG. Din analiza comparativă se observă că alungirea nu este controlată exclusiv de tipul filamentului, ci într-o măsură semnificativă de geometria structurii, de modul de interconectare dintre module și de libertatea de reorientare a acestora în timpul solicitării mecanice.

Analiza comparativă a alungirii evidențiază faptul că deformabilitatea structurilor modulare deschise nu depinde doar de flexibilitatea filamentului, ci de compatibilitatea dintre material și arhitectura modulară. Structura „Dragon Scales Chainmail” prezintă cele mai ridicate valori ale alungirii pentru PLA și TPU, „Flat Fabric” valorifică cel mai bine deformabilitatea TPU, iar „Chainmail 3D Printed Fabric” și „Hexagonal Fabric” au un comportament mai echilibrat între cele trei materiale. În schimb, „FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh” prezintă o capacitate redusă de deformare și o stabilitate insuficientă în varianta TPU. Aceste rezultate

confirmă faptul că alungirea maximă nu este obținută automat prin utilizarea unui material mai flexibil, ci prin asocierea acestuia cu o geometrie modulară care permite reorientarea, redistribuirea solicitărilor și menținerea integrității structurale în timpul tracțiunii.



	Chainmail 3D Printed Fabric	Dragon Scales Chainmail	Hexagonal Fabric	3D Printed Fabric/ Armor	FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh	Flat Fabric
PLA	9,164	15,168	8,120	9,019	4,069	6,994
TPU	10,436	14,892	7,503	4,416	0,000	13,375
PETG	8,967	7,679	8,786	8,084	1,485	8,500

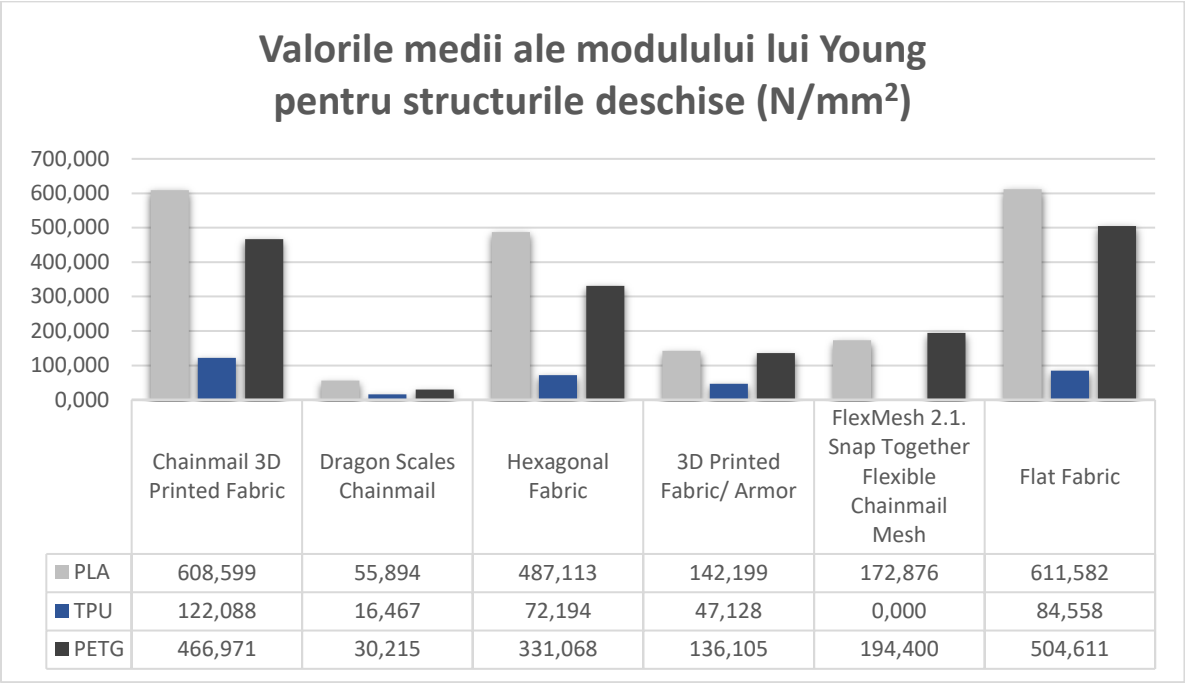
Diagrama 5.1. Valorile medii ale parametrului alungire pentru fiecare dintre filamente (PLA, TPU, PETG) pentru structurile detașabile (“Chainmail 3D Printed Fabric”, „Dragon Scales Chainmail”, “Hexagonal Fabric”, „3D Printed Fabric/ Armor”, „FlexMesh 2.1. Snap Together Flexible Chainmail Mesh”, „Flat Fabric”)

Analiza comparativă a modulului lui Young

Diagrama 5.2 prezintă valorile medii ale modulului lui Young pentru cele șase structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, realizate din PLA, TPU și PETG. Acest parametru oferă informații privind rigiditatea globală a ansamblului modular și permite evaluarea modului în care materialul, geometria structurii și sistemul de îmbinare influențează rezistența la deformare în etapa inițială a solicitării mecanice.

În ansamblu, analiza comparativă a modulului lui Young evidențiază faptul că rigiditatea structurilor modulare deschise este determinată de interacțiunea dintre proprietățile filamentului și arhitectura structurală. PLA generează, în general, cele mai ridicate valori ale rigidității, urmat de PETG, în timp ce TPU conduce la valori mai reduse, asociate cu o deformabilitate mai mare. Totuși, diferențele dintre structuri arată că materialul nu acționează independent de geometrie:

„Flat Fabric”, „Chainmail 3D Printed Fabric” și „Hexagonal Fabric” valorifică mai eficient rigiditatea PLA și PETG, în timp ce „Dragon Scales Chainmail” favorizează un comportament mai flexibil, cu valori reduse ale modulului pentru toate materialele. Aceste rezultate confirmă faptul că selecția unei structuri pentru aplicații vestimentare configurabile trebuie să țină cont nu doar de valoarea absolută a rigidității, ci și de echilibrul dintre stabilitate, deformabilitate și funcționalitatea sistemului de conectare/detașare.



	Chainmail 3D Printed Fabric	Dragon Scales Chainmail	Hexagonal Fabric	3D Printed Fabric/ Armor	FlexMesh 2.1. Snap Together Flexible Chainmail Mesh	Flat Fabric
PLA	608,599	55,894	487,113	142,199	172,876	611,582
TPU	122,088	16,467	72,194	47,128	0,000	84,558
PETG	466,971	30,215	331,068	136,105	194,400	504,611

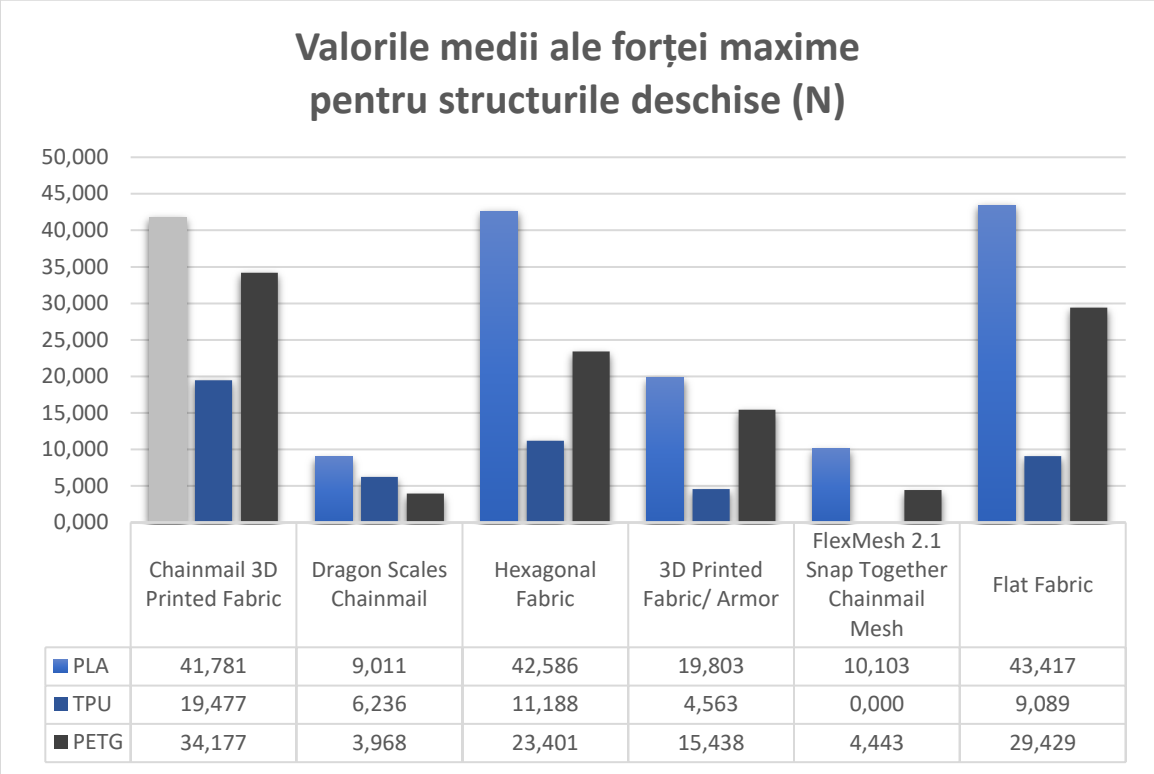
Diagrama 5.2. Valorile medii ale parametrului modulul lui Young pentru fiecare dintre filamente (PLA, TPU, PETG) pentru structurile detașabile (“Chainmail 3D Printed Fabric”, „Dragon Scales Chainmail”, “Hexagonal Fabric”, „3D Printed Fabric/ Armor”, „FlexMesh 2.1. Snap Together Flexible Chainmail Mesh”, „Flat Fabric”)

Analiza comparativă a forței maxime

Diagrama 5.3 prezintă valorile medii ale forței maxime pentru cele șase structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, realizate din PLA, TPU și PETG. Forța maximă reprezintă parametrul prin care poate fi evaluată capacitatea portantă globală a ansamblului modular înainte de cedare, desprindere sau pierderea stabilității sistemului de conectare. În cazul structurilor modulare deschise, interpretarea acestui parametru trebuie raportată atât la proprietățile materialului, cât și la geometria modulului și la modul de transmitere a solicitării prin sistemele de îmbinare.

În ansamblu, analiza comparativă a forței maxime evidențiază faptul că structurile „Flat Fabric”, „Hexagonal Fabric” și „Chainmail 3D Printed Fabric” prezintă cele mai bune rezultate din perspectiva capacității portante, în special în variantele realizate din PLA și PETG. „Dragon Scales Chainmail” se remarcă mai mult prin deformabilitate decât prin rezistență, iar „FlexMesh

2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh” prezintă limitări evidente ale stabilității structurale. Rezultatele confirmă că forța maximă este determinată de interacțiunea dintre material, geometrie și sistemul de conectare/detașare, iar selecția unei structuri pentru aplicații vestimentare configurabile trebuie să urmărească echilibrul dintre capacitatea portantă, deformabilitate și posibilitatea de reconfigurare.



	Chainmail 3D Printed Fabric	Dragon Scales Chainmail	Hexagonal Fabric	3D Printed Fabric/ Armor	FlexMesh 2.1 Snap Together Chainmail Mesh	Flat Fabric
PLA	41,781	9,011	42,586	19,803	10,103	43,417
TPU	19,477	6,236	11,188	4,563	0,000	9,089
PETG	34,177	3,968	23,401	15,438	4,443	29,429

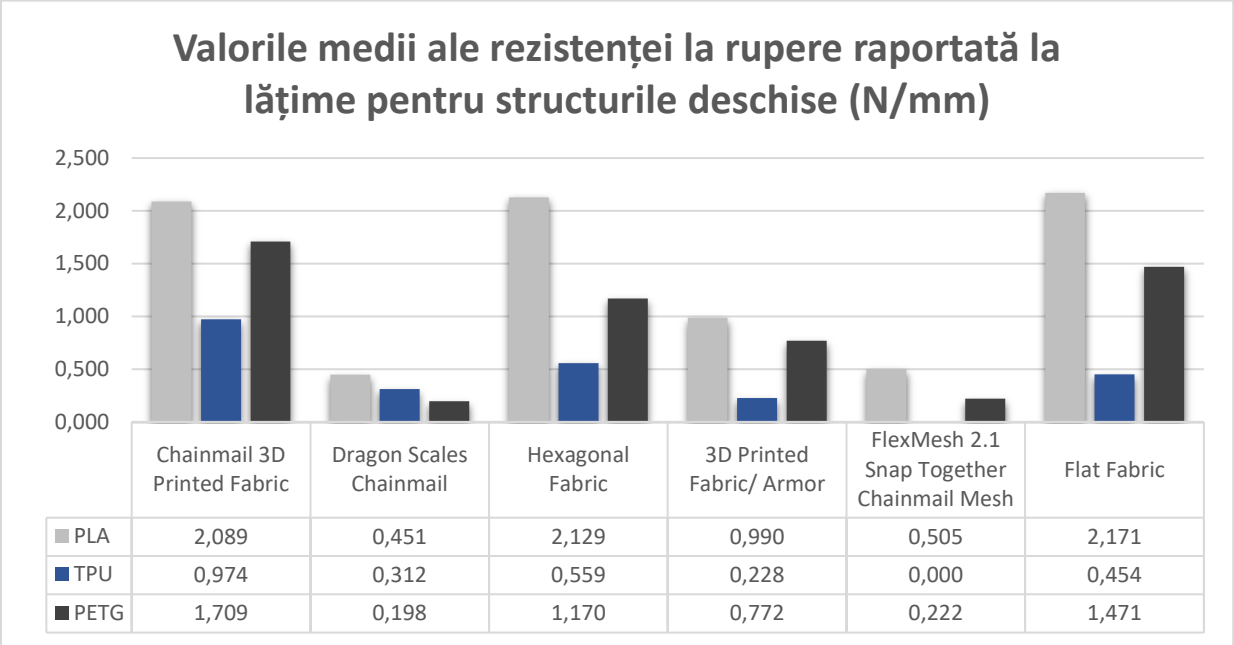
Diagrama 5.3. Valorile medii ale parametrului Forța maximă pentru fiecare dintre filamente (PLA, TPU, PETG) pentru structurile detașabile (“Chainmail 3D Printed Fabric”, „Dragon Scales Chainmail”, “Hexagonal Fabric”, „3D Printed Fabric/ Armor”, „FlexMesh 2.1. Snap Together Flexible Chainmail Mesh”, „Flat Fabric”)

Analiza comparativă a rezistenței la rupere raportate la lățime

Diagrama 5.4 prezintă valorile medii ale rezistenței la rupere raportate la lățime pentru cele șase structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, realizate din PLA, TPU și PETG. Acest parametru permite raportarea capacității portante a ansamblului modular la lățimea epruvetei și oferă o imagine mai clară asupra comportamentului comparativ al structurilor analizate. În cazul structurilor modulare deschise, rezistența la rupere raportată la lățime trebuie interpretată în relație cu modul de cedare al sistemului, deoarece epruvetele nu se comportă ca materiale omogene, ci ca ansambluri formate din module și zone de conectare.

În ansamblu, analiza rezistenței la rupere raportate la lățime confirmă tendințele observate la forța maximă. Structurile „Flat Fabric”, „Hexagonal Fabric” și „Chainmail 3D Printed Fabric” prezintă cele mai bune rezultate, în special în variantele realizate din PLA și PETG, ceea ce indică o capacitate mai bună de distribuire a solicitărilor prin ansamblul modular. În schimb, „Dragon Scales Chainmail” și „FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh” prezintă valori

reduse, sugerând o capacitate portantă limitată, chiar dacă unele dintre aceste structuri pot oferi o deformabilitate mai mare. Rezultatele confirmă că rezistența la rupere raportată la lățime este influențată simultan de material, geometrie și stabilitatea sistemului de conectare/detașare, iar selecția unei structuri pentru aplicații vestimentare configurabile trebuie să urmărească echilibrul dintre rezistență, flexibilitate și funcționalitatea îmbinărilor.



	Chainmail 3D Printed Fabric	Dragon Scales Chainmail	Hexagonal Fabric	3D Printed Fabric/ Armor	FlexMesh 2.1 Snap Together Chainmail Mesh	Flat Fabric
PLA	2,089	0,451	2,129	0,990	0,505	2,171
TPU	0,974	0,312	0,559	0,228	0,000	0,454
PETG	1,709	0,198	1,170	0,772	0,222	1,471

Diagrama 5.4. Valorile medii ale parametrului rezistența la rupere raportată la lățime pentru fiecare dintre filamente (PLA, TPU, PETG) pentru structurile detașabile (“Chainmail 3D Printed Fabric”, „Dragon Scales Chainmail”, “Hexagonal Fabric”, „3D Printed Fabric/ Armor”, „FlexMesh 2.1. Snap Together Flexible Chainmail Mesh”, „Flat Fabric”)

Analiza comparativă a structurilor modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare

Analiza comparativă a celor șase structuri modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare evidențiază faptul că performanța acestora nu poate fi apreciată printr-un singur parametru mecanic, ci trebuie interpretată prin corelarea forței maxime, rezistenței la rupere raportate la lățime, alungirii și modulului lui Young. În cazul acestor structuri, comportamentul mecanic este determinat de interacțiunea dintre material, geometria modulului, configurația sistemului de îmbinare și modul de transmitere a solicitărilor între componente. Prin urmare, selecția unei structuri pentru aplicații vestimentare configurabile trebuie să țină cont nu doar de valorile mecanice maxime, ci și de stabilitatea sistemului de conectare/detașare, de modul de cedare și de posibilitatea utilizării repetate.

În ansamblu, analiza comparativă arată că structurile modulare deschise nu pot fi recomandate exclusiv pe baza valorilor ridicate ale forței maxime sau ale modulului lui Young. Pentru contextul vestimentar, este esențial ca structura să combine rezistența mecanică, deformabilitatea, stabilitatea îmbinărilor și capacitatea de clipsare/declipsare fără deteriorare. Din această perspectivă, „Flat Fabric” prezintă cel mai bun echilibru între performanța mecanică și

viabilitatea funcțională, fiind cea mai potrivită pentru transpunerea într-un ansamblu vestimentar configurabil. „Hexagonal Fabric” reprezintă o alternativă viabilă pentru aplicații semi-rigide, iar „FlexMesh 2.1” poate fi utilizată doar în zone cu solicitare redusă sau cu rol preponderent decorativ. Structurile „Chainmail 3D Printed Fabric”, „Dragon Scales Chainmail” și „3D Printed Fabric/Armor” prezintă potențial formal și funcțional, dar necesită optimizarea sistemelor de conectare/detașare pentru a putea fi recomandate în aplicații vestimentare de durată.

5.2.2. Structuri modulare închise de tip zale

Structurile modulare închise de tip zale analizate au fost: „Extra Supple HexMaille Fabric”, „Fabric 19 – Extreme Flexibility”, „Fabric Fidget – Large”, „3D Printed Crochet Fabric”, „Spiky HexMaille Fabric”, „Chainmail – Fabric of Thyme”, „Fabric fun 2”, „Fabric fun 3”, „Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)”, „Fabric Fidget/Coaster”, „Fabric Fidget”, „NASA Fabric – X” și „Cyberpunk Armor”. Spre deosebire de structurile deschise, acestea nu sunt concepute pentru reconfigurare sau reparare prin detașarea modulelor individuale, mobilitatea lor rezultând exclusiv din articularea permanentă a elementelor.

Rezultatele obținute pentru structurile închise de tip zale au evidențiat diferențe importante între geometrii și materiale. Unele structuri au prezentat valori ridicate ale forței maxime, ale rezistenței la rupere raportate la lățime și ale modulului lui Young, indicând o capacitate portantă ridicată și un comportament structural pronunțat. În alte cazuri, valorile mai ridicate ale alungirii, mai ales pentru TPU, au indicat o capacitate superioară de adaptare la mișcare și redistribuire a solicitărilor.

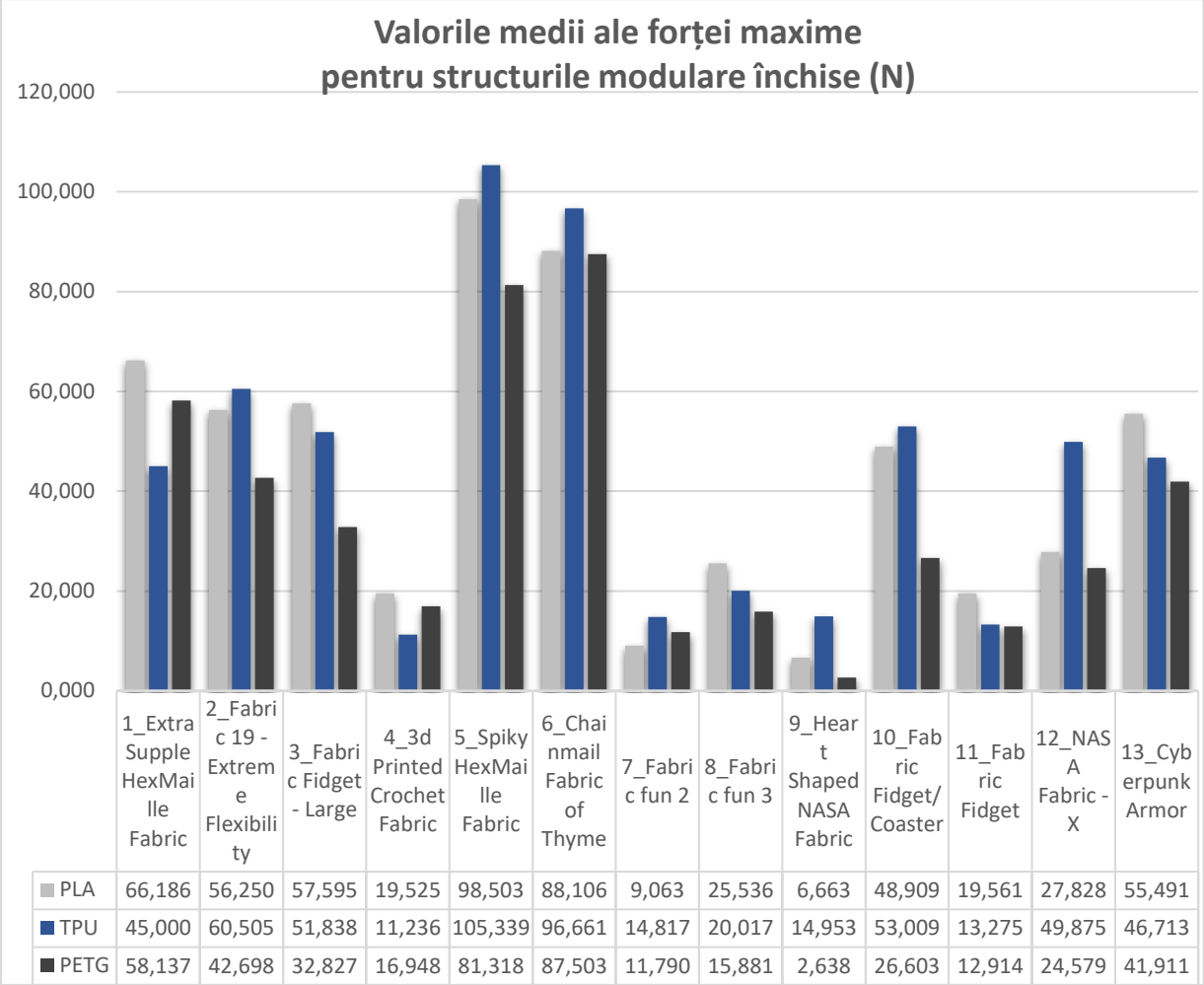
În general, PLA a condus la valori mai ridicate ale rigidității și ale capacității portante, TPU a favorizat deformabilitatea și mobilitatea, iar PETG s-a poziționat intermediar, combinând o rezistență relativ ridicată cu o anumită capacitate de deformare. Pentru aplicații vestimentare, cele mai adecvate structuri sunt cele care asigură un echilibru între rigiditate suficientă pentru stabilitate și flexibilitate suficientă pentru confort și adaptare la mișcare.

Analiza comparativă a forței maxime pentru structurile modulare închise de tip chainmail

Diagrama 5.24 prezintă valorile medii ale forței maxime pentru cele 13 structuri modulare închise de tip chainmail, realizate din PLA, TPU și PETG. Forța maximă permite evaluarea capacității portante globale a fiecărei structuri înainte de cedare și oferă un reper important pentru identificarea configurațiilor cu potențial de utilizare în aplicații vestimentare. În cazul structurilor închise, acest parametru trebuie interpretat în relație cu geometria ansamblului, gradul de mobilitate dintre elemente, rigiditatea materialului și modul de transmitere a solicitării prin rețeaua modulară.

În ansamblu, analiza comparativă a forței maxime evidențiază trei categorii de structuri. Prima categorie include structurile cu capacitate portantă ridicată, precum „Spiky HexMaille Fabric” și „Chainmail – Fabric of Thyme”, adecvate pentru aplicații structurale, protective sau pentru suprafețe vestimentare care necesită rezistență mecanică. A doua categorie include structuri cu echilibru între flexibilitate și rezistență, precum „Fabric 19 – Extreme Flexibility”, „Fabric Fidget / Coaster”, „NASA Fabric – X” și, în anumite variante, „Fabric Fidget – Large”, care prezintă potențial pentru zone de mobilitate și suprafețe purtabile flexibile, mai ales în variantele TPU. A treia categorie include structuri cu valori reduse ale forței maxime, precum „Heart Shaped

NASA Fabric (Heart Armor)", „Fabric Fun 2", „Fabric Fun 3", „3D Printed Crochet Fabric" și „Fabric Fidget", care sunt mai potrivite pentru aplicații decorative, inserții, accesorii sau zone cu solicitare redusă.



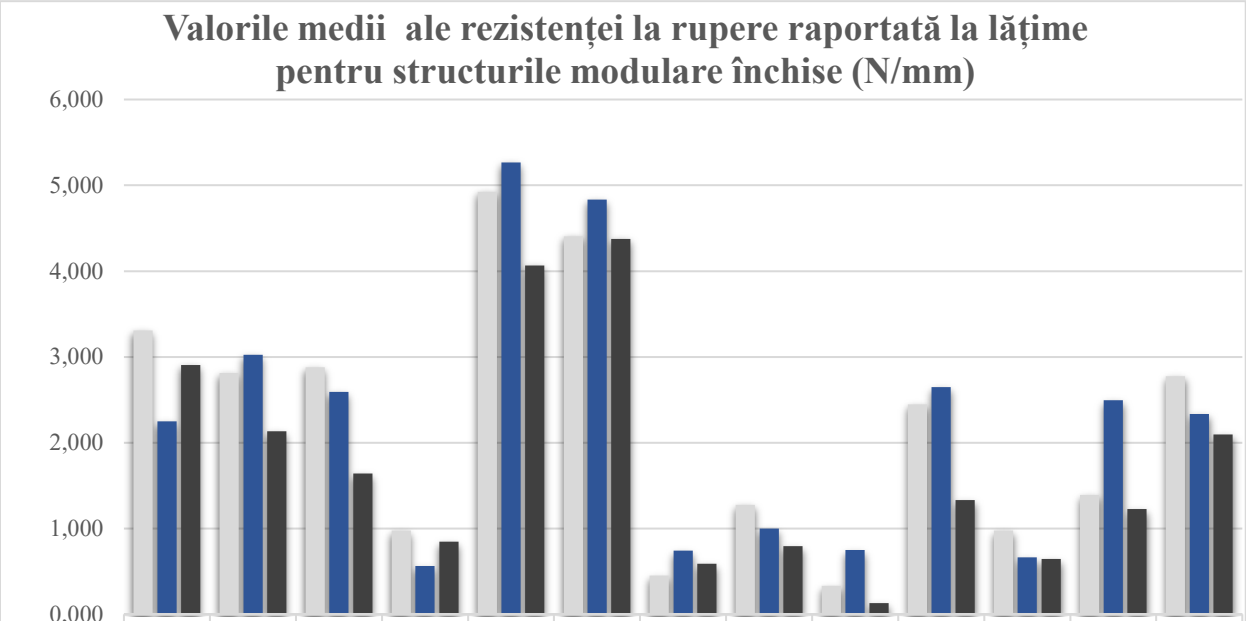
	1_Extra Supple HexMaille Fabric	2_Fabric 19 - Extreme Flexibility	3_Fabric Fidget - Large	4_3d Printed Crochet Fabric	5_Spiky HexMaille Fabric	6_Chainmail Fabric of Thyme	7_Fabric fun 2	8_Fabric fun 3	9_Heart Shaped NASA Fabric	10_Fabric Fidget/ Coaster	11_Fabric Fidget	12_NASA Fabric - X	13_Cyberpunk Armor
PLA	66,186	56,250	57,595	19,525	98,503	88,106	9,063	25,536	6,663	48,909	19,561	27,828	55,491
TPU	45,000	60,505	51,838	11,236	105,339	96,661	14,817	20,017	14,953	53,009	13,275	49,875	46,713
PETG	58,137	42,698	32,827	16,948	81,318	87,503	11,790	15,881	2,638	26,603	12,914	24,579	41,911

Diagrama 5.5. Valorile medii ale parametrului Forța maximă pentru fiecare dintre filamente (PLA, TPU, PETG) pentru structurile închise de tip chainmail (1. "Extra Supple HexMaille Fabric", 2. „Fabric 19 – Extreme Flexibility", 3. "Fabric Fidget - Large", 4. „3d Printed Crochet Fabric", 5, „Spiky HexMaille Fabric", 6. „Chainmail – Fabric of Thyme", 7. "Fabric fun 2", 8. "Fabric fun 3", 9. "Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)", 10. "Fabric Fidget/ Coaster", 11. "Fabric Fidget", 12. "NASA Fabric X", 13. "Cyberpunk Armor")

În ansamblu, rezultatele prezentate în diagrama 5.5 confirmă faptul că optimizarea performanței mecanice a structurilor chainmail printate 3D nu poate fi realizată exclusiv prin alegerea filamentului, ci necesită o abordare integrată care să includă proiectarea geometrică, controlul toleranțelor și parametrii de imprimare. O direcție clară de îmbunătățire este utilizarea duzelor de diametru mai mic și a strategiilor de printare orientate spre conservarea spațiilor funcționale dintre module, pentru a menține echilibrul între rezistență și comportament textil autentic.

Analiza comparativă a rezistenței la rupere raportate la lățime pentru structurile modulare închise de tip chainmail

Diagrama 5.6 prezintă valorile medii ale rezistenței la rupere raportate la lățime pentru cele 13 structuri modulare închise de tip chainmail, realizate din PLA, TPU și PETG. Acest parametru permite raportarea capacității portante la lățimea epruvetei și oferă o imagine comparativă asupra modului în care fiecare structură transmite solicitarea mecanică prin ansamblul modular. În cazul structurilor de tip zale, rezistența la rupere raportată la lățime trebuie interpretată nu doar în raport cu materialul, ci și cu geometria rețelei, gradul de interblocare a elementelor și capacitatea structurii de a redistribui solicitările înainte de cedare.



	Extra Supple HexMaille Fabric	Fabric 19 – Extreme Flexibility	Fabric Fidget - Large	3d Printed Crochet Fabric	Spiky HexMaille Fabric	Chainmail – Fabric of Thyme	Fabric fun 2	Fabric fun 3	Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)	Fabric Fidget/ Coaster	Fabric Fidget	NASA Fabric X	Cyberpunk Armor
PLA	3,309	2,813	2,880	0,976	4,925	4,405	0,453	1,277	0,333	2,445	0,978	1,391	2,775
TPU	2,250	3,025	2,592	0,562	5,267	4,833	0,741	1,001	0,748	2,650	0,664	2,494	2,336
PETG	2,907	2,135	1,641	0,847	4,066	4,375	0,590	0,794	0,132	1,330	0,646	1,229	2,096

Diagrama 5.6. Valorile medii ale parametrului Rezistența la rupere pentru fiecare dintre filamente (PLA, TPU, PETG) pentru structurile închise de tip chainmail (1. "Extra Supple HexMaille Fabric", 2. „Fabric 19 – Extreme Flexibility", 3. "Fabric Fidget - Large", 4. „3d Printed Crochet Fabric", 5, „Spiky HexMaille Fabric", 6. „Chainmail – Fabric of Thyme", 7. "Fabric fun 2", 8. "Fabric fun 3", 9. "Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)", 10. "Fabric Fidget/ Coaster", 11. "Fabric Fidget", 12. "NASA Fabric X", 13. "Cyberpunk Armor")

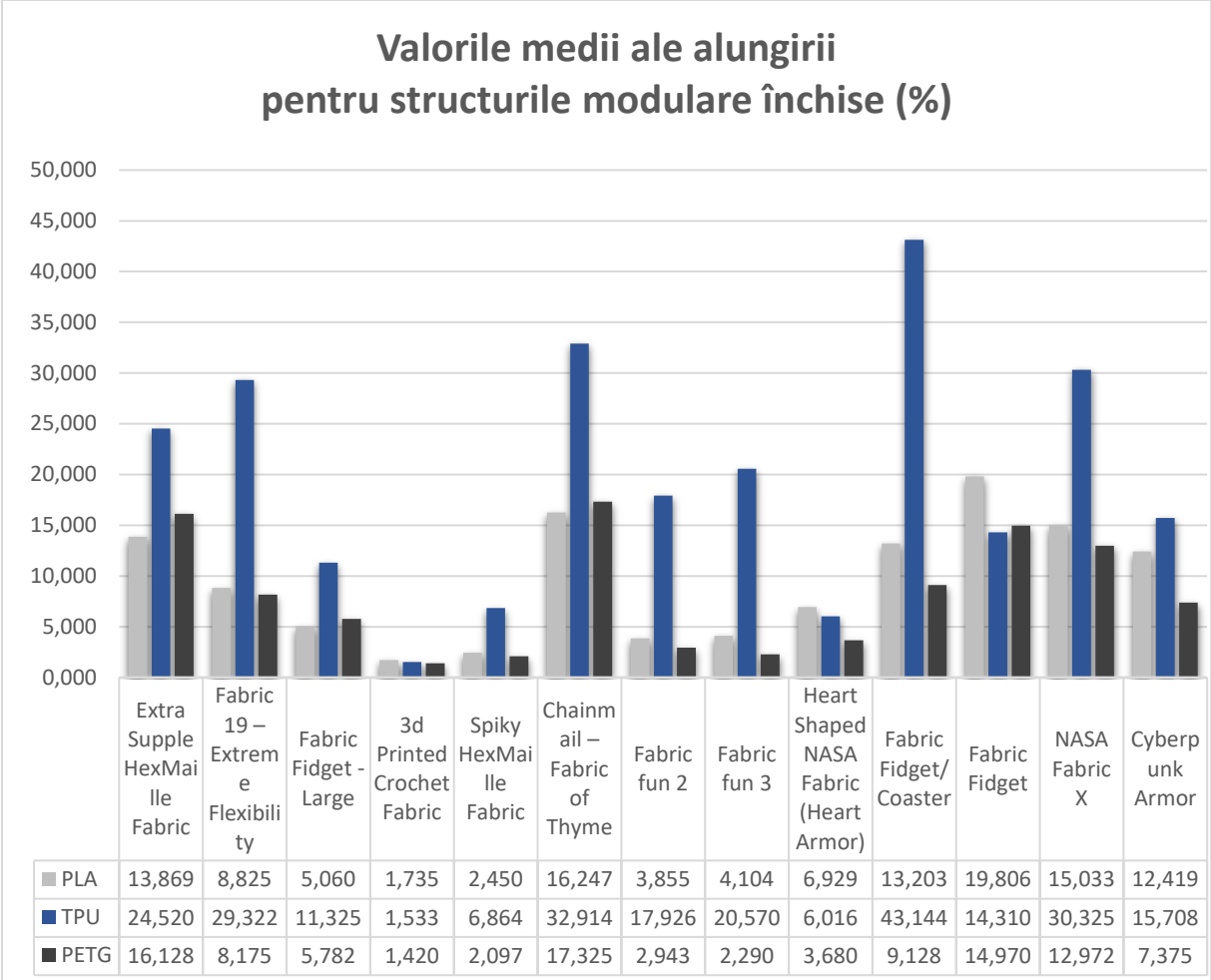
În ansamblu, analiza comparativă a rezistenței la rupere raportate la lățime confirmă tendințele observate în analiza forței maxime. Structurile „Spiky HexMaille Fabric” și „Chainmail – Fabric of Thyme” prezintă cele mai ridicate valori, ceea ce indică o capacitate foarte bună de preluare a solicitărilor mecanice. Totuși, din perspectiva aplicațiilor vestimentare, „Chainmail – Fabric of Thyme” este mai echilibrată, deoarece combină rezistența ridicată cu un potențial mai bun de flexibilitate, în special în varianta TPU. Structurile „Fabric 19 – Extreme Flexibility”, „Fabric Fidget / Coaster”, „NASA Fabric – X” și „Fabric Fidget – Large” se remarcă prin valori bune în varianta TPU și pot fi considerate relevante pentru zone care necesită mobilitate, deformabilitate și adaptare la corp. În schimb, structurile „Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)”, „Fabric Fun 2”, „Fabric Fun 3”, „3D Printed Crochet Fabric” și „Fabric Fidget” prezintă valori reduse, fiind mai adecvate pentru aplicații decorative, inserții sau zone cu solicitare redusă.

Prin urmare, rezistența la rupere raportată la lățime arată că nu toate structurile de tip “chainmail” sunt echivalente din punct de vedere funcțional. Unele configurații favorizează capacitatea portantă și stabilitatea, altele deformabilitatea sau expresivitatea vizuală. Pentru context vestimentar, cele mai promițătoare structuri sunt cele care combină valori bune ale rezistenței raportate la lățime cu flexibilitate și comportament favorabil la mișcare. Din această perspectivă, „Chainmail – Fabric of Thyme”, „Fabric 19 – Extreme Flexibility”, „Fabric Fidget / Coaster” și „NASA Fabric – X” prezintă potențial ridicat, mai ales în variantele realizate din TPU.

Analiza comparativă a alungirii pentru structurile modulare închise de tip “chainmail”

Diagrama 5.7 prezintă valorile medii ale alungirii pentru cele 13 structuri modulare închise de tip chainmail, realizate din PLA, TPU și PETG. Alungirea este un parametru relevant pentru evaluarea deformabilității ansamblului modular și a capacității structurii de a se adapta la solicitări înainte de cedare. În context vestimentar, acest parametru este deosebit de important, deoarece suprafețele purtabile trebuie să permită o anumită conformare la corp și adaptare la mișcare, fără pierderea rapidă a integrității structurale.

În ansamblu, analiza comparativă a alungirii arată că structurile modulare închise de tip chainmail nu au un comportament uniform, ci variază semnificativ în funcție de geometrie și material. Cele mai promițătoare structuri din perspectiva deformabilității și adaptării la mișcare sunt „Fabric Fidget / Coaster”, „Chainmail – Fabric of Thyme”, „NASA Fabric – X” și „Fabric 19 – Extreme Flexibility”, în special în variantele TPU. Acestea pot fi considerate mai potrivite pentru suprafețe vestimentare flexibile, zone de mobilitate și produse configurabile care trebuie să se adapteze corpului. În schimb, „3D Printed Crochet Fabric”, „Spiky HexMaille Fabric” și, parțial, „Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)” prezintă deformabilitate redusă și sunt mai adecvate pentru aplicații decorative, structurale sau protective, nu pentru zone care necesită confort și libertate mare de mișcare.

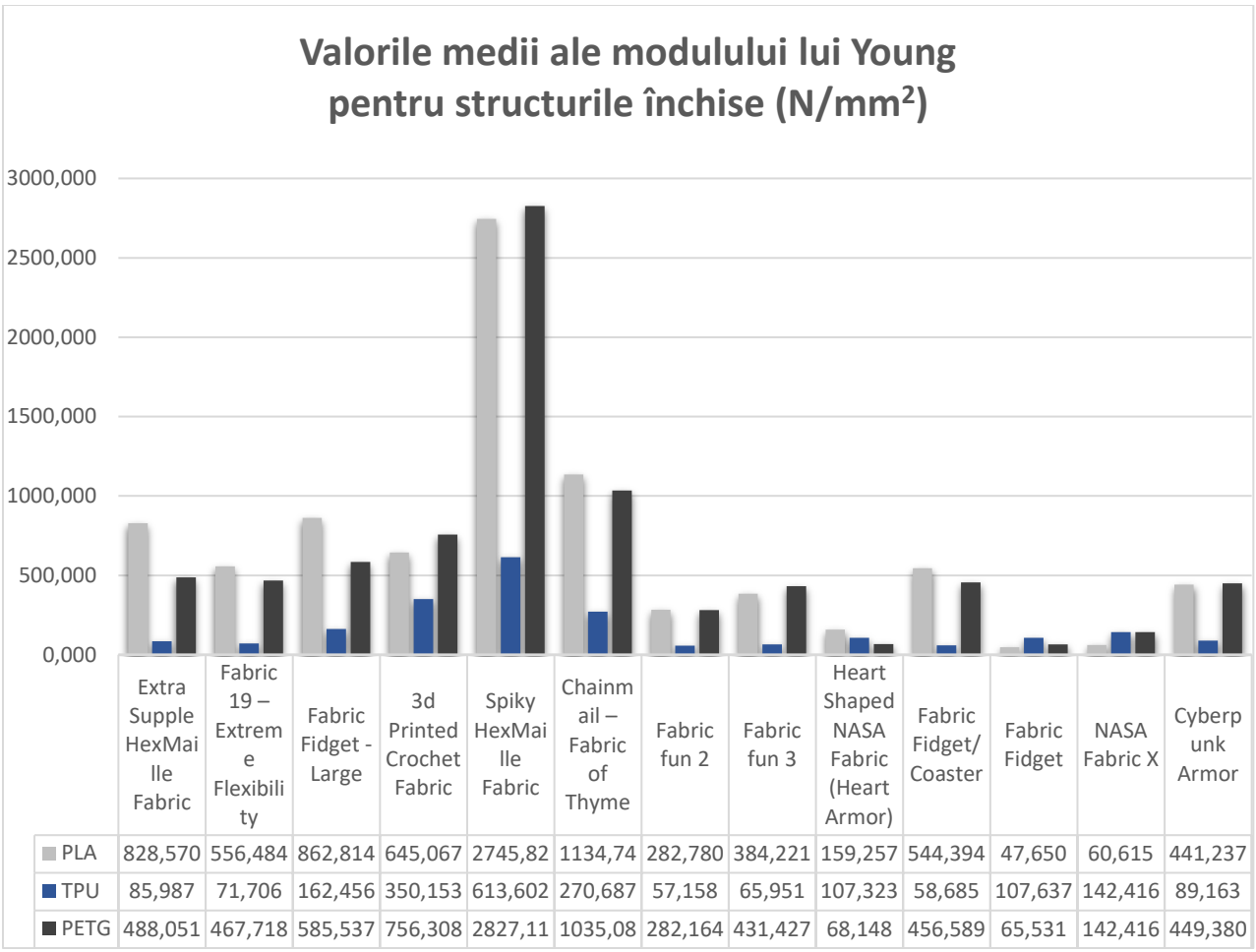


	Extra Supple HexMaille Fabric	Fabric 19 – Extreme Flexibility	Fabric Fidget - Large	3d Printed Crochet Fabric	Spiky HexMaille Fabric	Chainmail – Fabric of Thyme	Fabric fun 2	Fabric fun 3	Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)	Fabric Fidget/ Coaster	Fabric Fidget	NASA Fabric X	Cyberpunk Armor
PLA	13,869	8,825	5,060	1,735	2,450	16,247	3,855	4,104	6,929	13,203	19,806	15,033	12,419
TPU	24,520	29,322	11,325	1,533	6,864	32,914	17,926	20,570	6,016	43,144	14,310	30,325	15,708
PETG	16,128	8,175	5,782	1,420	2,097	17,325	2,943	2,290	3,680	9,128	14,970	12,972	7,375

Diagrama 5.7. Valorile medii ale parametrului Alungire pentru fiecare dintre filamente (PLA, TPU, PETG) pentru structurile închise de tip chainmail (1. “Extra Supple HexMaille Fabric”, 2. „Fabric 19 – Extreme Flexibility”, 3. “Fabric Fidget - Large”, 4. „3d Printed Crochet Fabric”, 5, „Spiky HexMaille Fabric”, 6. „Chainmail – Fabric of Thyme”, 7. “Fabric fun 2”, 8. “Fabric fun 3”, 9. “Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)”, 10. “Fabric Fidget/ Coaster”, 11. “Fabric Fidget”, 12. “NASA Fabric X”, 13. “Cyberpunk Armor”)

Analiza comparativă a modulului lui Young
pentru structurile modulare închise de tip “chainmail”

Diagrama 5.8 prezintă valorile medii ale modulului lui Young pentru cele 13 structuri modulare închise de tip chainmail, realizate din PLA, TPU și PETG. Modulul lui Young oferă informații privind rigiditatea inițială a ansamblului modular și permite evaluarea rezistenței structurii la deformare în prima etapă a solicitării mecanice. În context vestimentar, acest parametru este important deoarece o rigiditate ridicată poate susține stabilitatea formei, dar poate limita confortul, conformarea la corp și libertatea de mișcare.



	Extra Supple HexMaille Fabric	Fabric 19 – Extreme Flexibility	Fabric Fidget - Large	3d Printed Crochet Fabric	Spiky HexMaille Fabric	Chainmail – Fabric of Thyme	Fabric fun 2	Fabric fun 3	Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)	Fabric Fidget/ Coaster	Fabric Fidget	NASA Fabric X	Cyberpunk Armor
PLA	828,570	556,484	862,814	645,067	2745,82	1134,74	282,780	384,221	159,257	544,394	47,650	60,615	441,237
TPU	85,987	71,706	162,456	350,153	613,602	270,687	57,158	65,951	107,323	58,685	107,637	142,416	89,163
PETG	488,051	467,718	585,537	756,308	2827,11	1035,08	282,164	431,427	68,148	456,589	65,531	142,416	449,380

Diagrama 5.8. Valorile medii ale parametrului Modulul lui Young pentru fiecare dintre filamente (PLA, TPU, PETG) pentru structurile închise de tip chainmail (1. "Extra Supple HexMaille Fabric", 2. „Fabric 19 – Extreme Flexibility", 3. "Fabric Fidget - Large", 4. „3d Printed Crochet Fabric", 5, „Spiky HexMaille Fabric", 6. „Chainmail – Fabric of Thyme", 7. "Fabric fun 2", 8. "Fabric fun 3", 9. "Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)", 10. "Fabric Fidget/ Coaster", 11. "Fabric Fidget", 12. "NASA Fabric X", 13. "Cyberpunk Armor")

În ansamblu, analiza comparativă a modulului lui Young evidențiază trei tipuri de comportament. Prima categorie include structurile foarte rigide, precum „Spiky HexMaille Fabric" și, într-o măsură mai redusă, „Chainmail – Fabric of Thyme", adecvate pentru zone structurale, protective sau panouri cu stabilitate formală ridicată. A doua categorie include structuri cu rigiditate moderată și comportament diferențiat în funcție de material, precum „Fabric 19 – Extreme Flexibility", „Fabric Fidget – Large", „Fabric Fidget / Coaster", „Extra Supple HexMaille Fabric" și „Cyberpunk Armor". Acestea pot fi adaptate fie pentru zone semi-rigide, în variantele PLA și PETG, fie pentru zone flexibile, în variantele TPU. A treia categorie include structuri cu rigiditate scăzută sau cu performanță mecanică limitată, precum „Fabric Fidget", „Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor)" și unele variante ale structurilor „Fabric Fun 2" și „Fabric Fun 3", mai potrivite pentru aplicații decorative sau cu solicitare redusă.

Prin urmare, modulul lui Young confirmă faptul că rigiditatea structurilor de tip chainmail este puternic influențată de interacțiunea dintre geometrie și material. PLA și PETG determină, în

general, valori mai ridicate ale rigidității, în timp ce TPU conduce la structuri mai flexibile. Totuși, diferențele dintre structuri arată că materialul nu acționează independent: unele geometrii amplifică rigiditatea, cum este cazul „Spiky HexMaille Fabric”, în timp ce altele permit deformarea și mobilitatea ansamblului, cum este cazul „Fabric Fidget / Coaster”, „NASA Fabric – X” sau „Fabric 19 – Extreme Flexibility” în variantele TPU. Pentru aplicații vestimentare, cele mai adecvate structuri sunt cele care asigură un echilibru între rigiditate suficientă pentru stabilitate și flexibilitate suficientă pentru confort și adaptare la mișcare.

5.2.3. Analiza comparativă a parametrilor măsurați pentru structurile modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare și structurile modulare închise de tip zale

Analiza comparativă a celor două categorii de structuri modulare evidențiază diferențe importante între structurile deschise, prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, și structurile închise de tip zale. Structurile deschise au avantajul reconfigurării, al posibilității de intervenție locală și al înlocuirii modulelor, însă comportamentul lor mecanic este condiționat de stabilitatea sistemelor de îmbinare. Structurile închise de tip zale distribuie solicitările prin mecanismul de articulare continuă, ceea ce poate conduce, în anumite cazuri, la valori mecanice mai ridicate, dar fără posibilitatea de demontare locală a modulelor.

Prin urmare, valoarea funcțională a structurilor modulare nu trebuie apreciată exclusiv prin performanța mecanică absolută, ci prin raportarea acesteia la posibilitatea de intervenție asupra produsului în timp. Din perspectiva designului vestimentar sustenabil, structurile deschise sunt relevante prin potențialul de reparare, adaptare și reconfigurare, în timp ce structurile închise sunt relevante prin mobilitatea și stabilitatea ansamblului articulat.

5.3. Pregătirea epruvetelor în standardul textil

În completarea testării realizate în standardul de tip „dog-bone”, s-a considerat necesară evaluarea structurilor modulare și într-o configurație dimensională specifică materialelor textile. Această extindere metodologică a fost determinată de două aspecte esențiale: limitările geometrice ale anumitor structuri modulare, a căror funcționalitate ar fi fost compromisă prin încadrarea strictă într-un contur îngustat de tip “dog-bone”, și obiectivul cercetării de a analiza comportamentul acestor structuri în contextul utilizării vestimentare, unde solicitările sunt distribuite pe suprafețe plane extinse.

În acest sens, geometria epruvetelor a fost adaptată conform principiilor utilizate în testarea la tracțiune a materialelor textile, în special metoda „strip test” descrisă în ISO 13934-1 și ASTM D5035. Astfel, au fost realizate epruvete dreptunghiulare cu dimensiunile 250 × 50 × 4 mm, cu o lungime efectivă de prindere între clemele dinamometrului de 200 mm. Lățimea de 50 mm a fost aleasă pentru a integra un număr suficient de module, astfel încât comportamentul mecanic observat să fie reprezentativ pentru rețeaua structurală și nu pentru un element singular. Forma și dimensiunile epruvetei realizate în standard textil sunt prezentate în Figura 5.3.

Epruvetele realizate în standard textil au fost imprimate utilizând aceeași tehnologie, aceleași materiale și aceiași parametri principali de imprimare prezentați la realizarea epruvetelor în standardul „dog-bone”, pentru a permite compararea rezultatelor obținute în cele două configurații experimentale. Diferența principală față de etapa anterioară a constat în geometria și dimensiunea epruvetei, respectiv în extinderea suprafeței active testate. Fluxul de lucru adoptat pentru pregătirea epruvetelor în standardul textil este prezentat în Figura 5.4.

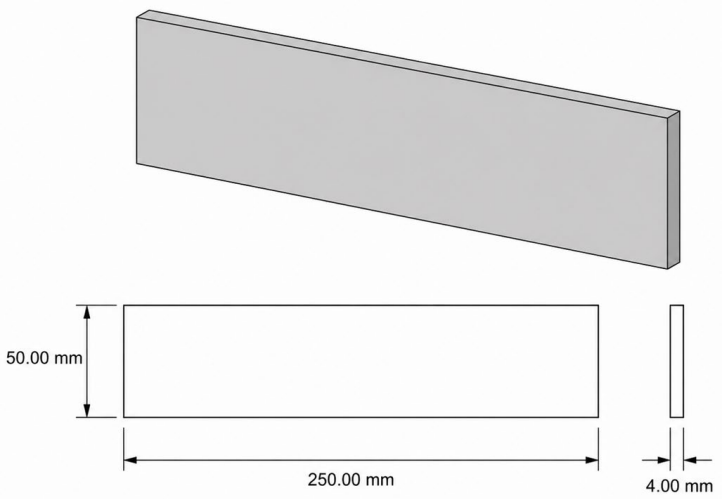


Figura 5.3. Forma și dimensiunile epruvetei realizată în standardul textil (250 x 50 x 4 mm)

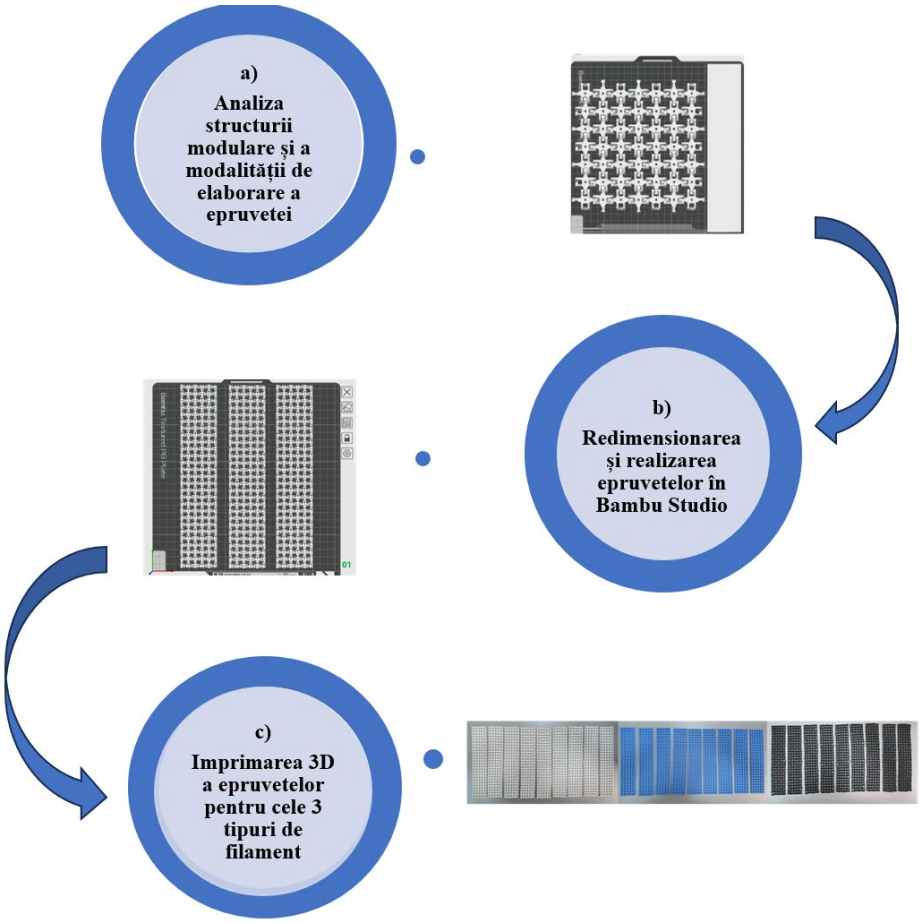


Figura 5.4. Fluxul de lucru adoptat pentru pregătirea epruvetelor destinate testelor mecanice: (a) analizarea structurilor modulare și a mecanismelor de îmbinare, în vederea stabilirii modului de integrare în geometria epruvetei; (b) redimensionarea uniformă și adaptarea conturului epruvetelor în mediul Bambu Studio, cu păstrarea topologiei și a mecanismelor de conectare; (c) imprimarea 3D a epruvetelor prin tehnologie FDM, utilizând trei tipuri de filament (PLA, TPU și PETG).

5.4. Testarea epruvetelor realizate în standardul „textil” ale structurilor modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare

Testarea epruvetelor realizate în standard textil a fost aplicată structurilor modulare deschise prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, deoarece acestea au potențialul cel mai direct de a funcționa ca suprafețe configurabile în aplicații vestimentare. Testele au urmărit evaluarea parametrilor mecanici relevanți pentru comportamentul structural al rețelei modulare: alungirea, rezistența la rupere raportată la lățime, forța maximă și modulul lui Young.

Rezultatele obținute pentru structurile modulare deschise realizate în standard textil oferă o perspectivă relevantă asupra comportamentului mecanic al acestor sisteme structurale în condiții apropiate de modul real de solicitare al materialelor textile. În cazul unor structuri, extinderea suprafeței active a permis mobilizarea unui număr mai mare de module și o distribuire mai eficientă a solicitărilor. În alte cazuri, rezultatele au rămas apropiate sau mai reduse comparativ cu testarea în standard “dog-bone”, ceea ce indică influența decisivă a geometriei și a mecanismului de conectare.

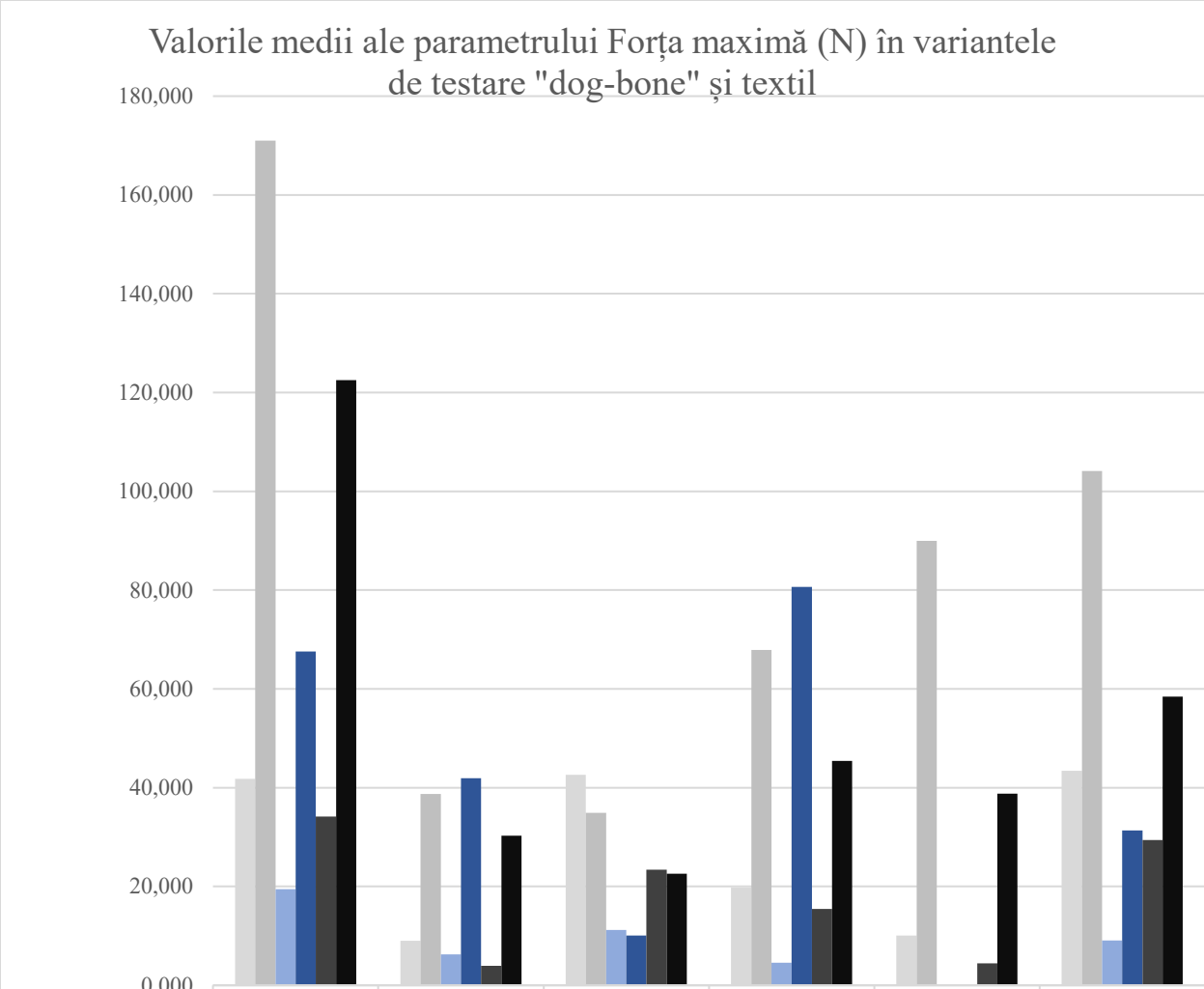
În ansamblu, rezultatele obținute pentru structurile modulare deschise realizate în standard textil confirmă faptul că flexibilitatea și deformabilitatea structurilor modulare imprimate 3D sunt influențate atât de proprietățile mecanice ale filamentului utilizat, cât și de geometria sistemului de interconectare dintre module. Această observație evidențiază importanța corelării designului structural cu selecția materialului pentru dezvoltarea structurilor textile modulare destinate aplicațiilor vestimentare.

5.5. Analiza comparativă a parametrilor măsurați în cele două standarde diferite („dog-bone” și „textil”)

Analiza comparativă dintre rezultatele obținute în standard “dog-bone” și cele obținute în standard textil a permis evidențierea diferențelor dintre comportamentul mecanic al materialului propriu-zis și comportamentul mecanic al sistemului structural modular. În cazul structurilor modulare imprimate 3D, geometria complexă a rețelelor structurale și prezența sistemelor de conectare/detașare dintre module pot influența semnificativ modul în care tensiunile sunt distribuite în timpul solicitării mecanice.

Pentru parametrul forță maximă, rezultatele arată că, în majoritatea cazurilor, standardul textil conduce la valori superioare celor obținute în standard “dog-bone”. Această creștere se explică prin mobilizarea unei suprafețe active mai mari și prin distribuirea solicitării pe un număr mai mare de module. Totuși, comportamentul nu este uniform pentru toate geometriile. Structura „Hexagonal Fabric” prezintă valori subunitare sau apropiate de unitate ale indicatorului R, ceea ce arată că testarea în standard textil nu a condus la o creștere semnificativă a valorilor forței maxime comparativ cu testarea în standard “dog-bone”.

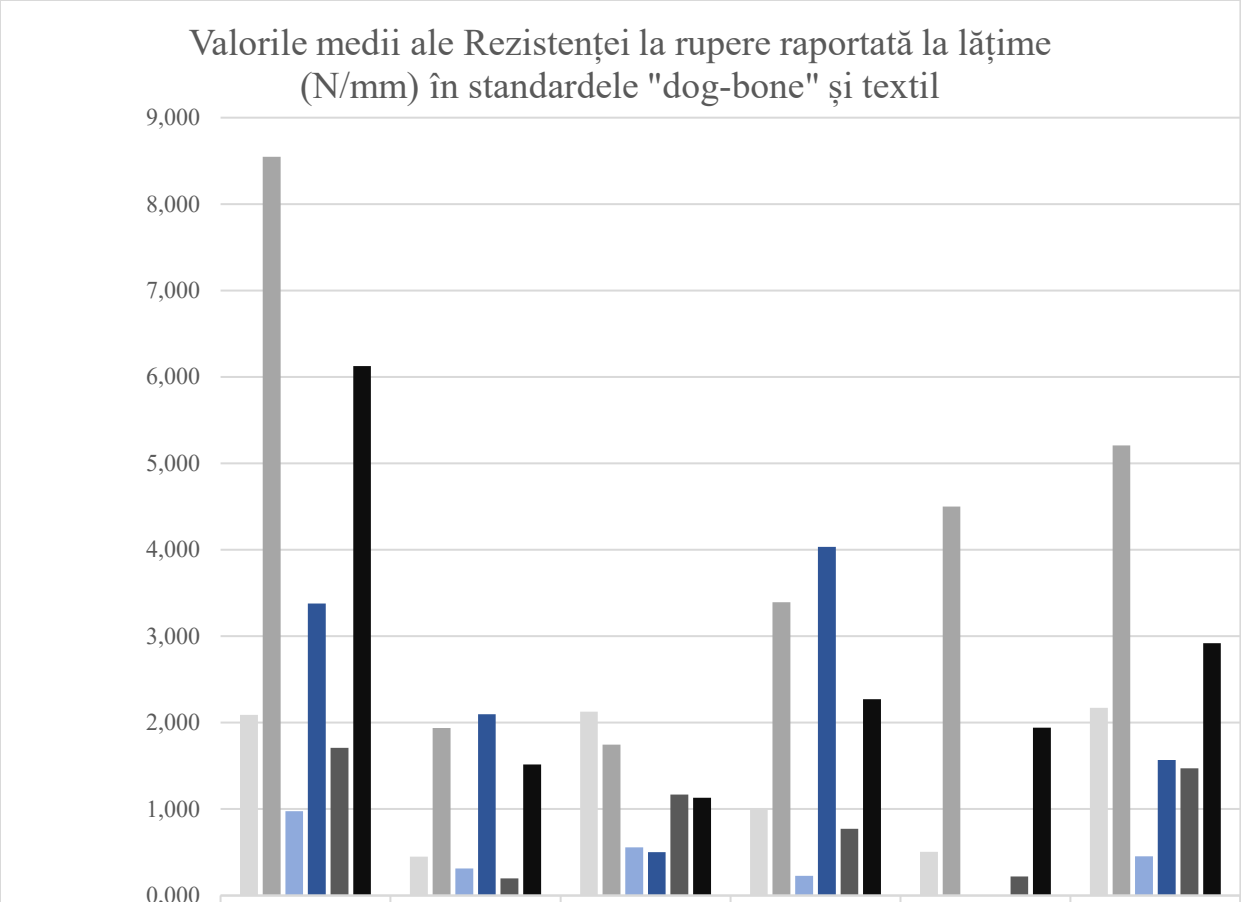
Valorile medii ale forței maxime pentru structurile modulare deschise testate în standard “dog-bone” și standard textil sunt prezentate comparativ în Diagrama 5.9.



	Chainmail 3D Printed Fabric	Dragon Scales Chainmail	Hexagonal Fabric	3D Printed Fabric/ Armor	FlexMesh 2.1	Flat fabric
PLA dog-bone	41,781	9,011	42,586	19,803	10,103	43,417
PLA textil	170,989	38,754	34,933	67,861	90,000	104,128
TPU dog-bone	19,477	6,236	11,188	4,563	0,000	9,089
TPU textil	67,607	41,940	10,069	80,667	0,000	31,338
PETG dog-bone	34,177	3,968	23,401	15,438	4,443	29,429
PETG textil	122,494	30,294	22,606	45,432	38,812	58,426

Diagrama 5.9. Valori medii ale forței maxime pentru structurile modulare deschise cu sisteme de conectare/detașare, obținute în standard dog-bone și standard textil pentru filamentele PLA, TPU și PETG.

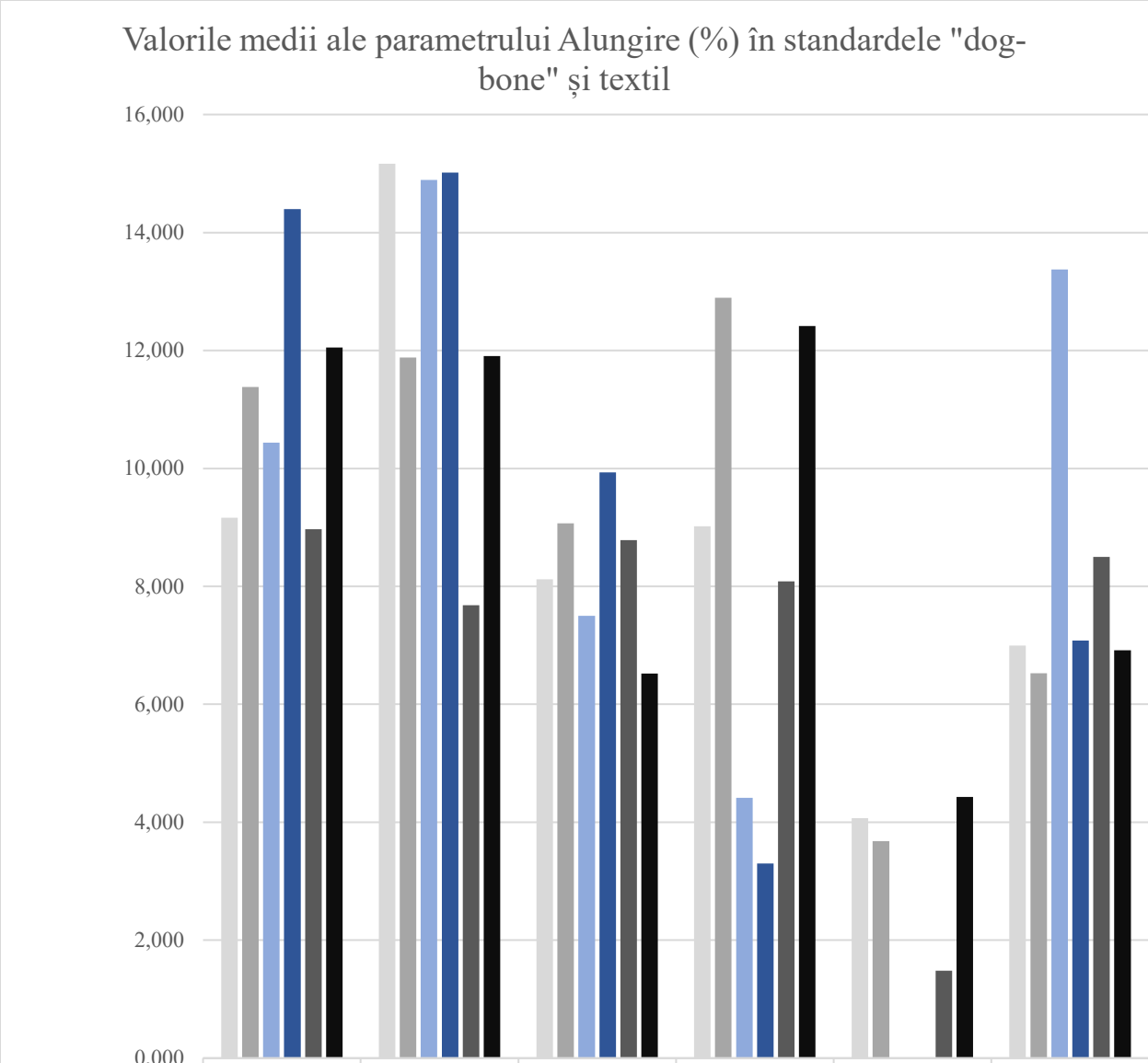
Pentru rezistența la rupere raportată la lățime, valorile urmează aceeași tendință generală ca forța maximă, deoarece parametrul este calculat în raport cu lățimea epruvetei. În majoritatea cazurilor, testarea în standard textil a condus la valori mai ridicate, confirmând faptul că suprafața modulară extinsă contribuie la preluarea mai eficientă a solicitărilor mecanice. Totuși, diferențele dintre structuri arată că geometria și mecanismul de conectare influențează decisiv capacitatea de transmitere a forței.



	Chainmail 3D Printed Fabric	Dragon Scales Chainmail	Hexagonal Fabric	3D Printed Fabric/ Armor	FlexMesh 2.1	Flat fabric
PLA dog-bone	2,089	0,451	2,129	0,990	0,505	2,171
PLA textil	8,549	1,938	1,747	3,393	4,500	5,206
TPU dog-bone	0,974	0,312	0,559	0,228	0,000	0,454
TPU textil	3,380	2,097	0,503	4,033	0,000	1,567
PETG dog-bone	1,709	0,198	1,170	0,772	0,222	1,471
PETG textil	6,125	1,515	1,130	2,272	1,941	2,921

Diagrama 5.10. Valori medii ale rezistenței la rupere raportate la lățime pentru structurile modulare deschise cu sisteme de conectare/detașare, obținute în standard “dog-bone” și standard textil pentru filamentele PLA, TPU și PETG.

În cazul alungirii, comportamentul structurilor modulare este mai variabil. Pentru unele geometrii, valorile alungirii cresc în standard textil, sugerând că structura modulară permite o reconfigurare mai pronunțată a elementelor interconectate în timpul solicitării, în timp ce pentru alte structuri alungirea rămâne similară sau chiar mai redusă comparativ cu valorile obținute în standard “dog-bone”. Prin urmare, alungirea nu trebuie interpretată doar ca rezultat al comportamentului materialului, ci și ca efect al mobilității modulelor, al închiderii jocurilor dintre îmbinări și al redistribuirii locale a solicitărilor.

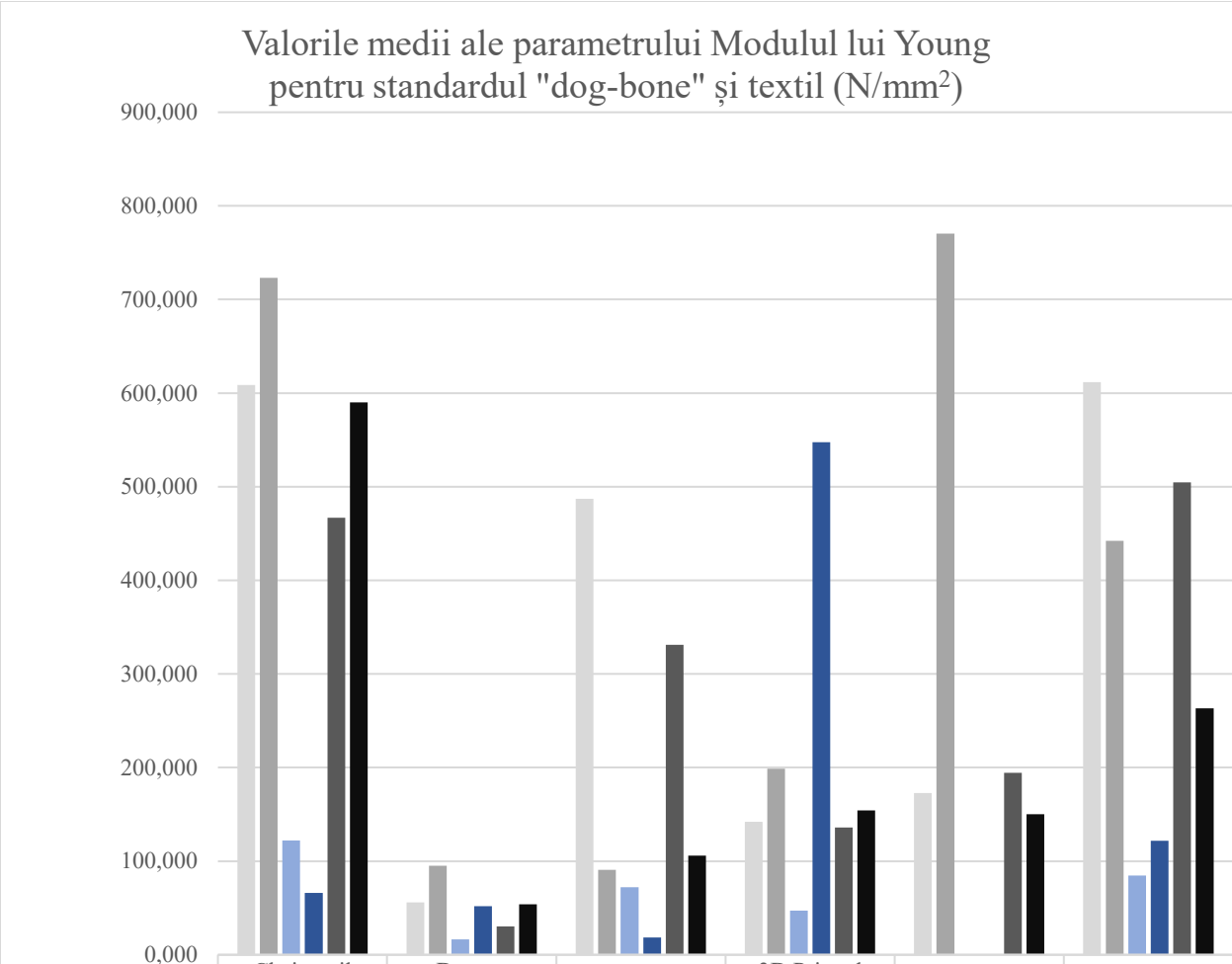


	Chainmail 3D Printed Fabric	Dragon Scales Chainmail	Hexagonal Fabric	3D Printed Fabric/ Armor	FlexMesh 2.1	Flat fabric
PLA dog-bone	9,164	15,168	8,120	9,019	4,069	6,994
PLA textil	11,383	11,879	9,067	12,892	3,680	6,525
TPU dog-bone	10,436	14,892	7,503	4,416	0,000	13,375
TPU textil	14,395	15,014	9,932	3,303	0,000	7,082
PETG dog-bone	8,967	7,679	8,786	8,084	1,485	8,500
PETG textil	12,050	11,903	6,523	12,413	4,427	6,916

Diagrama 5.11. Valori medii ale alungirii pentru structurile modulare deschise cu sisteme de conectare/detașare, comparând rezultatele obținute în standard “dog-bone” și standard textil pentru filamentele PLA, TPU și PETG.

Pentru modulul lui Young, rezultatele confirmă faptul că rigiditatea structurilor modulare imprimate 3D este puternic influențată de configurația de testare. Spre deosebire de parametrii de rezistență, unde standardul textil a condus frecvent la valori mai mari, modulul lui Young poate

crește sau scădea în funcție de geometria structurală și de material. Acest rezultat arată că rigiditatea ansamblului nu trebuie interpretată ca o proprietate fixă a filamentului, ci ca un comportament emergent al sistemului modular, determinat de arhitectura structurii, de mobilitatea modulelor și de modul de transmitere a solicitărilor.



	Chainmail 3D Printed Fabric	Dragon Scales Chainmail	Hexagonal Fabric	3D Printed Fabric/ Armor	FlexMesh 2.1	Flat fabric
PLA dog-bone	608,599	55,894	487,113	142,199	172,876	611,582
PLA textil	723,200	95,239	90,731	198,606	770,518	442,088
TPU dog-bone	122,088	16,467	72,194	47,128	0,000	84,558
TPU textil	65,971	51,953	18,636	547,464	0,000	121,939
PETG dog-bone	466,971	30,215	331,068	136,105	194,400	504,611
PETG textil	590,007	53,861	105,953	154,310	150,166	263,376

Diagrama 5.12. Valori medii ale modulului lui Young pentru structurile modulare deschise cu sisteme de conectare/detașare, comparând rezultatele obținute în standard “dog-bone” și standard textil pentru filamentele PLA, TPU și PETG.

Analiza indicatorului Ratio, calculat ca raport între valorile obținute în standard textil și cele obținute în standard “dog-bone”, a permis evidențierea influenței configurației epruvetei asupra comportamentului mecanic al structurilor modulare. Pentru forța maximă și rezistența la

rupere raportată la lățime, valorile R sunt în majoritatea cazurilor supraunitare, indicând o creștere a capacității de preluare a solicitărilor în standard textil. În schimb, pentru alungire și modulul lui Young, comportamentul este mai variabil, confirmând că deformabilitatea și rigiditatea depind de interacțiunea dintre geometria structurală, mobilitatea modulelor și tipul de filament. Valorile indicatorului R pentru cei patru parametri analizați sunt sintetizate în Tabelele 5.1–5.4.

Tabel 5.1. Valorile indicatorului R pentru parametrul Forță maximă

Structura modulară	PLA	TPU	PETG
Chainmail 3D Printed Fabric	4,092	3,471	3,584
Dragon Scales Chainmail	4,301	6,725	7,635
Hexagonal Fabric	0,820	0,900	0,966
3D Printed Fabric/Armor	3,426	17,678	2,943
FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh	8,908	—	8,736
Flat fabric	2,398	3,448	1,985

Tabel 5.2. Valorile indicatorului R pentru parametrul Rezistența la rupere raportată la lățime

Structura modulară	PLA	TPU	PETG
Chainmail 3D Printed Fabric	4,092	3,470	3,584
Dragon Scales Chainmail	4,297	6,721	7,652
Hexagonal Fabric	0,821	0,900	0,966
3D Printed Fabric/Armor	3,427	17,689	2,943
FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh	8,911	—	8,743
Flat fabric	2,398	3,452	1,986

Tabel 5.3. Valorile indicatorului R pentru parametrul Alungire

Structura modulară	PLA	TPU	PETG
Chainmail 3D Printed Fabric	1,242	1,379	1,344
Dragon Scales Chainmail	0,783	1,008	1,550
Hexagonal Fabric	1,117	1,324	0,742
3D Printed Fabric/Armor	1,429	0,748	1,536
FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh	0,904	—	2,981
Flat fabric	0,933	0,530	0,814

Tabel 5.4. Valorile indicatorului R pentru parametrul Modulul lui Young

Structura modulară	PLA	TPU	PETG
Chainmail 3D Printed Fabric	1,188	0,540	1,263
Dragon Scales Chainmail	1,704	3,155	1,783
Hexagonal Fabric	0,186	0,258	0,320
3D Printed Fabric/Armor	1,397	11,617	1,134
FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh	4,457	—	0,772
Flat fabric	0,723	1,442	0,522

5.6. Concluzii

Analiza experimentală realizată în acest capitol a urmărit evaluarea comportamentului fizico-mecanic al structurilor modulare imprimate 3D, prin investigarea a două categorii principale: structuri modulare deschise, prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, și structuri modulare închise de tip zale. Testarea inițială a fost realizată pe epruvete adaptate geometriei de tip „dog-bone", utilizată frecvent pentru caracterizarea materialelor polimerice. Totuși, particularitățile geometrice ale structurilor modulare deschise și funcția acestora de suprafețe cu potențial textil au impus completarea analizei prin retestarea lor în standard textil, pe epruvete cu suprafață activă mai extinsă.

O concluzie importantă a Capitolului V este că performanța structurilor modulare imprimate 3D nu depinde exclusiv de proprietățile materialului, ci de relația dintre material, geometria modulului, tipul de conexiune și modul de organizare a ansamblului. Structurile analizate nu se comportă ca materiale omogene, ci ca sisteme arhitecturate, în care deformarea este influențată de rotația modulelor, închiderea jocurilor dintre îmbinări, redistribuirea tensiunilor în rețea și modul de cedare al conectorilor.

Rezultatele obținute au evidențiat comportamente distincte ale celor trei materiale. Epruvetele realizate din PLA au oferit, în general, valori ridicate ale rigidității și ale forței maxime, dar au prezentat o tendință mai pronunțată către cedare fragilă în zonele de îmbinare. Epruvetele realizate din PETG au manifestat un comportament intermediar, combinând o rezistență relativ ridicată cu o anumită capacitate de deformare, dar rămânând vulnerabile la cedări locale în funcție de geometria structurii. Epruvetele realizate din TPU au prezentat valori mai reduse ale forței maxime, dar au oferit o capacitate superioară de deformare și, în multe cazuri, un comportament mai compatibil cu logica structurilor flexibile și reconfigurabile, în special acolo unde cedarea s-a produs prin desprindere sau deformare, nu prin rupere ireversibilă.

În urma corelării rezultatelor mecanice cu observațiile post-testare, structura „Flat fabric" a fost selectată pentru investigarea detaliată a comportamentului sistemului de clipsare/detașare. Alegerea acestei structuri nu s-a bazat exclusiv pe obținerea celor mai mari valori ale parametrilor mecanici, ci pe echilibrul dintre performanța mecanică, stabilitatea sistemului de conectare și comportamentul observat la cedare. În standard textil, „Flat fabric" a prezentat valori favorabile ale forței maxime și ale rezistenței la rupere raportate la lățime, în special în variantele PLA și PETG, iar alungirea a avut valori moderate și controlate. Mai important, testele nu au evidențiat deteriorări structurale majore ale elementelor modulare sau ale punctelor de clipsare, ci în principal declipsări locale fără fracturi vizibile.

În ansamblu, capitolul a demonstrat că evaluarea structurilor modulare imprimate 3D destinate aplicațiilor vestimentare trebuie realizată la nivel de sistem, nu doar la nivel de material. Testarea în standard „dog-bone" oferă informații utile privind comportamentul epruvetelor adaptate unei geometrii standardizate, însă standardul textil permite o evaluare mai apropiată de modul de funcționare al suprafețelor modulare extinse. Rezultatele susțin necesitatea unei abordări experimentale combinate, în care parametrii mecanici sunt interpretați împreună cu modul de cedare, stabilitatea îmbinărilor, fidelitatea imprimării și potențialul de utilizare în produs.

CAPITOLUL VI – STUDIUL COMPORTAMENTULUI FIZICO-MECANIC AL SISTEMULUI DE CLIPSARE/DETAȘARE AL STRUCTURILOR MODULARE DESCHISE

Analiza detaliată a comportamentului mecanic al sistemelor de clipsare/detașare prezintă o importanță deosebită în contextul dezvoltării produselor vestimentare modulare și al strategiilor contemporane de design sustenabil. În cadrul structurilor textile modulare realizate prin imprimare 3D, mecanismele de interconectare reprezintă elementul funcțional care permite asamblarea, reconfigurarea și repararea produsului, facilitând astfel extinderea duratei de utilizare a acestuia. Din această perspectivă, performanța mecanică a sistemului de îmbinare devine un factor critic pentru viabilitatea conceptului de design modular, deoarece capacitatea elementelor de clipsare de a suporta solicitări mecanice și cicluri repetate de conectare–deconectare influențează direct durabilitatea și funcționalitatea ansamblului.

În lipsa unei stabilități adecvate a acestor mecanisme, avantajele teoretice ale modularității — precum adaptabilitatea, reparabilitatea și reconfigurabilitatea produsului — nu pot fi valorificate în practică. Prin urmare, investigarea experimentală a comportamentului fizico-mecanic al sistemului de clipsare contribuie la fundamentarea unor criterii de proiectare pentru structuri modulare imprimate 3D, capabile să susțină procese repetate de asamblare și dezasamblare fără degradări structurale semnificative.

6.1. Fundamentarea teoretică a comportamentului mecanic al sistemelor de clipsare/detașare

Structurile modulare deschise prevăzute cu sisteme de clipsare/detașare integrează mecanisme de cuplare reversibilă, bazate pe principii de tip clic („snap-fit”). Acestea permit asamblarea și dezasamblarea repetată a modulelor, conferind sistemului adaptabilitate, modularitate și posibilitatea reconfigurării geometrice sau funcționale (Gibson și colab., 2015).

Sistemele „snap-fit” funcționează prin deformarea elastică temporară a unui element flexibil, urmată de revenirea acestuia într-o poziție de blocare mecanică. În timpul cuplării, elementul activ, de regulă conectorul „tată”, este supus unor solicitări de încovoiere sau compresiune locală, generând concentrații de tensiune în zona îngustată a conectorului sau a punctelor de contact. La depășirea pragului de inserție, are loc revenirea elastică și realizarea retenției mecanice. Procesul invers, declipsarea, implică aplicarea unei forțe exterioare suficiente pentru a produce din nou deformarea elastică necesară eliberării (Bayer, 1991; Bonenberger, 2005).

În contextul aplicațiilor textile sau vestimentare funcționale, sistemele modulare deschise trebuie să îndeplinească cerințe suplimentare față de simplele îmbinări tehnice: flexibilitate globală, reziliență la manipulare repetată, siguranță în utilizare și stabilitate dimensională. În acest sens, analiza comportamentului fizico-mecanic al sistemului de clipsare nu poate fi limitată la determinarea forței maxime de declipsare, ci trebuie extinsă către evaluarea degradării performanței în timp, a energiei absorbite la declipsare și a modificărilor structurale survenite în urma solicitării repetate.

Capitolul de față își propune investigarea experimentală a comportamentului sistemului de cuplare al modelului „Flat fabric”, printr-o abordare integrată care combină testarea statică, de tip forță–deplasare, cu testarea ciclică de durabilitate. Analiza urmărește determinarea rezistenței inițiale la declipsare, cuantificarea reducerii acesteia în urma utilizărilor repetate și identificarea mecanismelor predominante de degradare.

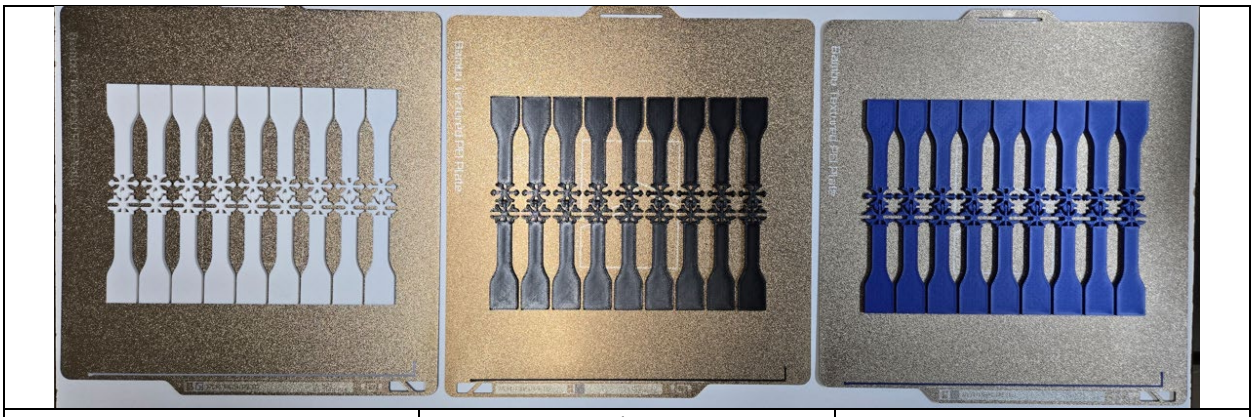
6.2. Descrierea geometrică a sistemului de clipsare/detașare

Sistemele de clipsare de tip "snap-fit" reprezintă îmbinări mecanice reversibile care funcționează pe baza deformării elastice controlate a unui element flexibil, urmată de revenirea acestuia într-o poziție de blocare. Din punct de vedere structural, aceste sisteme pot fi modelate ca elemente în consolă supuse încovoierii, compresiunii sau combinațiilor acestora, în funcție de geometria conectorului și de modul de aplicare a forței (Bonenberger, 2005).

Pentru investigarea comportamentului fizico-mecanic al sistemului de clipsare/detașare al structurilor modulare deschise, a fost selectată structura „Flat fabric". Alegerea acestei geometrii nu a fost realizată exclusiv pe baza valorilor maxime ale parametrilor mecanici determinați în capitolul anterior, ci în principal pe baza modului de comportare al mecanismului de îmbinare observat în timpul testelor de tracțiune și al analizelor post-testare. Structura „Flat fabric" a evidențiat un comportament mai stabil al mecanismului de conectare, în cadrul testelor efectuate nefiind observate deteriorări structurale majore ale elementelor modulare sau ale punctelor de clipsare, ci doar declipsări locale fără apariția fracturilor vizibile.

Pornind de la geometria epruvetei de tip „dog-bone", zona de prindere a epruvetei a fost rigidizată prin porțiuni plane, astfel încât deformarea globală a structurii să fie minimizată, iar solicitarea să fie concentrată predominant în zona sistemului de clipsare. Epruvetele utilizate pentru investigarea experimentală a comportamentului mecanic al sistemului de clipsare/detașare al structurii modulare „Flat fabric" au fost realizate prin tehnologia de imprimare 3D, utilizând trei tipuri de filament: PLA, TPU și PETG.

Aspectul epruvetelor de testare a sistemului de clipsare imprimate 3D pentru cele trei tipuri de filament este prezentat în Figura 6.1.



a	b	c

Figura 6.1. Aspectul epruvetelor de testare a sistemului de clipsare imprimate 3D pentru toate cele 3 tipuri de filament PLA (a), TPU (b) și PETG (c)

6.3. Metodologia experimentală a testării mecanismului

Pentru investigarea comportamentului fizico-mecanic al sistemului de clipsare/detașare al structurii modulare selectate a fost elaborată o metodologie experimentală bazată pe testarea mecanică la tracțiune a elementelor de îmbinare. Testele au fost realizate cu ajutorul unui dinamometru universal, utilizat anterior și pentru determinarea parametrilor mecanici ai structurilor modulare analizate în Capitolul V. În cadrul experimentului, modulele interconectate

au fost fixate în dispozitivele de prindere ale echipamentului astfel încât solicitarea mecanică aplicată să acționeze direct asupra sistemului de clipsare, reproducând condițiile de solicitare specifice procesului de decuplare a modulelor.

Testarea a fost realizată în regim de tracțiune, utilizând unități de măsură exprimate în milimetri pentru deplasare și newtoni pentru forță, iar înregistrarea rezultatelor s-a realizat sub forma curbelor sarcină–deplasare. Pentru evaluarea comportamentului mecanic inițial al sistemului de clipsare au fost testate 5 epruvete, fiecare probă fiind supusă unui număr de 10 testări consecutive de declipsare–clipsare, fără cicluri prealabile de solicitare mecanică. În cadrul configurării testului, viteza de deplasare a traversei a fost stabilită la 100 mm/min pentru cursa de solicitare și 300 mm/min pentru revenire, iar lungimea de măsurare a fost setată la 10 mm. Parametrii dimensionali ai epruvetelor introduși în program au inclus o lungime a epruvetei de 100 mm, o lățime de 20 mm și o grosime de 4 mm.

Setările utilizate pentru testarea grupului martor sunt prezentate în Figura 6.2.

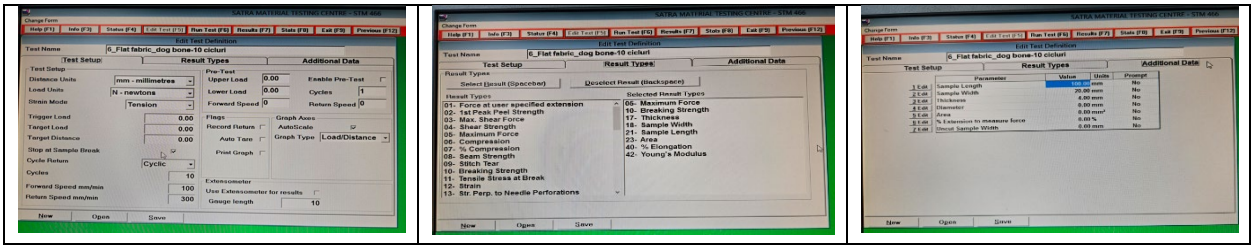


Figura 6.2. Setările efectuate pentru testarea grupului martor**.**



a)	b)	c)	d)

Figura 6.3. Etapele testării grupei martor exemplificată pe specimenul realizat din TPU: a) poziția de start, mecanism clipsat; b) poziția intermediară anterioară declipsării, c) poziția declipsată, d) revenirea la poziția de start prin clipsare

Pentru evaluarea durabilității sistemului de îmbinare, procedura experimentală a inclus solicitări repetate de asamblare și dezasamblare, urmărindu-se eventualele semne de uzură, deformare sau degradare ale elementelor de clipsare. Un ciclu a fost definit ca: declipsare completă → cuplare completă. Pentru evaluarea degradării progresive, epruvetele au fost împărțite în grupe corespunzătoare unor praguri de solicitare prestabilite: 10, 20 și 30 cicluri. După atingerea fiecărui prag, probele au fost supuse testului static de declipsare pentru determinarea noii forțe maxime. Etapele testării grupei martor și setările efectuate pentru testarea solicitării sunt prezentate în Figurile 6.3 și 6.4.

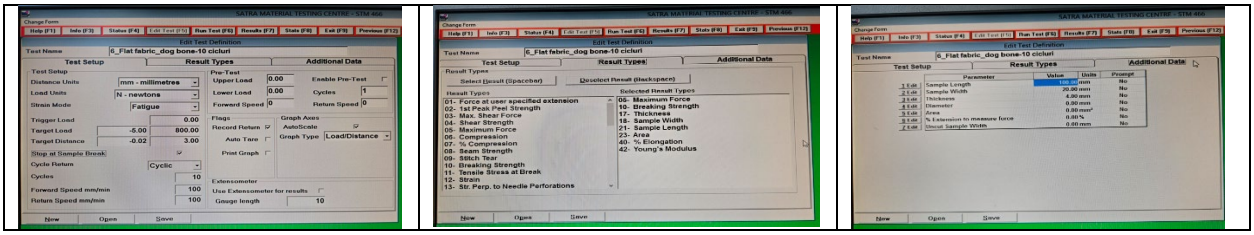


Figura 6.4. Setările efectuate pentru testarea solicitării, exemplificare pentru grupa 1 – 10 cicluri

6.4. Analiza forței de declipsare/clipsare

Pe baza configurației experimentale și a parametrilor de testare descriși anterior, au fost realizate testele mecanice destinate evaluării comportamentului sistemului de clipsare/detașare al structurii modulare analizate. În prima etapă a investigației experimentale a fost analizat grupul martor, corespunzător epruvetelor testate fără cicluri prealabile de solicitare, în vederea stabilirii comportamentului mecanic inițial al mecanismului de îmbinare. Rezultatele obținute pentru cele trei tipuri de filament investigate, PLA, TPU și PETG, au fost analizate prin intermediul valorilor forței maxime înregistrate în cadrul testelor consecutive de declipsare–clipsare.

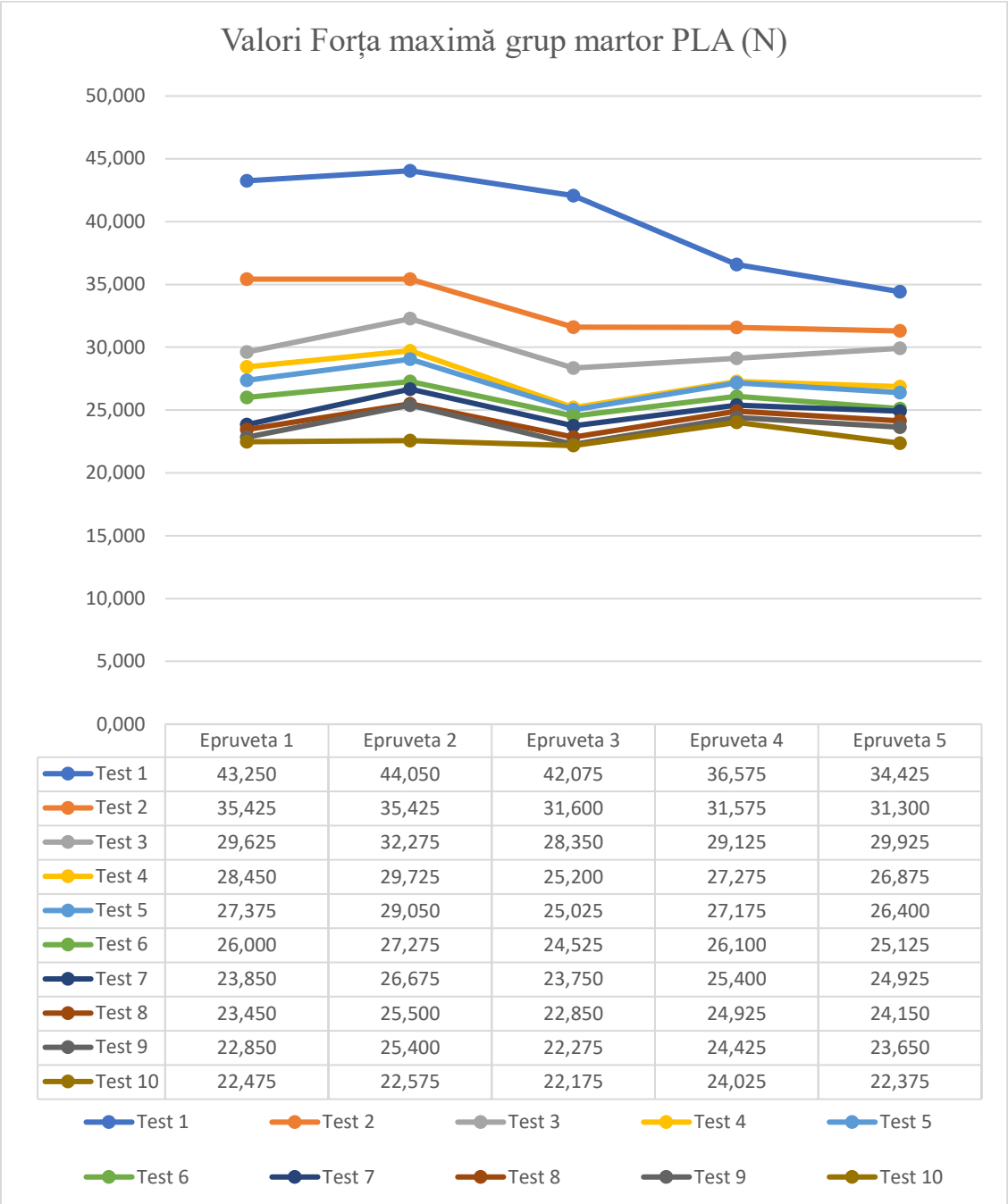
Pentru PLA, valorile cele mai ridicate ale forței maxime se înregistrează în cazul primelor teste, în special pentru Testul 1, Testul 2 și Testul 3, unde valorile depășesc în unele cazuri 42 N. Pe măsură ce testele succesive sunt realizate, se observă o tendință generală de scădere a valorilor forței maxime, stabilizându-se în intervale mai reduse pentru majoritatea testelor efectuate. Analiza statistică a valorilor forței maxime pentru grupul martor evidențiază o scădere progresivă a valorilor medii de la aproximativ 40 N în primul test la aproximativ 22 N în testul zece. Această tendință poate fi asociată fenomenului de adaptare mecanică a suprafețelor de contact ale mecanismului de clipsare, care apare frecvent în cazul sistemelor “snap-fit” realizate din materiale polimerice.

Pentru TPU, comportamentul mecanic inițial al mecanismului de clipsare diferă de cel observat pentru PLA. Valorile forței maxime sunt mai reduse în primele teste, dar evoluția lor indică o tendință de creștere și stabilizare progresivă a mecanismului în timpul testelor consecutive. Acest comportament poate fi asociat caracterului elastomeric al filamentului TPU, care permite deformări reversibile și adaptarea suprafețelor de contact fără deteriorarea imediată a sistemului de îmbinare.

Pentru PETG, analiza rezultatelor evidențiază o tendință generală de diminuare progresivă a valorilor forței maxime pe parcursul testelor succesive, fenomen similar celui observat în cazul filamentului PLA, dar cu o amplitudine mai redusă. În primele teste, valorile forței maxime se situează în intervalul 23,071–27,929 N, în timp ce în testele finale acestea scad până la valori cuprinse între 16,643–18,786 N. Această evoluție indică faptul că mecanismul de clipsare realizat

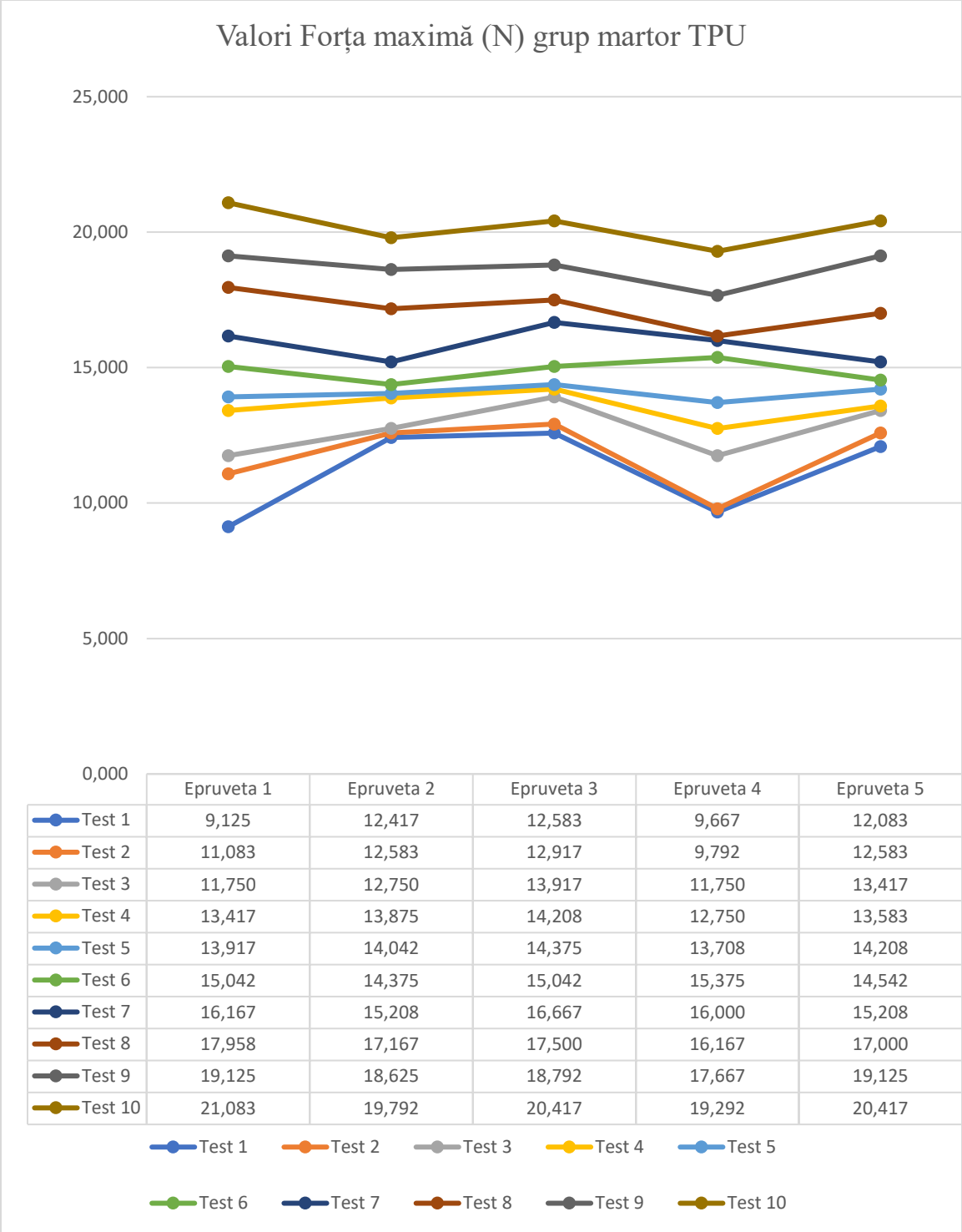
din PETG prezintă o reducere graduală a rezistenței la declipsare în timpul ciclurilor repetate, fenomen care poate fi asociat cu apariția unor procese de micro-uzură în zona de contact a elementelor de îmbinare.

Valorile forței maxime pentru grupul martor sunt prezentate în Diagramele 6.1–6.3, iar analiza comparativă a celor trei materiale este prezentată în Diagrama 6.4.



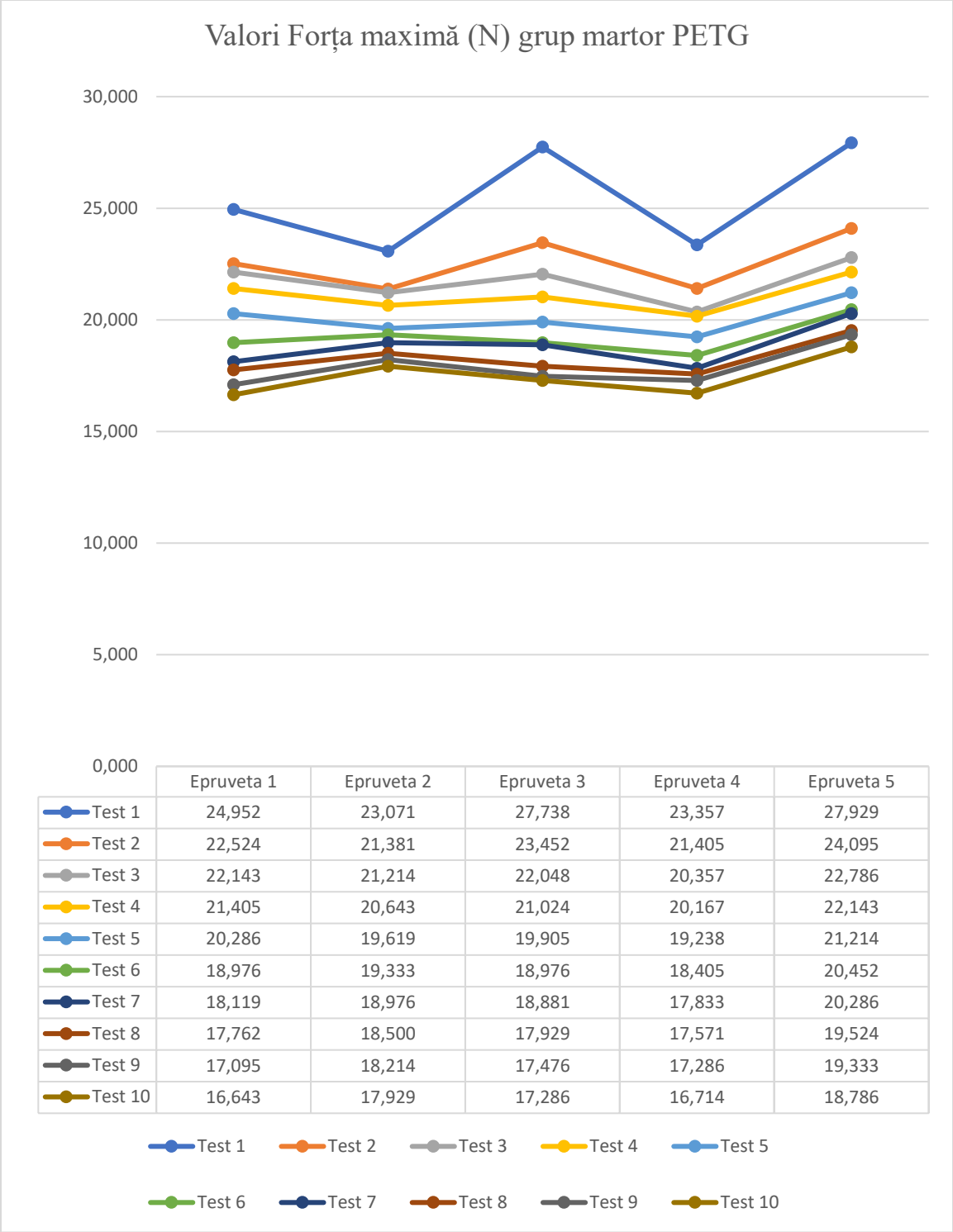
	Epruveta 1	Epruveta 2	Epruveta 3	Epruveta 4	Epruveta 5
Test 1	43,250	44,050	42,075	36,575	34,425
Test 2	35,425	35,425	31,600	31,575	31,300
Test 3	29,625	32,275	28,350	29,125	29,925
Test 4	28,450	29,725	25,200	27,275	26,875
Test 5	27,375	29,050	25,025	27,175	26,400
Test 6	26,000	27,275	24,525	26,100	25,125
Test 7	23,850	26,675	23,750	25,400	24,925
Test 8	23,450	25,500	22,850	24,925	24,150
Test 9	22,850	25,400	22,275	24,425	23,650
Test 10	22,475	22,575	22,175	24,025	22,375

Diagrama 6.1. Valori ale forței maxime pentru grupul martor PLA (N)



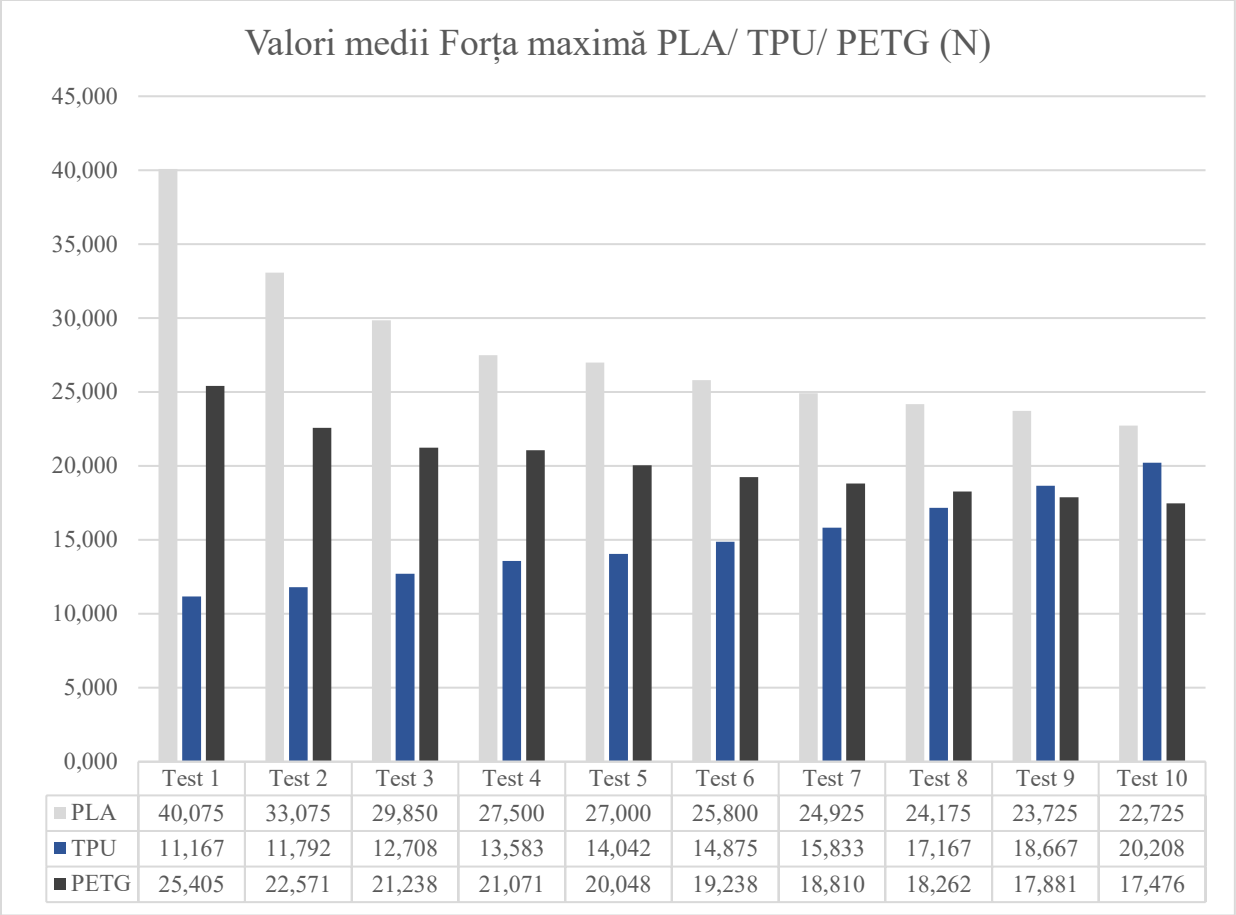
	Epruveta 1	Epruveta 2	Epruveta 3	Epruveta 4	Epruveta 5
Test 1	9,125	12,417	12,583	9,667	12,083
Test 2	11,083	12,583	12,917	9,792	12,583
Test 3	11,750	12,750	13,917	11,750	13,417
Test 4	13,417	13,875	14,208	12,750	13,583
Test 5	13,917	14,042	14,375	13,708	14,208
Test 6	15,042	14,375	15,042	15,375	14,542
Test 7	16,167	15,208	16,667	16,000	15,208
Test 8	17,958	17,167	17,500	16,167	17,000
Test 9	19,125	18,625	18,792	17,667	19,125
Test 10	21,083	19,792	20,417	19,292	20,417

Diagrama 6.2. Valori ale forței maxime pentru grupul martor TPU (N)



	Epruveta 1	Epruveta 2	Epruveta 3	Epruveta 4	Epruveta 5
Test 1	24,952	23,071	27,738	23,357	27,929
Test 2	22,524	21,381	23,452	21,405	24,095
Test 3	22,143	21,214	22,048	20,357	22,786
Test 4	21,405	20,643	21,024	20,167	22,143
Test 5	20,286	19,619	19,905	19,238	21,214
Test 6	18,976	19,333	18,976	18,405	20,452
Test 7	18,119	18,976	18,881	17,833	20,286
Test 8	17,762	18,500	17,929	17,571	19,524
Test 9	17,095	18,214	17,476	17,286	19,333
Test 10	16,643	17,929	17,286	16,714	18,786

Diagrama 6.3. Valori ale forței maxime pentru grupul martor PETG (N)



	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8	Test 9	Test 10
PLA	40,075	33,075	29,850	27,500	27,000	25,800	24,925	24,175	23,725	22,725
TPU	11,167	11,792	12,708	13,583	14,042	14,875	15,833	17,167	18,667	20,208
PETG	25,405	22,571	21,238	21,071	20,048	19,238	18,810	18,262	17,881	17,476

Diagrama 6.4. Analiza comparativă a valorilor medii ale forței maxime (N) pentru toate cele trei tipuri de filament: PLA, TPU și PETG**.**

6.5. Comportamentul mecanismului de clipsare în condiții de solicitare ciclică

Pentru evaluarea comportamentului sistemului de clipsare în condiții de utilizare repetată, epruvetele au fost supuse unor cicluri controlate de conectare–deconectare, urmate de testarea forței maxime necesare pentru declipsare. Această etapă a avut rolul de a evidenția modificările funcționale ale mecanismului după 10, 20 și 30 de solicitări controlate.

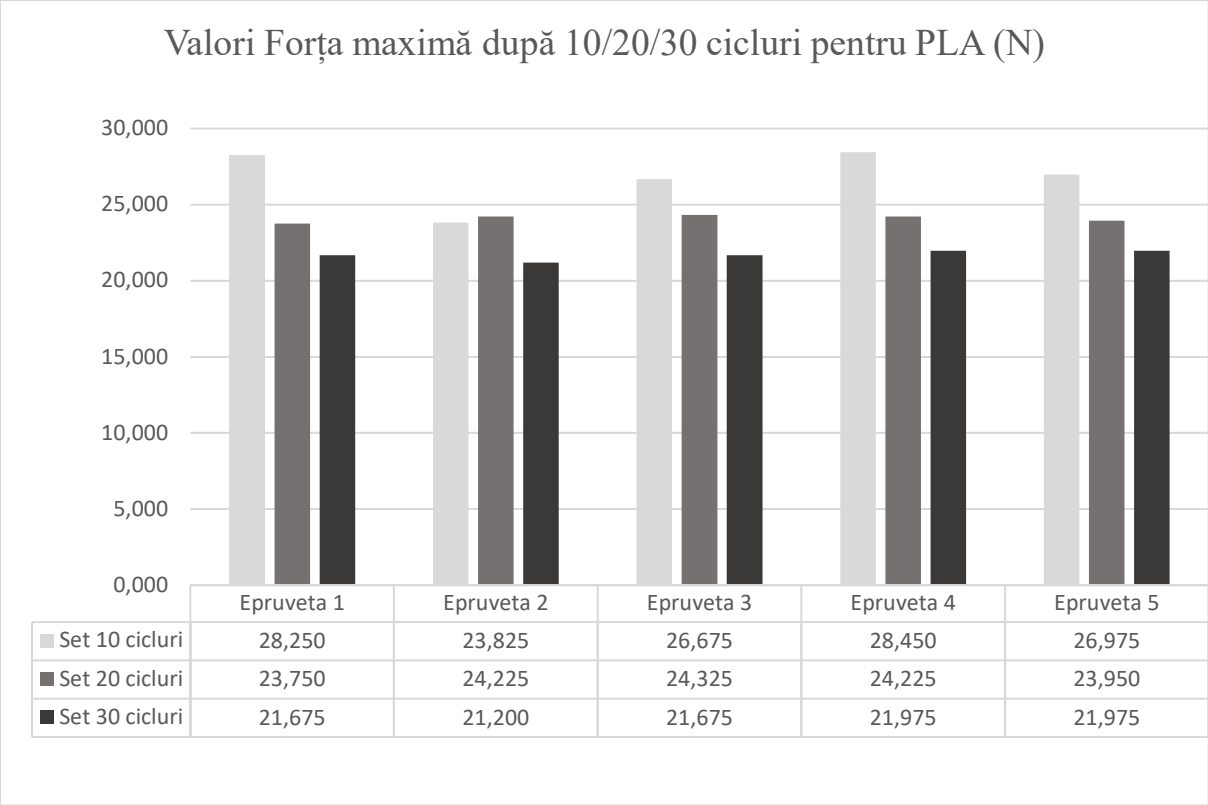
Pentru epruvetele din PLA, analiza curbelor sarcină–distanță evidențiază un comportament mecanic relativ stabil al mecanismului de clipsare, caracterizat printr-o creștere progresivă a sarcinii până la atingerea unui maxim, urmată de o scădere rapidă a forței odată cu declipsarea elementului de îmbinare. Forma generală a curbelor se menține similară pentru toate nivelurile de solicitare analizate, ceea ce indică faptul că mecanismul de clipsare își păstrează principiul de funcționare și stabilitatea geometrică a interacțiunii dintre elementele de îmbinare chiar și după solicitări repetate. Compararea valorilor forței maxime evidențiază însă o tendință de diminuare progresivă a rezistenței la declipsare odată cu creșterea numărului de cicluri mecanice. Pentru setul de epruvete testate după 10 cicluri, valorile forței maxime se situează în intervalul 23,825–28,450 N, pentru setul testat după 20 cicluri acestea scad la 23,750–24,325 N, iar în cazul epruvetelor supuse la 30 cicluri valorile se reduc suplimentar, situându-se în intervalul 21,200–21,975 N.

Pentru TPU, rezultatele evidențiază o creștere semnificativă a forței maxime între grupul testat după 10 cicluri și grupele testate după 20 și 30 de cicluri, confirmând faptul că solicitarea

repetată a mecanismului nu a determinat o reducere a capacității de retenție, ci o creștere a acesteia. Trecerea de la 10 la 20 de cicluri este asociată cu cea mai importantă creștere a forței maxime, în timp ce diferențele dintre 20 și 30 de cicluri sunt mai reduse, sugerând apropierea de un regim de echilibru mecanic. Această tendință susține ipoteza conform căreia mecanismul de clipsare realizat din TPU parcurge o etapă inițială de stabilizare și adaptare mecanică, în care contactul dintre elementele de îmbinare devine mai eficient în urma solicitărilor repetate.

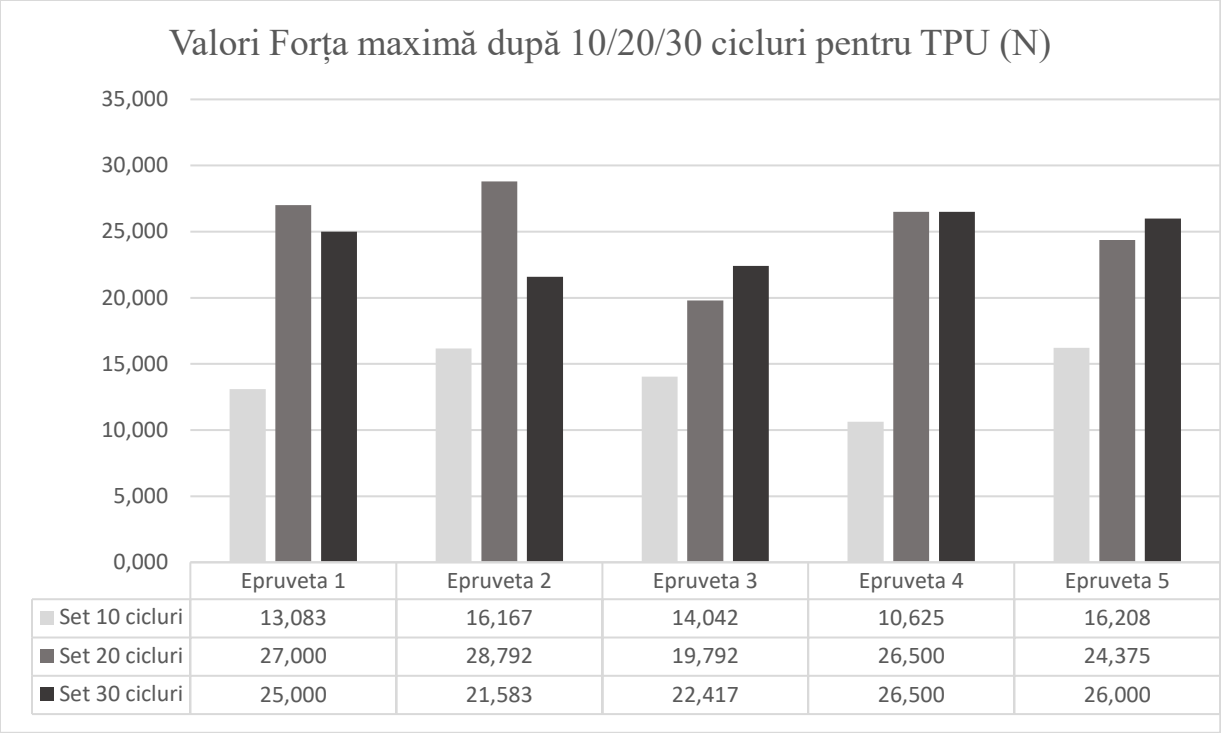
Pentru PETG, rezultatele arată că solicitarea ciclică afectează negativ comportamentul mecanismului de clipsare, conducând la reducerea graduală a forței de retenție. Pentru grupa testată după 10 cicluri, valorile forței maxime sunt cuprinse între 17 N și 19 N. Din punct de vedere interpretativ, tendința rămâne aceeași: după 20 de cicluri se observă o reducere a capacității de retenție pentru majoritatea epruvetelor, iar după 30 de cicluri valorile scad suplimentar, confirmând diminuarea performanței mecanismului sub efectul solicitărilor repetate. Prin urmare, în cazul PETG, comportamentul mecanismului de clipsare sub solicitare ciclică indică o diminuare progresivă a performanței funcționale, fapt ce limitează adecvarea acestui material pentru sisteme de îmbinare destinate unor utilizări repetate și frecvente.

Valorile maxime ale forței necesare pentru declipsarea mecanismului după 10, 20 și 30 de solicitări controlate sunt prezentate în Diagramele 6.5–6.7, iar analiza comparativă în funcție de material este prezentată în Diagrama 6.8.



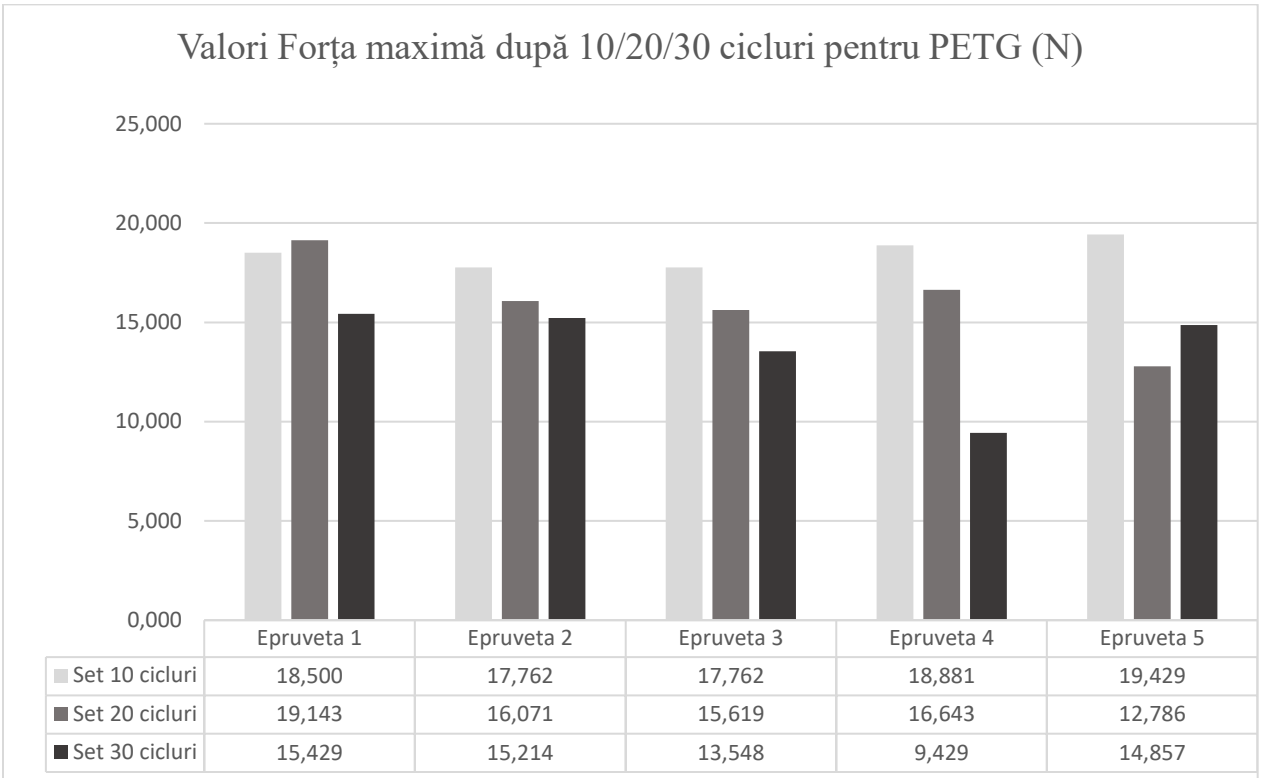
	Epruveta 1	Epruveta 2	Epruveta 3	Epruveta 4	Epruveta 5
Set 10 cicluri	28,250	23,825	26,675	28,450	26,975
Set 20 cicluri	23,750	24,225	24,325	24,225	23,950
Set 30 cicluri	21,675	21,200	21,675	21,975	21,975

Diagrama 6.5. Valorile maxime ale forței necesare pentru declipsarea mecanismului pentru fiecare dintre cele cinci epruvete din PLA testate după 10, 20 și 30 de solicitări controlate (N)



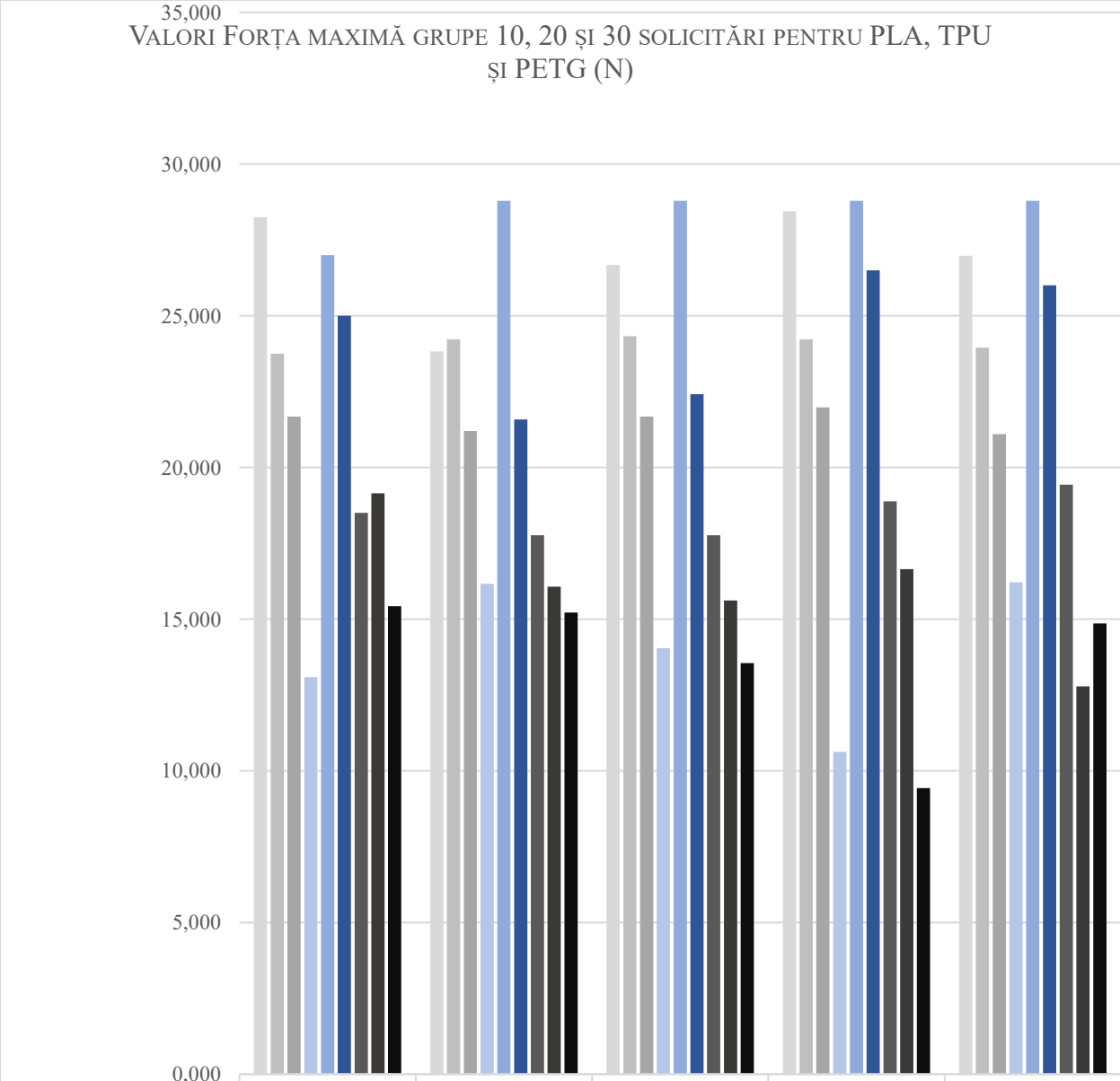
	Epruveta 1	Epruveta 2	Epruveta 3	Epruveta 4	Epruveta 5
Set 10 cicluri	13,083	16,167	14,042	10,625	16,208
Set 20 cicluri	27,000	28,792	19,792	26,500	24,375
Set 30 cicluri	25,000	21,583	22,417	26,500	26,000

Diagrama 6.6. Valorile maxime ale forței necesare pentru declipsarea mecanismului pentru fiecare dintre cele cinci epruvete din TPU testate după 10, 20 și 30 de solicitări controlate (N)



	Epruveta 1	Epruveta 2	Epruveta 3	Epruveta 4	Epruveta 5
Set 10 cicluri	18,500	17,762	17,762	18,881	19,429
Set 20 cicluri	19,143	16,071	15,619	16,643	12,786
Set 30 cicluri	15,429	15,214	13,548	9,429	14,857

Diagrama 6.7. Valorile maxime ale forței necesare pentru declipsarea mecanismului pentru fiecare dintre cele cinci epruvete din PETG testate după 10, 20 și 30 de solicitări controlate (N)



	EPRUVETA 1	EPRUVETA 2	EPRUVETA 3	EPRUVETA 4	EPRUVETA 5
PLA 10 SOLICITĂRI	28,250	23,825	26,675	28,450	26,975
PLA 20 SOLICITĂRI	23,750	24,225	24,325	24,225	23,950
PLA 30 SOLICITĂRI	21,675	21,200	21,675	21,975	21,100
TPU 10 SOLICITĂRI	13,083	16,167	14,042	10,625	16,208
TPU 20 SOLICITĂRI	27,000	28,792	28,792	28,792	28,792
TPU 30 SOLICITĂRI	25,000	21,583	22,417	26,500	26,000
PETG 10 SOLICITĂRI	18,500	17,762	17,762	18,881	19,429
PETG 20 SOLICITĂRI	19,143	16,071	15,619	16,643	12,786
PETG 30 SOLICITĂRI	15,429	15,214	13,548	9,429	14,857

Diagrama 6.8. Analiza comparativă a comportamentului mecanismului de clipsare pentru grupele de 10, 20 și 30 solicitări în funcție de materialul utilizat: PLA, TPU și PETG (N)

6.6. Concluzii

Capitolul VI a aprofundat analiza structurilor modulare deschise, concentrându-se asupra comportamentului fizico-mecanic al sistemului de clipsare/detașare al structurii „Flat fabric”. Acest capitol are o importanță deosebită pentru validarea conceptului de produs modular, deoarece sistemul de îmbinare reprezintă elementul care permite asamblarea, dezasamblarea, repararea și reconfigurarea produsului. În absența unui mecanism de conectare suficient de stabil, avantajele teoretice ale modularității nu pot fi transferate în practică.

Analiza teoretică și experimentală a mecanismelor „snap-fit” a evidențiat faptul că performanța sistemului de clipsare depinde de geometria conectorului, proprietățile materialului, toleranțele rezultate prin imprimare, orientarea straturilor și comportamentul la solicitări repetate. Testarea forței de declipsare/clipsare a permis evaluarea rezistenței inițiale a sistemului, iar testarea ciclică a oferit informații privind degradarea performanței după repetarea operațiunilor de cuplare și decuplare.

Rezultatele obținute au arătat că PLA conferă mecanismului de clipsare o retenție inițială ridicată, dar și o tendință de reducere a forței necesare pentru declipsare după solicitări repetate. TPU prezintă o rezistență inițială mai redusă, dar un comportament de stabilizare și creștere a retenției după solicitare, ceea ce sugerează o adaptare mecanică favorabilă a sistemului de îmbinare. PETG are un comportament intermediar la nivel inițial, dar sub solicitare ciclică evidențiază o diminuare progresivă a performanței funcționale.

O concluzie majoră a capitolului este că viabilitatea structurilor modulare deschise nu poate fi apreciată doar prin forța maximă de declipsare, ci trebuie evaluată prin raportare la retenția mecanică după cicluri repetate, la modificările geometrice ale conectorilor, la apariția uzurii, la modul de degradare și la capacitatea sistemului de a rămâne funcțional. Această perspectivă este fundamentală pentru aplicațiile vestimentare, unde produsul nu este supus unei singure solicitări extreme, ci unor utilizări repetate, manipulări succesive și adaptări în timp.

Prin această abordare, cercetarea a depășit analiza statică a structurilor modulare și a introdus o dimensiune funcțională esențială: comportamentul în utilizare repetată. Rezultatele contribuie la dezvoltarea unei metodologii de verificare a fiabilității sistemelor „snap-fit” imprimate 3D pentru aplicații configurabile și oferă repere pentru optimizarea ulterioară a geometriei, toleranțelor și selecției materialelor.

CAPITOLUL VII – TRANSPUNEREA SISTEMELOR MODULARE ÎN ANSAMBLURI VESTIMENTARE CONFIGURABILE

După evaluarea experimentală a performanțelor mecanice și funcționale ale structurilor modulare imprimate 3D, următoarea etapă a cercetării vizează transpunerea acestora în ansambluri vestimentare configurabile, capabile să depășească statutul de demonstrație tehnică și să funcționeze ca suport pentru dezvoltarea unor produse cu relevanță estetică, constructivă și sustenabilă. În acest context, interesul nu mai este orientat exclusiv asupra comportamentului individual al modulului sau asupra rezistenței mecanismului de clipsare, ci asupra modului în care o infrastructură modulară validată poate fi utilizată pentru generarea unor suprafețe vestimentare complexe, reconfigurabile și adaptabile.

Capitolul urmărește investigarea relației dintre sistemul modular și forma vestimentară, prin analizarea modului în care unitățile constructive pot fi organizate într-o logică de ansamblu ce permite atât realizarea unui produs purtabil, cât și diversificarea sa ulterioară prin intervenții asupra structurii de bază. În această etapă, modularitatea este abordată nu doar ca soluție tehnică de asamblare, ci ca strategie de proiectare capabilă să susțină variabilitatea formală, adaptabilitatea funcțională și multiplicarea identităților vizuale ale aceluiași produs.

7.1. Fundamentarea alegerii studiului de caz

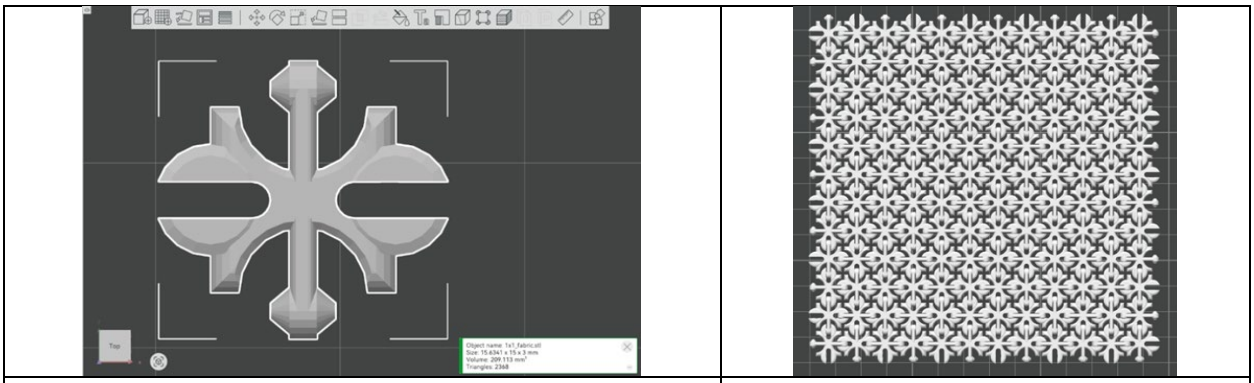
Pornind de la rezultatele obținute în capitolele anterioare, structura „Flat fabric” a fost selectată ca sistem modular de bază pentru etapa de transpunere vestimentară. Alegerea acestei structuri a fost fundamentată atât pe comportamentul mecanic observat în cadrul testelor de tracțiune, cât și pe stabilitatea sistemului de clipsare/detașare analizat în Capitolul VI. Spre deosebire de alte structuri modulare deschise, „Flat fabric” a evidențiat un comportament mai stabil al mecanismului de conectare, fără deteriorări structurale majore ale elementelor modulare sau ale punctelor de clipsare.

Alegerea unui top fără mâneci ca studiu de caz a fost determinată de necesitatea unui obiect vestimentar suficient de simplu pentru a permite controlul procesului de transpunere modulară, dar suficient de complex pentru a include principalele zone relevante ale modelării vestimentare: răscroiala gâtului, răscroiala mânecii, linia umărului, terminația inferioară și zonele de modelare locală asociate bustului și spatelui.

7.2. Arhitectura sistemului modular și logica de asamblare

Sistemul modular utilizat în cadrul studiului are la bază modulul standard al structurii „Flat fabric”, preluat ca unitate constructivă de bază. Acesta funcționează ca element repetitiv care poate fi conectat cu alte module identice, generând suprafețe plane extinse. Logica sistemului se bazează pe compatibilitatea geometrică dintre module, pe continuitatea suprafeței și pe posibilitatea extinderii ansamblului prin conectare succesivă.

Modulul standard utilizat ca unitate constructivă de bază a sistemului modular este prezentat în Figura 7.1 (a). Prin agregarea modulelor standard a fost obținut un panou modular cu dimensiunea de 12 × 12 module, respectiv 144 de module. Acest panou a funcționat ca unitate intermediară între modulul individual și ansamblul vestimentar, permițând organizarea mai eficientă a suprafeței și simplificarea procesului de asamblare. Aspectul panoului modular este prezentat în Figura 7.1 (b).



a b

Figura 7.1. Modulul standard utilizat ca unitate constructivă de bază a sistemului modular (a) și aspectul panoului modular, 12 × 12 module (b)

În această etapă, sistemul modular este înțeles ca o infrastructură deschisă, alcătuită din unități compatibile între ele, care pot fi combinate, extinse, înlocuite sau reorganizate fără a impune reproiectarea integrală a produsului. O asemenea abordare este relevantă pentru designul vestimentar contemporan, în condițiile în care presiunile asociate hiperproducției, uniformizării estetice și obsolescenței accelerate reclamă modele alternative de concepție și utilizare a produsului de modă.

7.3. Transpunerea sistemului modular în tipar vestimentar

Procesul de lucru a integrat utilizarea mai multor medii digitale, fiecare având un rol distinct în definirea formei vestimentare, în conturarea reperelor și în generarea pieselor modulare compatibile cu acestea. Prin această abordare, tiparul vestimentar a devenit matricea geometrică pe baza căreia infrastructura modulară a fost reorganizată și extinsă.

În vederea dezvoltării unei configurații vestimentare adaptate corpului, a fost realizat un tipar de bază pentru un produs de tip top, utilizând programul Gemini CAD. Tiparul a fost construit în variantă completă, pentru față și spate, apoi a fost redus la jumătăți de produs, valorificând simetria bilaterală a configurației. Această alegere a permis simplificarea procesului de prelucrare digitală și a redus complexitatea operațiilor ulterioare de suprapunere și adaptare a suprafeței modulare. Tiparul de bază al produsului vestimentar și reperele reduse la jumătăți de produs sunt prezentate în Figura 7.2.

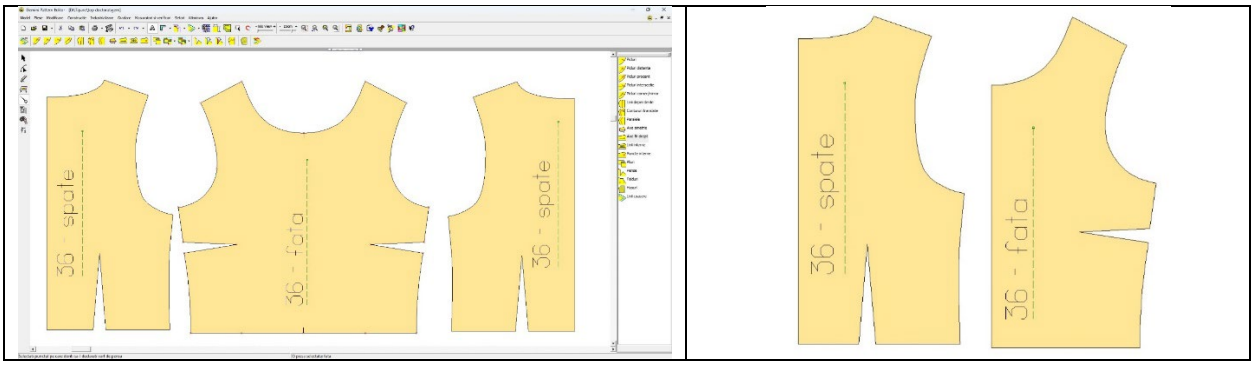
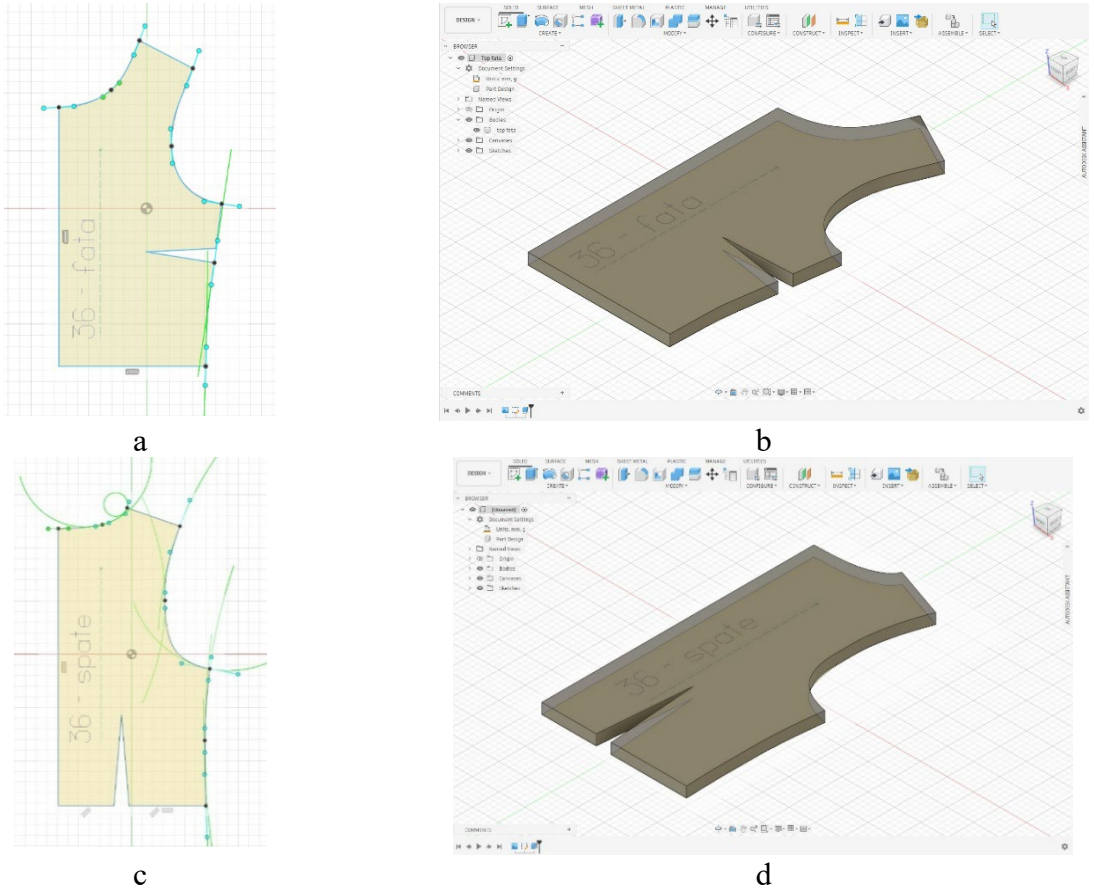


Figura 7.2. Tiparul de bază al produsului vestimentar și reperele reduse la jumătăți de produs, utilizate ca suport geometric pentru transpunerea modulară

După construirea tiparului în Gemini CAD, reperele au fost importate în Autodesk Fusion, unde au fost utilizate ca suport geometric de tip canvas. Contururile reperelor au fost urmărite digital, iar suprafața modulară a fost raportată la aceste limite pentru a permite generarea unor piese compatibile cu forma produsului. Importul tiparului vestimentar și transpunerea reperelor față și spate în geometrie modulară sunt sintetizate în Figura 7.3.



a b c d

Figura 7.3. Importul tiparului vestimentar în Autodesk Fusion și transpunerea reperelor față (a, b) și spate (c,d) în geometrie modulară

În continuarea procesului, au fost analizate zonele critice ale produsului vestimentar: linia umărului, răscroiala gâtului, răscroiala mânecii și zonele de modelare asociate penselor. Aceste zone au impus adaptări locale ale suprafeței modulare și dezvoltarea unor piese specializate, destinate marginilor, contururilor și compatibilizării geometrice a rețelei modulare cu forma tiparului.

Prin introducerea acestor piese și intervenții locale, biblioteca modulară este extinsă de la o logică bazată predominant pe repetiția unei unități standard la o infrastructură capabilă să răspundă diferențiat contururilor, marginilor și variațiilor locale de volum. În acest sens, sistemul modular nu mai funcționează doar ca suport pentru o suprafață repetitivă, ci ca instrument de modelare vestimentară adaptativă. Adaptarea locală a suprafeței modulare în zonele de contur și în zona penselor este prezentată în Figura 7.4.

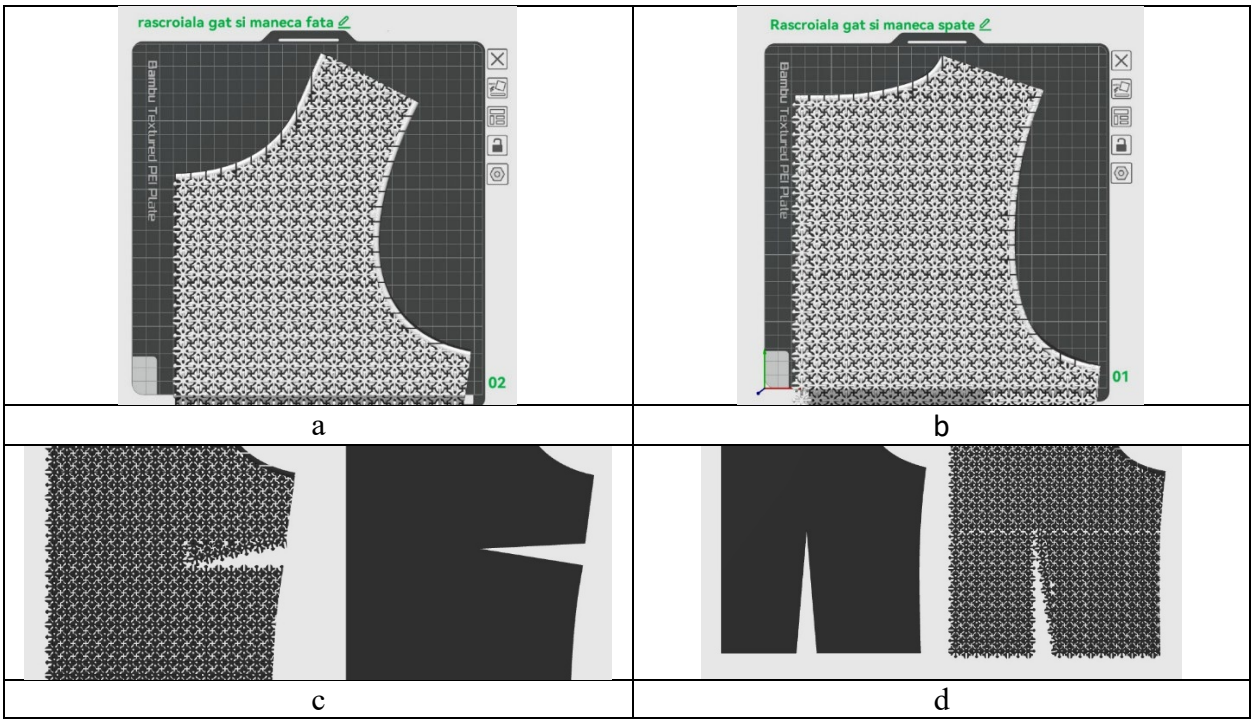


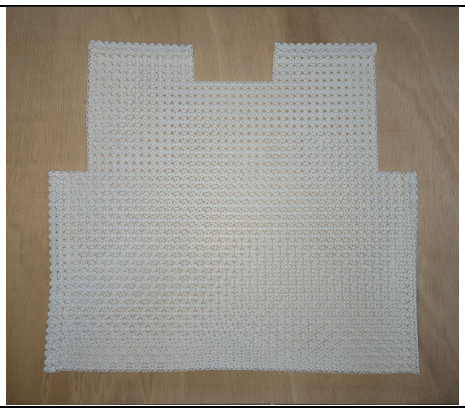
Figura 7.4. Configurații modulare derivate pentru zonele de răscroială gât și mânecă la față (a) și spate (b) precum și detalii privind adaptarea locală a suprafeței modulare în zona penselor la față (c) și spate (d)

7.4. Configurații vestimentare rezultate și comparație evolutivă

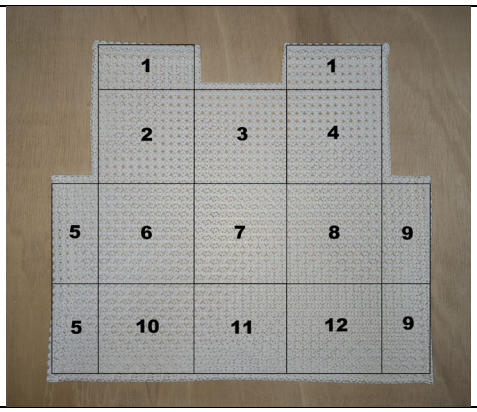
Aplicarea sistemului modular dezvoltat în cadrul cercetării a condus la realizarea a două configurații vestimentare succesive, utilizate pentru evaluarea modului în care infrastructura modulară poate fi transpusă într-un produs purtabil. Cele două variante nu reprezintă simple alternative formale, ci două etape distincte ale procesului de dezvoltare: o configurație inițială, bazată predominant pe agregarea panourilor standard, și o configurație derivată, adaptată geometric pe baza tiparului și a extinderii bibliotecii de piese.

Prima configurație vestimentară realizată în cadrul studiului a avut un caracter exploratoriu și a fost obținută prin agregarea unor panouri modulare standard, alcătuite din repetarea unității de bază în rețele regulate de 12 × 12 module. Panourile au funcționat ca subansambluri constructive, fiind articulate între ele pentru a genera o suprafață vestimentară de tip top. Această soluție a permis testarea fezabilității transpunerii structurii modulare la scară vestimentară și a demonstrat că repetarea controlată a aceleiași unități poate genera o configurație purtabilă. Configurația vestimentară inițială este prezentată în Figura 7.5.

Configurația vestimentară derivată a rezultat din adaptarea sistemului modular la tiparul de bază și din utilizarea pieselor specializate pentru zonele de contur, răscroială, umăr și modelare locală. Această variantă a permis o relație mai coerentă între suprafața modulară, forma produsului și corp, demonstrând că simpla agregare a modulelor standard nu este suficientă pentru rezolvarea tuturor cerințelor unui produs vestimentar. Configurația vestimentară derivată și comparația dintre cele două variante sunt prezentate în Figura 7.6.



a



b

Figura 7.5. Configurația vestimentară inițială realizată prin agregarea panourilor modulare standard



a



b



c



d

Configurația vestimentară inițială

Configurația vestimentară derivată

Figura 7.6. Analiza comparativă între configurația inițială vedere față (a), spate (c) și configurația derivată vedere față (b), spate (d)

Prin compararea celor două rezultate, devine posibilă evidențierea diferenței dintre o soluție modulară obținută prin repetare plană și o soluție modulară articulată, în care suprafața este reorganizată pentru a răspunde mai fidel contururilor vestimentare și relației cu corpul. Aspectele comparative esențiale sunt sintetizate în Tabelul 7.1.

Tabelul 7.1. Comparație între configurația inițială și configurația derivată

Criteriu	Configurația inițială	Configurația derivată
Tip de piese utilizate	Panouri modulare standard alcătuite prin repetarea unității de bază	Combinație între suprafață modulară derivată după conturul tiparului și piese specializate de contur și adaptare locală
Rezolvarea contururilor	Realizată în principal prin întreruperea rețelei standard și prin agregarea panourilor	Realizată prin integrarea unor elemente dedicate pentru rascroiala gâtului, rascroiala mânecii, terminații și linia umărului
Adaptare la corp	Limitată, cu dificultăți în zonele gâtului, umărului, subrațului și în ariile de modelare locală	Mai ridicată, datorită compatibilizării geometrice cu tiparul și tratării locale a zonelor de volum
Grad de finisare	Redus spre mediu, cu margini și contururi mai puțin controlate formal	Ridicat, cu margini mai clar definite și o integrare mai coerentă a contururilor vestimentare
Flexibilitate configurativă	Ridicată la nivel de agregare a panourilor, dar limitată în raport cu conturul produsului	Ridicată atât la nivel structural, cât și la nivel de adaptare geometrică și diversificare morfologică
Complexitate constructivă	Redusă spre medie, bazată predominant pe repetarea rețelei standard	Medie spre ridicată, prin integrarea pieselor derivate și a intervențiilor locale de compatibilizare

7.5. Diversificarea cromatică și potențialul configurativ

Capitolul analizează și potențialul de diversificare cromatică al sistemului modular, pornind de la premisa că aceeași infrastructură constructivă poate genera variante vizuale diferite, fără modificarea tiparului sau a arhitecturii de bază. Prin această dublă reprezentare, la nivel de panou modular și la nivel de ansamblu vestimentar purtat, se demonstrează că modulul funcționează simultan ca unitate structurală și ca unitate de expresie vizuală. Potențialul de diversificare cromatică al configurației vestimentare modulare este prezentat în Figura 7.7.

Redistribuirea cromatică a modulelor permite transformarea aceleiași configurații vestimentare într-un suport pentru motive vizuale distincte, fără modificarea tiparului sau a arhitecturii constructive. În acest context, desenul nu este o proprietate intrinsecă a modulului individual, ci un fenomen emergent, rezultat din relația dintre unități și din logica distribuirii culorilor în ansamblul rețelei.

Primele variante analizate includ desene/ motive geometrice și direcționale, precum dungi orizontale, dungi verticale și model în carouri. Aceste exemple demonstrează că aceeași infrastructură modulară poate susține atât ritmuri vizuale simple, bazate pe alternanță liniară, cât și compoziții mai complexe, rezultate din suprapunerea mai multor direcții de organizare cromatică. Exemplele de modele cromatice și configurații geometrice sunt prezentate în Figura 7.8.



Figura 7.7. Potențialul de diversificare cromatică al configurației vestimentare modulare



a) Dungi orizontale

b) Dungi verticale

c) Model în carouri

Figura 7.8. Variante de diversificare cromatică prin motive liniare și geometrice: dungi orizontale (a), dungi verticale (b) și model în carouri (c)

Alături de motivele geometrice, au fost explorate și compoziții figurative, în care distribuția cromatică a modulelor urmărește transpunerea unei imagini într-o logică discretizată. Acest tip de configurație evidențiază atât potențialul expresiv al sistemului, cât și limitele sale, în special în ceea ce privește redarea detaliilor curbe și a tranzițiilor fine. Rezultatul capătă un aspect apropiat de logica pixelării, ceea ce nu trebuie interpretat ca limită exclusiv negativă, ci și ca specificitate formală a sistemului modular. Variantele configurative inspirate de compoziții geometrice, figurative și artistice sunt prezentate în Figura 7.9.



a b c

Figura 7.9. Variante configurative obținute prin distribuția controlată a modulelor colorate: motiv geometric inspirat de Piet Mondrian (a), motiv figurativ inspirat din universul vizual al jocurilor video de tip voxel/pixel-art (b) și motiv inspirat de compozițiile lui Paul Klee (c)

Analiza comparativă a variantelor generate evidențiază faptul că sistemul modular permite o diversificare semnificativă a expresiei vestimentare fără modificarea infrastructurii constructive de bază. Variabilele cromatice și modul de organizare a modulelor devin astfel principalii vectori de diferențiere vizuală, în timp ce forma generală a produsului rămâne constantă. Aspectele comparative esențiale ale variantelor analizate sunt sintetizate în Tabelul 7.2.

Tabelul 7.2. Analiza comparativă a variantelor configurative generate prin sistemul modular

Varianta configurativă	**Principiul compozițional**	**Complexitate vizuală**	**Lizibilitate a motivului**	**Grad de control al distribuției cromatice**	**Impact estetic**	**Observații**
Configurație monocromă	Uniformitate cromatică pe întreaga suprafață	Redusă	Foarte ridicată la nivel structural	Redus	Sobru, coerent, pune în valoare textura modulară	Evidențiază clar rețeaua modulară și logica repetitivă a sistemului
Pattern-uri geometrice în carouri	Intersecția controlată a benzilor verticale și orizontale	Medie spre ridicată	Ridicată	Mediu spre ridicat	Echilibrat, ordonat, decorativ	Susține bine compoziții regulate și variații cromatice multiple fără pierderea claritățiii
Variantă inspirată de Piet Mondrian	Organizare geometrică bazată pe câmpuri	Ridicată	Ridicată	Ridicat	Grafic, modernist, puternic recognoscibil	Demonstrează compatibilitatea sistemului modular cu

	rectangulare și contraste cromatice puternice					compoziții riguroase și limbaje plastice ordonate
Variantă inspirată din universul voxel/pixel-art	Construirea unui motiv figurativ prin unități discrete de culoare	Ridicată	Medie spre ridicată, dependentă de scară și rezoluție	Ridicat	Ludic, contemporan, expresiv	Evidențiază foarte bine caracterul discret și „pixelat” al sistemului modular
Variantă inspirată de compozițiile lui Paul Klee	Organizare artistică liberă, bazată pe relații între suprafețe colorate, ritm și forme simplificate	Ridicată	Medie	Ridicat	Poetic, artistic, compozițional	Extinde sistemul către o zonă de expresivitate mai liberă, mai puțin dependentă de repetiția strictă

7.6. Potențialul combinatoric al sistemului modular

În continuarea analizei diversificării cromatice, capitolul abordează potențialul combinatoric al sistemului modular. În acest context, problema diversificării depășește nivelul observației vizuale și reclamă o formulare mai generală, capabilă să exprime amploarea spațiului configurativ pe care sistemul îl deschide.

Analiza combinatorică evidențiază faptul că numărul variantelor posibile crește exponențial în funcție de numărul modulelor și de numărul variantelor cromatice disponibile. Astfel, același produs poate genera un număr foarte mare de configurații posibile, fără ca structura de bază să fie modificată. Această caracteristică susține ideea că modularitatea permite diversificarea produsului prin reorganizare și variație controlată, nu prin multiplicarea completă a obiectelor vestimentare. Relația dintre numărul de variante cromatice disponibile pentru un modul și numărul total de configurații posibile în modelul teoretic la nivel de modul, pentru topul realizat din 24 de panouri (n=3456 module) este prezentată în Figura 7.10.

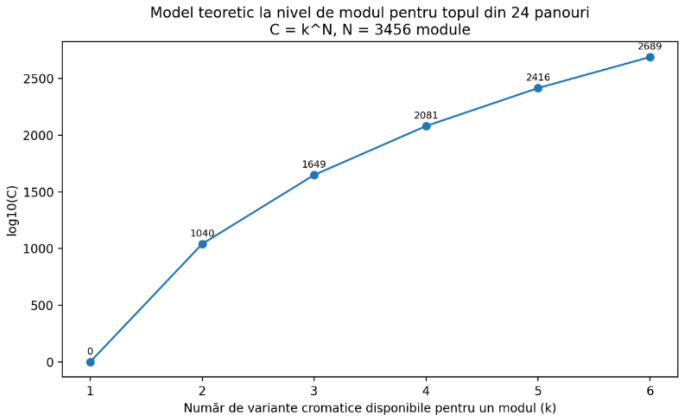


Figura 7.10. Relația dintre numărul de variante cromatice disponibile pentru un modul și numărul total de configurații posibile în modelul teoretic la nivel de modul, pentru topul realizat din 24 de panouri (n=3456 module)

Capitolul compară mai multe niveluri de organizare cromatică: la nivel de modul individual, la nivel de panou, la nivel de zone verticale și la nivel de blocuri mari. Această analiză permite diferențierea între un model teoretic, cu un potențial combinatoric foarte mare, și un model aplicat, mai controlabil din punct de vedere compozițional și mai relevant pentru practica de design. Comparația între nivelurile de organizare cromatică ale sistemului modular este prezentată în Figura 7.11.

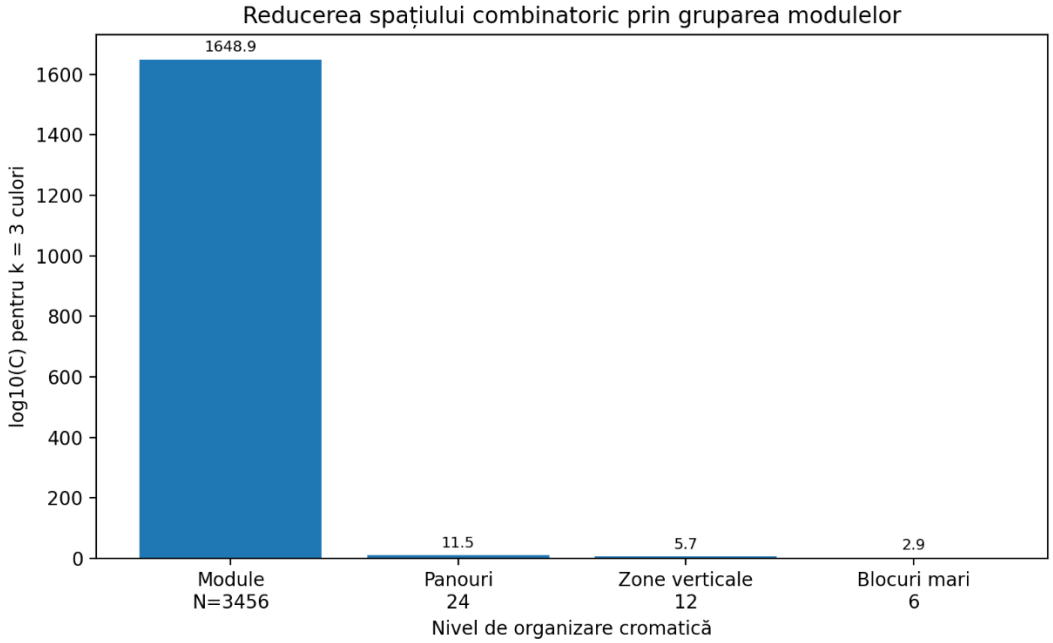


Figura 7.11. Comparație între nivelurile de organizare cromatică ale sistemului modular

7.7. Analiză critică, limite și direcții de dezvoltare

Analiza critică a transpunerii sistemului modular în ansambluri vestimentare configurabile evidențiază atât potențialul, cât și limitele actuale ale soluției propuse. Din perspectiva potențialului, sistemul modular permite generarea unei structuri vestimentare configurabile, în care forma, suprafața și expresia cromatică pot fi modificate fără reproiectarea integrală a produsului. Această caracteristică este relevantă pentru designul sustenabil, deoarece sugerează posibilitatea diversificării estetice fără multiplicarea completă a produselor.

În același timp, capitolul identifică limite importante ale transpunerii modulare. Acestea includ adaptarea la suprafețele curbe ale corpului, greutatea produsului, timpul de imprimare și asamblare, confortul la purtare și necesitatea testării cu utilizatori reali. Aceste limite nu invalidează cercetarea, ci indică etapele necesare pentru dezvoltări ulterioare.

Direcțiile de dezvoltare vizează optimizarea geometriei modulelor, reducerea greutății, diversificarea materialelor utilizate, îmbunătățirea confortului la purtare, dezvoltarea unei biblioteci mai ample de piese specializate și testarea produsului în condiții reale de utilizare. Totodată, extinderea aplicațiilor către alte tipuri de produse vestimentare ar permite verificarea flexibilității reale a metodologiei de transpunere tipar–modularitate.

7.8. Concluzii

Capitolul VII a realizat trecerea de la nivelul structurii și al epruvetei la nivelul produsului vestimentar configurabil. Pe baza rezultatelor experimentale și a potențialului constructiv al structurii „Flat fabric", cercetarea a investigat modul în care un sistem modular imprimat 3D poate fi transpus într-un ansamblu vestimentar.

Un rezultat important al capitolului este demonstrarea faptului că simpla agregare a modulelor standard permite obținerea unor suprafețe modulare la scară mai mare, dar nu este suficientă pentru rezolvarea tuturor cerințelor unui produs vestimentar. Transpunerea modularității pe tipar a impus dezvoltarea unei biblioteci de piese specializate, destinate zonelor de contur, adaptării locale și compatibilizării rețelei modulare cu forma produsului. Această etapă a permis trecerea de la o logică de repetiție plană la o logică de adaptare geometrică, în care sistemul modular devine compatibil cu exigențele modelării vestimentare.

Capitolul a evidențiat totodată potențialul configurativ și cromatic al sistemului modular. Prin utilizarea aceleiași infrastructuri constructive, produsul poate genera variante vizuale diferite, fără ca întreaga structură să fie reproiectată sau refabricată. Această caracteristică este relevantă pentru designul sustenabil, deoarece sugerează posibilitatea diversificării estetice fără multiplicarea completă a produselor.

Privită în ansamblu, transpunerea sistemului modular într-un produs vestimentar confirmă faptul că structurile modulare imprimate 3D pot funcționa ca sisteme tehnice și proiective, nu doar ca forme experimentale. Rezultatele obținute indică faptul că modularitatea poate contribui la dezvoltarea unor produse vestimentare configurabile, în măsura în care este susținută de selecția adecvată a materialului, de optimizarea geometriei modulelor, de stabilitatea mecanismelor de îmbinare și de o metodologie de transpunere compatibilă cu logica tiparului vestimentar.

CAPITOLUL VIII – CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

8.1. Concluzii generale

Prezenta teză de doctorat a urmărit investigarea relației dintre designul sustenabil, fabricația aditivă și sistemele modulare aplicate în designul vestimentar, pornind de la premisa că dezvoltarea unor structuri configurabile, reparabile și reconfigurabile poate constitui o direcție relevantă pentru reconsiderarea produsului vestimentar contemporan. Cercetarea a fost construită la intersecția dintre inginerie, design și sustenabilitate, propunând o abordare în care imprimarea 3D nu este tratată exclusiv ca tehnologie de prototipare, experiment formal sau soluție decorativă, ci ca instrument pentru dezvoltarea unor structuri modulare capabile să susțină performanța tehnică, flexibilitatea de utilizare, diversificarea estetică și posibilitatea de intervenție asupra produsului în timp.

Demersul doctoral a pornit de la constatarea faptului că moda contemporană se află într-o tensiune profundă între nevoia de reînnoire estetică rapidă, logica hiperproducției și imperativele sustenabilității. În acest context, designul vestimentar sustenabil nu poate fi redus la înlocuirea punctuală a materialelor sau la adoptarea unor tehnologii considerate, în mod generic, mai eficiente, ci presupune o regândire a modului în care produsul este conceput, fabricat, utilizat, reparat, reconfigurat și eventual reintegrat în alte cicluri de utilizare. Din această perspectivă, modularitatea a fost analizată ca principiu de proiectare capabil să deplaseze accentul de la produsul fix, închis și dificil de modificat către produsul deschis, alcătuit din componente compatibile, susceptibile de a fi reorganizate, înlocuite sau adaptate.

În Introducerea tezei au fost definite cadrul problematic, scopul cercetării, obiectivele specifice și întrebările de cercetare care au ghidat întregul parcurs doctoral. Cercetarea a fost formulată ca investigație asupra potențialului structurilor modulare imprimate 3D de a funcționa ca structuri vestimentare configurabile, nu doar ca suprafețe experimentale sau decorative. A fost stabilită astfel direcția generală a tezei: de la fundamentarea teoretică a designului sustenabil și a modularității, la analiza critică a greenwashingului, la formularea unui cadru integrat de tip multi-design, la identificarea și testarea fizico-mecanică a structurilor modulare și, în final, la transpunerea acestora într-un produs vestimentar configurabil.

Capitolul I a avut rolul de a construi cadrul teoretic și de a poziționa cercetarea în raport cu stadiul actual al cunoașterii privind designul sustenabil în industria modei. Analiza riguroasă a evidențiat faptul că sustenabilitatea în modă reprezintă un domeniu interdisciplinar, care implică nu doar aspecte materiale sau tehnologice, ci și dimensiuni culturale, economice, sociale și sistemice. Capitolul a clarificat conceptele fundamentale de design, modă și sustenabilitate, a urmărit evoluția istorică a abordărilor sustenabile în designul vestimentar și a analizat principalele modele teoretice dominante, precum designul pentru sustenabilitate, eco-designul, economia circulară, gândirea bazată pe ciclul de viață, designul pentru longevitate, designul participativ și strategiile de personalizare. O concluzie importantă a acestui capitol este că designul sustenabil nu poate fi înțeles ca intervenție izolată, ci ca proces de integrare a mai multor niveluri de decizie: material, produs, utilizare, relație cu utilizatorul și sistem de producție.

Prin taxonomia strategiilor de design sustenabil analizate în Capitolul I, cercetarea a evidențiat faptul că fiecare strategie adresează doar parțial problema sustenabilității. Alegerea materialelor cu impact redus, durabilitatea fizică, reparabilitatea, personalizarea, modularitatea, reciclabilitatea sau digitalizarea pot contribui la reducerea impactului negativ al industriei modei,

dar nu produc, în mod izolat, o transformare suficientă. Din acest motiv, s-a formulat necesitatea unei abordări integrate, capabile să conecteze dimensiunea conceptuală a sustenabilității cu verificarea tehnică a soluțiilor propuse. Această concluzie a fundamentat ulterior dezvoltarea cadrului multi-design.

Capitolul II a extins analiza teoretică prin investigarea critică a fenomenului de greenwashing în industria modei. Analiza a arătat că greenwashingul nu reprezintă doar o practică de comunicare înșelătoare, ci o problemă structurală a unui sistem industrial în care presiunea de a părea sustenabil poate depăși transformarea efectivă a practicilor de producție, distribuție și consum. Au fost analizate tipologii și mecanisme ale greenwashingului, formele sale vizuale, simbolice, materiale și discursive, precum și efectele asupra consumatorilor, asupra pieței și asupra credibilității inițiativelor autentice de sustenabilitate.

O concluzie esențială a Capitolului II este că sustenabilitatea nu poate rămâne la nivelul declarațiilor, al etichetelor sau al imaginii de brand, ci trebuie să fie susținută prin structuri, procese și mecanisme verificabile. În relație cu obiectivele tezei, această concluzie a avut un rol important, deoarece a justificat nevoia de a trata modularitatea și fabricația aditivă nu ca simple soluții estetice sau tehnologice, ci ca posibile mecanisme de verificare a unor afirmații legate de durabilitate, reparabilitate, reconfigurare și utilizare extinsă. Prin urmare, Capitolul II a creat legătura critică dintre discursul despre sustenabilitate și necesitatea validării tehnice.

Capitolul III a formulat cadrul conceptual central al cercetării: multi-designul ca strategie integrată pentru dezvoltarea structurilor modulare imprimate 3D în contextul modei sustenabile. Acest cadru a fost construit pornind de la limitele strategiilor unidimensionale și de la necesitatea corelării mai multor direcții de intervenție: modularitatea, fabricația aditivă, dimensiunea relațională a designului și validarea tehnică. În acest cadru, modularitatea a fost înțeleasă ca infrastructură structurală pentru reconfigurare, reparare și circularitate; fabricația aditivă ca facilitator tehnologic pentru materializarea unor geometrii complexe și sisteme de interconectare integrate; designul participativ ca posibilă direcție de consolidare a relației dintre utilizator și produs; iar validarea tehnică drept condiție necesară pentru evitarea unor afirmații nefundamentate de sustenabilitate.

Cadrul multi-design propus în Capitolul III a permis poziționarea cercetării dincolo de o simplă testare a unor mostre imprimate 3D. El a oferit o logică de ansamblu prin care structurile modulare pot fi evaluate simultan ca obiecte tehnice, sisteme de design și posibile infrastructuri pentru produse vestimentare configurabile. Una dintre concluziile importante ale capitolului este că o abordare sustenabilă credibilă trebuie să fie verificabilă: să poată demonstra, prin criterii observabile și măsurabile, că produsul permite dezasamblare, reconfigurare, înlocuire parțială, adaptare sau extindere a duratei de utilizare. Această poziție a orientat partea experimentală a tezei către testarea fizico-mecanică și către analiza comportamentului sistemelor de îmbinare.

Capitolul IV a introdus principiile fabricării aditive și a analizat tehnologiile de imprimare 3D relevante pentru domeniul modei, cu accent pe tehnologia FDM/FFF, datorită accesibilității, compatibilității cu materiale termoplastice diferite și posibilității de producere a unor structuri articulabile. În continuare, s-a realizat identificarea, clasificarea și selecția unui corpus de structuri modulare imprimate 3D, utilizate ca bază pentru etapa experimentală. Cele 19 structuri selectate au fost grupate în două categorii principale: 6 structuri modulare deschise, prevăzute cu sisteme de conectare/detașare, și 13 structuri modulare închise de tip zale. Selecția structurilor nu a fost arbitrară, ci s-a realizat pe baza unor criterii legate de disponibilitatea publică a modelelor digitale, regimul de licențiere compatibil cu utilizarea academică, relevanța pentru designul vestimentar modular, existența unui principiu constructiv clar, posibilitatea realizării prin imprimare 3D,

diversitatea geometrică și funcțională, potențialul de flexibilitate și conformare, potențialul de reconfigurare, reparare sau reutilizare și adaptabilitatea pentru epruvete experimentale. Prin urmare, Capitolul IV a avut un rol de tranziție între fundamentarea teoretică și etapa experimentală, transformând conceptele de modularitate și fabricație aditivă într-un corpus concret de structuri analizabile și testabile.

Capitolul V reprezintă nucleul experimental al tezei, prin studiul comportamentului fizico-mecanic al structurilor modulare imprimate 3D. Cele 19 structuri selectate au fost realizate din trei tipuri de filament – PLA, TPU și PETG – acoperind un spectru de comportamente mecanice de la rigid la flexibil. Pentru fiecare structură și fiecare material au fost realizate câte nouă epruvete, ceea ce a permis obținerea unei baze experimentale ample și comparabile. Testele au urmărit determinarea unor parametri relevanți pentru evaluarea comportamentului mecanic: forța maximă, rezistența la rupere raportată la lățime, alungirea și modulul lui Young.

O concluzie importantă a Capitolului V este că performanța structurilor modulare imprimate 3D nu depinde exclusiv de proprietățile materialului, ci de relația dintre material, geometria modulului, tipul de conexiune și modul de organizare a ansamblului. Structurile analizate nu se comportă ca materiale omogene, ci ca sisteme arhitecturate, în care deformarea este influențată de rotația modulelor, închiderea jocurilor dintre îmbinări, redistribuirea tensiunilor în rețea și modul de cedare al conectorilor. Această observație este deosebit de relevantă pentru domeniul designului vestimentar, deoarece confirmă faptul că evaluarea structurilor modulare nu poate fi făcută doar prin criterii vizuale sau estetice, ci necesită testare mecanică și interpretare funcțională.

Rezultatele obținute au evidențiat comportamente distincte ale celor trei materiale. Epruvetele realizate din PLA au oferit, în general, valori ridicate ale rigidității și ale forței maxime, dar au prezentat o tendință mai pronunțată către cedare fragilă în zonele de îmbinare. Eșantioanele din PETG au manifestat un comportament intermediar, combinând o rezistență relativ ridicată cu o anumită capacitate de deformare, dar rămânând vulnerabile la cedări locale în funcție de geometria structurii. Cele realizate din TPU au prezentat valori mai reduse ale forței maxime, dar au oferit o capacitate superioară de deformare și, în multe cazuri, un comportament mai compatibil cu logica structurilor flexibile și reconfigurabile, în special acolo unde cedarea s-a produs prin desprindere sau deformare, nu prin rupere ireversibilă. Aceste rezultate confirmă faptul că alegerea materialului trebuie făcută în raport cu funcția urmărită: rigiditate formală, flexibilitate, capacitate de deformare, siguranță la utilizare sau posibilitate de reconfigurare.

Capitolul V a demonstrat, de asemenea, utilitatea comparării mai multor tipuri de structuri și a mai multor standarde/adaptări de testare, întrucât structurile modulare se situează la intersecția dintre materiale polimerice imprimate 3D și structuri cu comportament apropiat de cel textil. Adaptarea epruvetelor a fost necesară pentru a conserva mecanismele de conectare și topologia structurală, evitând transformarea acestora în probe omogene care nu ar fi reflectat comportamentul real al sistemelor modulare. În această privință, cercetarea a contribuit la conturarea unei metodologii experimentale adecvate pentru analiza structurilor arhitecturate, în care forma, conexiunea și materialul funcționează împreună.

În Capitolul VI s-a aprofundat analiza unei structuri modulare deschise, concentrându-se asupra comportamentului fizico-mecanic al sistemului de clipsare/detașare. Acest capitol a avut o importanță deosebită pentru validarea conceptului de produs modular, deoarece sistemul de îmbinare reprezintă elementul care permite asamblarea, dezasamblarea, repararea și reconfigurarea produsului. În absența unui mecanism de conectare suficient de stabil, avantajele teoretice ale modularității nu pot fi transferate în practică.

Analiza teoretică și experimentală a mecanismelor "snap-fit" a evidențiat faptul că performanța sistemului de clipsare depinde de geometria conectorului, proprietățile materialului, toleranțele rezultate prin imprimare, orientarea straturilor și comportamentul la solicitări repetate. Testarea forței de declipsare/clipsare a permis evaluarea rezistenței inițiale a sistemului, iar testarea ciclică a oferit informații privind degradarea performanței după repetarea operațiunilor de cuplare și decuplare. Prin această abordare, cercetarea a depășit analiza statică a structurilor modulare și a introdus o dimensiune funcțională esențială: comportamentul în utilizare repetată.

O concluzie majoră a Capitolului VI este că viabilitatea structurilor modulare deschise nu poate fi apreciată doar prin forța maximă de declipsare, ci trebuie evaluată prin raportare la comportarea mecanică după cicluri repetate, la modificările geometrice ale conectorilor, la apariția uzurii, la modul de degradare și la capacitatea sistemului de a rămâne funcțional. Această perspectivă este fundamentală pentru aplicațiile vestimentare, unde produsul nu este supus unei singure solicitări extreme, ci unor utilizări repetate, manipulări succesive și adaptări în timp. Prin urmare, testarea ciclică a mecanismului de clipsare/detașare constituie una dintre contribuțiile metodologice importante ale tezei.

Capitolul VII a realizat trecerea de la nivelul structurii și al epruvetei la nivelul produsului vestimentar configurabil. Pe baza rezultatelor experimentale și a potențialului constructiv al structurii „Flat Fabric", cercetarea a investigat modul în care un sistem modular imprimat 3D poate fi transpus într-un ansamblu vestimentar. Alegerea unui top fără mâneci ca studiu de caz a fost justificată prin nivelul său intermediar de complexitate: suficient de simplu pentru controlul procesului de transpunere modulară, dar suficient de relevant pentru a include zone importante ale modelării vestimentare, precum răscroiala gâtului, răscroiala mânecii, linia umărului, zona bustului, linia taliei și terminația inferioară.

Un rezultat important al Capitolului VII este demonstrarea faptului că simpla agregare a modulelor standard permite obținerea unor suprafețe modulare la scară mai mare, dar nu este suficientă pentru rezolvarea tuturor cerințelor unui produs vestimentar. Transpunerea modularității pe tipar a impus dezvoltarea unei biblioteci de piese specializate, destinate zonelor de contur, adaptării locale și compatibilizării rețelei modulare cu forma produsului. Această etapă a permis trecerea de la o logică de repetiție plană la o logică de adaptare geometrică, în care sistemul modular devine compatibil cu exigențele modelării vestimentare.

Capitolul VII a evidențiat totodată potențialul configurativ și cromatic al sistemului modular. Prin utilizarea aceleiași infrastructuri constructive, produsul poate genera variante vizuale diferite, fără ca întreaga structură să fie reproiectată sau refabricată. Această caracteristică este relevantă pentru designul sustenabil, deoarece sugerează posibilitatea diversificării estetice fără multiplicarea completă a produselor. În același timp, capitolul a identificat și limitele actuale ale transpunerii modulare: adaptarea la suprafețele curbe ale corpului, greutatea produsului, timpul de imprimare și asamblare, confortul la purtare și necesitatea testării cu utilizatori reali. Aceste limite nu invalidează cercetarea, ci indică etapele necesare pentru dezvoltări ulterioare.

Privită în ansamblu, teza demonstrează că structurile modulare imprimate 3D pot fi abordate ca sisteme tehnice și proiective, nu doar ca forme experimentale. Rezultatele obținute indică faptul că modularitatea poate contribui la dezvoltarea unor produse vestimentare configurabile, în măsura în care este susținută de selecția adecvată a materialului, de optimizarea geometriei modulelor, de stabilitatea mecanismelor de îmbinare și de o metodologie de transpunere compatibilă cu logica tiparului vestimentar. Cercetarea nu afirmă că imprimarea 3D este, în sine, o soluție sustenabilă absolută, ci arată că, în anumite condiții de proiectare și validare, aceasta

poate susține mecanisme relevante pentru sustenabilitate: reconfigurarea, repararea, înlocuirea parțială, diversificarea controlată și extinderea duratei de utilizare.

O concluzie generală importantă este că sustenabilitatea în designul vestimentar trebuie discutată la nivel de sistem. Materialul, tehnologia, forma, modul de îmbinare, scenariul de utilizare și relația cu utilizatorul nu mai pot fi analizate separat. Un material considerat mai sustenabil poate deveni problematic dacă este folosit într-un produs rigid, nereparabil și cu durată scurtă de viață; în mod similar, o tehnologie inovatoare poate genera doar un efect formal dacă nu este integrată într-o logică de utilizare responsabilă. Prin urmare, contribuția tezei constă în propunerea și testarea unei abordări în care sustenabilitatea este legată de funcționarea efectivă a produsului și de capacitatea sa de a rămâne deschis modificării.

O altă concluzie este că modularitatea imprimată 3D aduce în designul vestimentar o schimbare de paradigmă: produsul nu mai este conceput ca obiect finit, ci ca sistem configurabil. Această schimbare are implicații asupra modului de proiectare, de producție și de utilizare. Designerul nu mai proiectează doar forma finală, ci și regulile de asamblare, compatibilitatea pieselor, scenariile de reconfigurare și posibilitatea intervenției ulterioare. În acest sens, sistemele modulare pot contribui la o relație mai flexibilă între produs și utilizator, oferind premise pentru personalizare, reparare și actualizare.

Din punct de vedere experimental, cercetarea confirmă necesitatea evaluării mecanice a structurilor modulare destinate aplicațiilor vestimentare. Fără testare, afirmațiile privind flexibilitatea, durabilitatea, reconfigurabilitatea sau sustenabilitatea rămân la nivel conceptual. Prin măsurarea forței maxime, a rezistenței raportate la lățime, a alungirii, a modulului lui Young, a forței de declipsare și a comportamentului ciclic, teza oferă o bază obiectivă pentru compararea structurilor și materialelor. Această abordare este importantă mai ales în contextul prevenirii greenwashingului, deoarece mută discuția de la afirmații generale la rezultate verificabile.

În același timp, cercetarea își asumă limitele. Teza validează tehnic și metodologic potențialul structurilor modulare imprimate 3D, dar nu realizează o validare completă din perspectiva purtabilității, a acceptabilității utilizatorilor sau a impactului de mediu cuantificat prin analiză completă de ciclu de viață. Produsul realizat funcționează ca dovadă de concept și ca platformă de cercetare, nu ca soluție industrială finală. Această poziționare este importantă pentru interpretarea corectă a rezultatelor: cercetarea demonstrează posibilitatea tehnică și proiectivă a unui sistem vestimentar modular configurabil, iar nu înlocuirea imediată a îmbrăcămintei convenționale.

Prin urmare, concluzia generală a tezei este că sistemele modulare imprimate 3D pot constitui o direcție relevantă pentru designul vestimentar sustenabil atunci când sunt dezvoltate printr-o abordare integrată, care corelează teoria designului sustenabil, analiza critică a greenwashingului, selecția și clasificarea structurilor, testarea fizico-mecanică, evaluarea mecanismelor de îmbinare și transpunerea într-un produs vestimentar configurabil. Valoarea cercetării nu constă într-o soluție unică și definitivă, ci în construirea unui cadru teoretic, experimental și aplicativ care poate fi extins, verificat și optimizat prin cercetări ulterioare.

8.2. Contribuții originale și direcții viitoare de cercetare

Contribuțiile originale ale tezei rezultă din articularea coerentă a unei problematici interdisciplinare, în care designul sustenabil, fabricația aditivă și modularitatea sunt analizate nu separat, ci ca elemente ale unui sistem de proiectare verificabil. Cercetarea aduce contribuții teoretice, metodologice, experimentale și aplicative, relevante atât pentru domeniul ingineriei

textile și al designului vestimentar, cât și pentru explorarea unor forme alternative de dezvoltare a produselor de modă.

O primă contribuție originală constă în formularea și utilizarea cadrului multi-design ca strategie integrată pentru dezvoltarea structurilor modulare imprimate 3D în contextul modei sustenabile. Acest cadru reunește modularitatea, fabricația aditivă, dimensiunea relațională a designului și validarea tehnică, propunând o abordare prin care sustenabilitatea nu este tratată ca atribut declarativ, ci ca rezultat al unor mecanisme verificabile. Prin această contribuție, teza se diferențiază de abordările care analizează sustenabilitatea exclusiv prin material, prin stil de consum sau prin comunicare de brand, propunând o integrare între principiile de proiectare și testarea concretă a performanței.

O a doua contribuție constă în analiza critică a greenwashingului și în conectarea acestei problematici cu necesitatea validării tehnice a soluțiilor de design. Teza arată că, în absența unor criterii de verificare, afirmațiile privind sustenabilitatea pot rămâne vulnerabile, chiar și atunci când sunt asociate cu tehnologii considerate inovatoare. Prin urmare, cercetarea propune o deplasare a accentului de la sustenabilitatea comunicată la sustenabilitatea demonstrabilă, în care durabilitatea, reparabilitatea, reconfigurabilitatea și posibilitatea de reutilizare trebuie susținute prin date, protocoale și rezultate experimentale.

O a treia contribuție originală este reprezentată de identificarea, clasificarea și selecția unui corpus de 19 structuri modulare imprimate 3D, grupate în 6 structuri modulare deschise cu sisteme de conectare/detașare și 13 structuri modulare închise de tip zale. Această cartografiere oferă o bază de analiză pentru cercetarea structurilor modulare cu potențial vestimentar și permite compararea unor tipologii constructive diferite. Importanța acestei contribuții constă în faptul că structurile nu au fost analizate doar ca modele digitale sau obiecte vizuale, ci ca posibile infrastructuri funcționale, adaptabile la testare experimentală și la dezvoltare vestimentară.

O a patra contribuție constă în dezvoltarea unei metodologii de adaptare a structurilor modulare pentru testare fizico-mecanică. Având în vedere caracterul neomogen, articulat și funcțional al structurilor analizate, utilizarea unor epruvete standard omogene nu ar fi fost suficientă pentru a surprinde comportamentul real al sistemelor modulare. Cercetarea a adaptat geometria epruvetelor astfel încât să păstreze topologia structurilor, zonele active de îmbinare și mecanismele de conectare, permițând evaluarea ansamblului ca sistem arhitecturat. Această contribuție este relevantă pentru studiul structurilor imprimate 3D cu comportament apropiat de cel textil, pentru care standardele existente nu acoperă integral particularitățile funcționale.

O a cincea contribuție metodologică este introducerea și utilizarea indicatorului Ratio pentru susținerea comparabilității rezultatelor obținute prin două configurații de testare diferite: epruvetele adaptate geometriei de tip „dog-bone” și epruvetele realizate în standard textil. Având în vedere diferențele dintre cele două tipuri de epruvete în ceea ce privește geometria, suprafața activă, modul de prindere și distribuția solicitărilor, compararea directă a valorilor absolute ale forței maxime ar fi putut conduce la interpretări incomplete. Indicatorul Ratio permite raportarea rezultatelor la condițiile specifice de testare și oferă un instrument suplimentar pentru evaluarea diferențelor dintre comportamentul structurilor modulare în configurații experimentale distincte. Prin această abordare, cercetarea consolidează caracterul verificabil al analizei și propune o modalitate de interpretare comparativă adecvată structurilor modulare imprimate 3D, situate la intersecția dintre materialele polimerice, structurile arhitecturate și suprafețele cu comportament apropiat de cel textil.

O a șasea contribuție originală este reprezentată de realizarea unei baze experimentale comparative privind comportamentul fizico-mecanic al celor 19 structuri modulare imprimate 3D

din PLA, TPU și PETG. Prin realizarea a câte nouă epruvete pentru fiecare combinație structură–material, s-a obținut un volum consistent de date privind forța maximă, rezistența la rupere raportată la lățime, alungirea și modulul lui Young. Această bază experimentală permite compararea influenței materialului și geometriei asupra comportamentului mecanic și oferă repere utile pentru selecția structurilor adecvate aplicațiilor vestimentare configurabile.

O a șaptea contribuție constă în interpretarea comparativă a comportamentului structurilor modulare deschise și închise, precum și a diferențelor dintre materialele utilizate. Cercetarea a evidențiat că structurile modulare trebuie evaluate nu doar prin valoarea forței maxime, ci și prin modul de cedare, capacitatea de deformare, reversibilitatea desprinderii, rigiditatea globală și compatibilitatea dintre material și arhitectura structurală. Această contribuție este importantă deoarece propune o analiză funcțională a rezultatelor, orientată către scenariile reale de utilizare vestimentară.

O a opta contribuție originală este analiza detaliată a sistemului de clipsare/detașare al structurii „Flat Fabric”. Prin izolarea mecanismului de îmbinare și evaluarea forței de declipsare/clipsare, s-a investigat componenta esențială care permite modularitatea reversibilă. Această contribuție este semnificativă deoarece, în cazul produselor configurabile, îmbinarea nu este doar un detaliu constructiv, ci elementul care susține funcția de reconfigurare, reparare și înlocuire parțială.

O a noua contribuție este introducerea testării ciclice a mecanismului de clipsare/detașare, prin care cercetarea a evaluat comportamentul sistemului după utilizări repetate. Această abordare permite trecerea de la o evaluare statică a rezistenței la o evaluare funcțională a durabilității. Pentru aplicațiile vestimentare modulare, unde componentele pot fi manipulate, asamblate și dezasamblate de mai multe ori, comportamentul ciclic este esențial. Prin urmare, teza contribuie la dezvoltarea unei metodologii de verificare a fiabilității sistemelor „snap-fit” imprimate 3D pentru aplicații configurabile.

O a zecea contribuție constă în transpunerea structurii „Flat Fabric” într-un produs vestimentar configurabil, prin dezvoltarea unui top modular la scară reală. Această etapă demonstrează trecerea de la epruvetă la produs și validează, la nivel de dovadă de concept, posibilitatea utilizării unei structuri modulare imprimate 3D în design vestimentar. Contribuția nu constă doar în realizarea obiectului, ci în dezvoltarea unui proces de lucru care conectează tiparul vestimentar, modelarea digitală, panourile modulare, piesele specializate și logica de asamblare.

O a unsprezecea contribuție originală suplimentară constă în demonstrarea faptului că funcția de deschidere și închidere a produsului vestimentar poate fi integrată direct în logica modulară a suprafeței. Spre deosebire de îmbrăcămintea convențională, în care accesul în produs este condiționat, de regulă, de existența unor accesorii distincte, precum fermoare, capse, nasturi sau alte sisteme de închidere, sistemul modular propus permite clipsarea și declipsarea din multiple puncte ale suprafeței. Această caracteristică nu are doar relevanță constructivă, ci și semnificație conceptuală, deoarece arată că unele funcții convenționale ale produsului vestimentar pot fi redistribuite și absorbite în arhitectura modulară a sistemului. În acest fel, suprafața modulară nu funcționează doar ca material sau ca element decorativ, ci devine simultan structură, sistem de asamblare, mecanism de acces și infrastructură de reconfigurare.

O a douăsprezecea contribuție originală este dezvoltarea unei biblioteci de piese specializate derivate din relația dintre tiparul vestimentar și rețeaua modulară. Această bibliotecă permite depășirea limitelor simplei repetiții plane a modulului standard și oferă soluții pentru zonele de contur, răscroială, umăr, terminație și adaptare locală. Prin această contribuție, cercetarea arată că transpunerea modularității în îmbrăcăminte nu poate fi realizată doar prin multiplicarea

unui modul, ci necesită o logică de compatibilizare geometrică între sistemul modular și forma vestimentară.

O a treisprezecea contribuție constă în evidențierea potențialului configurativ și cromatic al sistemului modular. Prin demonstrarea posibilității de a genera variante vizuale multiple pornind de la aceeași infrastructură, teza arată că diversificarea produsului nu trebuie să implice întotdeauna producerea unui obiect complet nou. Această contribuție este relevantă pentru designul sustenabil, deoarece sugerează o posibilă reducere a nevoii de substituire completă a produselor prin actualizare, reorganizare sau reconfigurare.

O a paisprezecea contribuție este formularea unei relații explicite între modularitate, verificabilitate și sustenabilitate. Teza nu afirmă sustenabilitatea ca rezultat definitiv și complet cuantificat, ci demonstrează mecanisme prin care aceasta poate fi susținută: dezasamblare, reconfigurare, înlocuire parțială, reutilizare a modulelor, diversificare fără refabricarea întregului produs și posibilitatea optimizării ulterioare a sistemului. Această poziționare este importantă deoarece evită generalizările excesive și menține cercetarea într-un cadru riguros, în care sustenabilitatea este discutată ca potențial susținut de mecanisme verificabile, nu ca afirmație absolută.

Pe baza acestor contribuții, cercetările efectuate deschid mai multe direcții viitoare, necesare pentru extinderea, validarea și optimizarea rezultatelor obținute.

O primă direcție viitoare vizează dezvoltarea unor noi sisteme modulare imprimate 3D, îmbunătățite prin optimizarea formei modulelor, a geometriei îmbinărilor, a raportului dintre flexibilitate și rezistență și a modului de transmitere a solicitărilor în ansamblu. Cercetările ulterioare pot explora module cu geometrii mai eficiente, conectori cu toleranțe mai bine controlate, forme care reduc concentrațiile de tensiune și structuri capabile să ofere o conformare mai bună la corp. Această direcție este importantă pentru trecerea de la demonstrația de principiu la sisteme modulare mai confortabile, mai rezistente și mai ușor de utilizat.

O a doua direcție de cercetare se referă la optimizarea sistemelor de îmbinare dintre module. Rezultatele tezei arată că mecanismul de clipsare/detașare este esențial pentru funcționarea produsului modular, motiv pentru care cercetările viitoare ar trebui să urmărească îmbunătățirea forței de retenție, reducerea uzurii după cicluri repetate, creșterea ușurinței de clipsare/declipsare și diminuarea riscului de rupere locală. Pot fi dezvoltate geometrii alternative de tip „snap-fit”, mecanisme de interblocare cu deformare controlată sau conectori proiectați diferențiat în funcție de zona produsului vestimentar și de nivelul de solicitare.

O a treia direcție importantă este extinderea testării ciclice la un număr mai mare de cicluri. Cercetarea actuală oferă o bază relevantă pentru evaluarea degradării inițiale a mecanismului de clipsare, însă utilizarea reală a unui produs configurabil poate presupune cicluri repetate de asamblare, dezasamblare, ajustare și reconfigurare pe termen mai lung. Prin urmare, testele viitoare ar trebui să includă praguri mai mari de ciclare, analiza evoluției forței de retenție în timp și identificarea momentului în care îmbinarea nu mai poate fi considerată funcțională. O astfel de direcție ar permite definirea unor criterii de durabilitate funcțională pentru produsele vestimentare modulare.

O a patra direcție vizează utilizarea analizei cu element finit (Finite Element Analysis – FEA) pentru modelarea numerică a structurilor modulare și a mecanismelor de clipsare/detașare. O asemenea abordare ar permite investigarea distribuției tensiunilor și deformațiilor în zonele critice ale modulelor, în special la nivelul conectorilor „snap-fit”, unde pot apărea concentrări de tensiune, deformări permanente sau ruperi locale. FEA ar putea contribui la identificarea zonelor vulnerabile înainte de imprimarea fizică, la compararea mai multor variante geometrice și la

optimizarea formei modulelor. Integrarea modelării numerice cu rezultatele experimentale ar permite dezvoltarea unor modele predictive privind comportamentul structural al sistemelor modulare, reducând numărul de iterații fizice necesare și oferind un instrument suplimentar pentru proiectarea unor structuri mai eficiente.

O a cincea direcție de cercetare privește explorarea unor materiale alternative pentru imprimarea sistemelor modulare. În afara materialelor analizate în teză – PLA, PETG și TPU – pot fi investigate filamente bio-bazate, materiale reciclate sau reciclabile, polimeri cu flexibilitate controlată, materiale cu rezistență crescută la oboseală sau materiale dezvoltate special pentru aplicații purtabile. Această direcție trebuie abordată critic, deoarece sustenabilitatea unui material nu poate fi dedusă doar din originea sa sau din eticheta comercială, ci trebuie analizată în raport cu durabilitatea, comportamentul mecanic, posibilitatea de reciclare, energia de procesare și scenariul de utilizare.

O a șasea direcție se referă la testarea altor tehnologii de imprimare 3D, nu doar FDM/FFF. Tehnologii precum SLS, MJF sau alte procese de fabricație aditivă pot oferi precizie dimensională mai bună, comportament mecanic diferit, posibilitatea realizării unor geometrii mai fine sau reducerea anumitor limitări asociate depunerii strat cu strat. Cercetările viitoare ar putea compara aceeași geometrie modulară realizată prin tehnologii diferite, pentru a evalua influența procesului de fabricație asupra flexibilității, rezistenței, toleranțelor conectorilor și durabilității ciclice.

O a șaptea direcție vizează extinderea aplicațiilor vestimentare către alte tipuri de produse. Topul modular realizat în cadrul tezei a funcționat ca studiu de caz și dovadă de concept, dar generalizarea metodologiei necesită testarea pe produse cu cerințe constructive diferite: fuste, rochii, jachete, pantaloni, veste, accesorii sau produse cu zone de solicitare mecanică mai ridicată. Fiecare tipologie vestimentară introduce probleme specifice privind mobilitatea corpului, distribuția greutății, sistemele de închidere, adaptarea la morfologia corpului și confortul la purtare. Extinderea cercetării către alte produse ar permite verificarea flexibilității reale a metodologiei de transpunere tipar–modularitate.

O a opta direcție privește testarea la purtare și evaluarea de către utilizatori. Cercetarea actuală validează tehnic și metodologic sistemul modular, dar nu include o testare sistematică a confortului, mobilității, greutății percepute, ușurinței de asamblare, acceptabilității estetice sau experienței de utilizare. Într-o etapă ulterioară, este necesară organizarea unor studii cu purtători, care să evalueze modul în care produsul se comportă pe corp, cum este perceput de utilizatori și în ce măsură reconfigurarea contribuie la atașamentul față de produs și la intenția de utilizare pe termen mai lung.

O a noua direcție viitoare vizează realizarea unei evaluări de sustenabilitate prin metode cantitative, inclusiv analiza ciclului de viață (Life Cycle Assessment – LCA). Teza discută sustenabilitatea prin mecanisme de proiectare – modularitate, reconfigurare, reparare, diversificare și utilizare extinsă – însă nu cuantifică integral impactul de mediu al produsului. O analiză LCA ar permite compararea scenariilor de producție, utilizare, reconfigurare și sfârșit de viață, precum și evaluarea critică a raportului dintre avantajele modularității și impacturile asociate imprimării 3D. O astfel de cercetare ar contribui la consolidarea caracterului verificabil al abordării propuse.

O a zecea direcție se referă la dezvoltarea unor instrumente digitale parametrice pentru proiectarea sistemelor modulare vestimentare. Procesul realizat în teză a implicat mai multe etape de adaptare, conturare, derivare de piese și compatibilizare geometrică. În viitor, aceste operații ar putea fi parțial automatizate prin instrumente parametrice care să genereze module, piese de contur și variante de asamblare în funcție de tipar, dimensiuni corporale și reguli constructive. Această

direcție ar reduce timpul de proiectare și ar facilita aplicarea metodologiei de către designeri sau cercetători.

O a unsprezecea direcție privește explorarea sistemelor modulare vestimentare ca platforme de co-design și personalizare asistată. Într-o asemenea abordare, produsul nu ar mai fi conceput exclusiv ca obiect finit, ci ca ansamblu configurabil alcătuit din module compatibile, însoțite de reguli de asamblare, scenarii de combinare și posibilități de actualizare ulterioară. Această direcție ar permite investigarea relației dintre modularitate, participarea utilizatorului, atașamentul față de produs și extinderea duratei de utilizare, deschizând perspectiva unor modele produs–serviciu bazate pe reconfigurare, reparare și diversificare controlată.

O a douăsprezecea direcție vizează dezvoltarea unui cadru de evaluare specific pentru produsele vestimentare modulare imprimate 3D. Un astfel de cadru ar putea integra indicatori tehnici, estetici, funcționali și de sustenabilitate: rezistența mecanică, stabilitatea îmbinărilor, numărul de cicluri suportate, timpul de asamblare, greutatea produsului, posibilitatea de înlocuire a componentelor, gradul de configurabilitate, confortul la purtare și impactul de mediu. Prin dezvoltarea unui asemenea instrument, cercetările viitoare ar putea contribui la standardizarea evaluării sistemelor modulare purtabile.

În ansamblu, direcțiile viitoare confirmă faptul că prezenta teză nu epuizează domeniul investigat, ci deschide noi perspective de cercetare. Rezultatele obținute demonstrează viabilitatea tehnică și proiectivă preliminară a sistemelor modulare imprimate 3D pentru aplicații vestimentare configurabile, dar dezvoltarea lor ulterioară necesită optimizare geometrică, modelare numerică, extinderea testelor ciclice, explorarea altor materiale și tehnologii, validare cu utilizatori și evaluarea cantitativă a sustenabilității. Prin aceste dezvoltări, cercetarea poate evolua de la dovada de concept către platforme modulare vestimentare mai performante, mai verificabile și mai apropiate de condițiile reale de utilizare.

Bibliografie:

Abbate, S., Centobelli, P., Cerchione, R., Oropallo, E., & Riccio, E. (2023). Sustainability trends and gaps in the textile, apparel and fashion industries. *Environment, Development and Sustainability, 25*, 11551–11587. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02887-2

Alizadeh, A., Moshabaki, A., Hoseini, S. H. K., & Naiej, A. (2024). The phenomenon of greenwashing in the fashion industry: A conceptual framework. *Sustainable Chemistry and Pharmacy, 37*, 101416. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101416

Aponte, D., Pineda, D., & Arias-Gaviria, J. (2024). Fast fashion consumption and its environmental impact: A literature review. *Sustainability: Science, Practice and Policy, 20*(1), 2381871. https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2381871

Badhwar, A., Jain, P., & Angmo, P. (2024). Unraveling green marketing and greenwashing: A systematic review in the context of the fashion and textiles industry. *Sustainability, 16*(7), 2738. https://doi.org/10.3390/su16072738

Bailey, K., Basu, A., & Sharma, S. (2022). The environmental impacts of fast fashion on water quality: A systematic review. *Water, 14*(7), 1073. https://doi.org/10.3390/w14071073

Bayer, R. G. (1991). *Mechanical wear prediction and prevention*. Marcel Dekker.

Bick, R., Halsey, E., & Ekenga, C. C. (2018). The global environmental injustice of fast fashion. *Environmental Health, 17*, 92. https://doi.org/10.1186/S12940-018-0433-7

Bingaman, M., Larson, L., & Rover, D. (2022). Inoculation & greenwashing: Defending against misleading sustainability messaging. *Communication Reports, 35*(2), 77–89. https://doi.org/10.1080/08934215.2022.2048877

Bloomfield, A., & Borstrock, S. (2018). Modeclix: The additively manufactured adaptable textile. *Materials Today Communications, 16*, 212–216. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.04.002

Bonenberger, P. (2005). *The first snap-fit handbook* (2nd ed.). Hanser Gardner Publications.

Busalim, A., Fox, G., & Lynn, T. (2022). Consumer behavior in sustainable fashion: A systematic literature review and future research agenda. *International Journal of Consumer Studies, 46*(5), 1804–1828. https://doi.org/10.1111/ijcs.12794

Burnstine, A., Pal, R., & Gam, H. J. (2025). Assessing the sustainable circular fashion supply chain as a model for achieving economic growth in the global market. *Sustainability, 17*(19), 8558. https://doi.org/10.3390/su17198558

Casciani, D. (2023). Unpacking strategies for e-textile design for disassembly. *DRS Biennial Conference Series*. https://doi.org/10.21606/ti-2023/117

Centobelli, P., Cerchione, R., Chiaroni, D., Del Vecchio, P., & Urbinati, A. (2022). Slowing the fast fashion industry: An all-round perspective. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 38*, 100684. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100684

Chandra, P. (2017). Thoughtful threads, ethical fashion. *The International Journal of Business and Management, 5*(10), 45–52. https://doi.org/10.24247/IJBMROCT20175

Cho, E., Gupta, S., & Kim, Y. K. (2024). Threads of change: Advancing sustainable fashion through new materialist perspectives. *Fashion Theory, 28*(6), 847–872. https://doi.org/10.1080/1362704x.2024.2424125

Clarke-Sather, A., Cobb, K., Dunn, L., Howell, J., Len, A., Neale, A., & Shriver, T. (2019). Onshoring fashion: Worker sustainability impacts of global and local apparel production. *Journal of Cleaner Production, 208*, 1206–1218. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.09.073

Claxton, S., & Kent, A. (2020). The management of sustainable fashion design strategies: An analysis of the designer's role. *Journal of Cleaner Production, 268*, 122112. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122112
Colombi, C., Galliano, D., & Ugaglia, A. A. (2023). Fashion digital transformation: Innovating business models toward circular economy and sustainability. *Sustainability, 15*(6), 4942. https://doi.org/10.3390/su15064942
Corral, L. C., Walker, K. J., & Hubert, S. K. (2017). Exploring the abilities of 3-D printing and its viability. Discovery, The Student Journal of Dale Bumpers College of Agricultural, Food and Life Sciences, 18(1), 23–29. https://doi.org/10.54119/discovery.olvg7399
Costantini, G., Lega, M., & Persechino, G. (2022). Communications on sustainability in the apparel industry: Readability of information on sustainability on apparel brands' web sites in the United Kingdom. *Sustainability, 14*(20), 13257. https://doi.org/10.3390/su142013257
Cramer, J. (2011). Made to keep: Product longevity through participatory design in fashion. *Design Principles and Practices: An International Journal, 5*(5), 253–268. https://doi.org/10.18848/1833-1874/CGP/v05i05/38170
Dan, M. C., Riisberg, V., & Ræbild, U. (2021). Circular fashion: The new roles of designers in organizations transitioning to a circular economy. *The Design Journal, 24*(4), 615–635. https://doi.org/10.1080/14606925.2021.1936748
D'Itria, E., Colombi, C., & Vacca, F. (2022). Biobased innovation as a fashion and textile design must: A European perspective. *Sustainability, 14*(1), 570. https://doi.org/10.3390/su14010570
D'Itria, E., Testa, S., & Colombi, C. (2024). Designing sustainability today: An analytical framework for a design for sustainability model in European fashion and furniture industries. *Sustainability, 16*(8), 3240. https://doi.org/10.3390/su16083240
Dissanayake, G. (2022). Enabling circular fashion through product life extension. In *Sustainable textiles: Production, processing, manufacturing & chemistry*. Springer.
Dobos, E., & Éltető, A. (2023). Regulation of the fashion supply chains and the sustainability–growth balance. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal, 14*(1), 101–129. https://doi.org/10.1108/SAMPJ-04-2022-0182
Ende, M., Hübner, R., & Piorr, R. (2023). Detecting greenwashing! The influence of product colour and product price on consumers' detection accuracy of faked biofashion. *Journal of Consumer Policy, 46*(3), 419–440. https://doi.org/10.1007/s10603-023-09537-8
Farhana, K., et al. (2025). FDM in textiles – Present scenario, challenges and future prospects. https://doi.org/10.63100/3080-1915.1008
Fletcher, K. (2013). *Design for sustainability in fashion and textiles*. Routledge.
Fonseca, A., Ramalho, E., & Gouveia, C. (2023). Systematic insights into a textile industry: Reviewing life cycle assessment and eco-design. *Sustainability, 15*(21), 15267. https://doi.org/10.3390/su152115267
França, R. P., Silva, J. M., & Carvalho, H. (2023). Development of a fiber shredder prototype for textile-to-textile recycling. *Sustainability, 15*(12), 9553.
Ghimouz, A., Kermiche, N., & Zidi, M. (2023). On sustainable design and manufacturing for the footwear industry: Towards circular manufacturing. *Materials & Design, 233*, 112224. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112224
Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies* (2nd ed.). Springer.

Goldsworthy, K., & Ellams, D. (2019). Collaborative circular design: Incorporating life cycle thinking into an interdisciplinary design process. *The Design Journal, 22*(sup1), 1615–1624. https://doi.org/10.1080/14606925.2019.1595416
Gonçalves, A., & Silva, C. (2021). Looking for sustainability scoring in apparel: A review on environmental footprint, social impacts and transparency. *Energies, 14*(11), 3032. https://doi.org/10.3390/en14113032
Gonzalez, A., Salgado, E. G., & Ramos, A. W. (2023). Evaluating environmental impact of natural and synthetic fibers: A life cycle assessment approach. *Sustainability, 15*(9), 7670. https://doi.org/10.3390/su15097670
Henninger, C. E., Alevizou, P. J., & Oates, C. J. (2016). What is sustainable fashion? *Journal of Fashion Marketing and Management, 20*(4), 400–416. https://doi.org/10.1108/JFMM-07-2015-0052
Huang, H. H., Wang, Y., & Chen, M. (2024). Innovating sustainable fashion design: An exploration of the sustainability of a hybrid method through the C2CAD framework. *Global Fashion Management Conference Proceeding, 6*(5), 1–8. https://doi.org/10.15444/gfmc2024.06.05.01
Hur, E., & Beverley, K. J. (2023). Fostering sustainable fashion innovation: Insights from ideation tool development and co-creation workshops. *Sustainability, 15*(21), 15499. https://doi.org/10.3390/su152115499
Khajavi, S. (2021). Additive manufacturing in the clothing industry: Towards sustainable new business models. *Applied Sciences*. https://doi.org/10.3390/APP11198994
Kim, H. Y., Lee, M. Y., & Kim, Y. J. (2022). Development of sustainable fashion design education program. *Archives of Design Research, 35*(4), 149–165. https://doi.org/10.15187/adr.2022.11.35.4.149
Kozlowski, A. (2023). *The responsible fashion system: A re-conceptualization of the role of fashion design* [Doctoral dissertation]. https://doi.org/10.32920/ryerson.14662095
Kozlowski, A., Bardecki, M., & Searcy, C. (2018). The reDesign canvas: Fashion design as a tool for sustainability. *Journal of Cleaner Production*.
Kozlowski, A., Bardecki, M., & Searcy, C. (2019). Tools for sustainable fashion design: An analysis of their fitness for purpose. *Sustainability, 11*(13), 3581. https://doi.org/10.3390/su11133581
Li, Y., & Zhao, X. (2009). Green marketing and sustainable development of garment industry: A game between cost and profit. *International Journal of Business and Management, 3*(12), 81–86. https://doi.org/10.5539/IJBM.V3N12P81
Li, Y., Zhao, X., Shi, D., & Li, X. (2024). The carbon footprint of fast fashion consumption and mitigation strategies: A case study of jeans. *Science of The Total Environment, 908*, 171508. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171508
Lindsay, E. (2025). *Loop by loop: Proposing a standardised modular garment system* [Master's thesis]. Victoria University of Wellington. https://doi.org/10.26686/2meq-ddkg
Lukáč, M., Fišer, J., Skouras, M., & Panozzo, D. (2025). Refashion: Reconfigurable garments via modular design. *ACM Transactions on Graphics, 44*(1), 1–16. https://doi.org/10.1145/3746059.3747632
Luo, Y., Song, K., Ding, X., & Wu, X. (2021). Environmental sustainability of textiles and apparel: A review of evaluation methods. *Environmental Impact Assessment Review, 86*, 106497. https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2020.106497

Manaia, T., et al. (2023). Revolutionising textile manufacturing: A comprehensive review on 3D and 4D printing technologies. *Fashion and Textiles*. https://doi.org/10.1186/s40691-023-00339-7
Mizrachi, I., Tal, A., & Blass, V. (2022). Sustainable fashion: Rationale and policies. *Encyclopedia, 2*(2), 1154–1164. https://doi.org/10.3390/encyclopedia2020077
Moazzem, S., Crossin, E., Daver, F., & Wang, L. (2018). Assessing environmental impact of textile supply chain using life cycle assessment methodology. *Journal of The Textile Institute, 109*(12), 1574–1585. https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1434113
Moorhouse, D., & Moorhouse, D. (2017). Sustainable design: Circular economy in fashion and textiles. *The Design Journal, 20*(sup1), S1948–S1959. https://doi.org/10.1080/14606925.2017.1352713
Moorhouse, D., & Moorhouse, D. (2018). Sustainability in the fashion industry. *Clothing Cultures, 5*(1), 3–20. https://doi.org/10.1386/CC.5.1.3_1
Moroaca, G., Purcarea, A., & Nedelcu, A. (2024). Greenwashing in the high-end fashion industry. In *Advances in Marketing, Customer Relationship Management, and E-Services* (pp. 123–145). IGI Global. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8949-2.ch007
Mousavi, S. A., Hosseini, S. M., & Hassanpour, N. (2024). A comprehensive review of greenwashing in the textile industry: Life cycle assessment, life cycle cost, and eco-labeling. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04508-6
Nash, H. A. (2022). Product re-design guidelines. In *Sustainable textiles: Production, processing, manufacturing & chemistry* (pp. 293–318). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22352-5_13
Naumova, O., & Naumova, M. (2024). Sustainable development and greenwashing: An analysis of sufficient consumption in the fashion industry. *Economics, Finance and Management Review, 1*, 16–25. https://doi.org/10.36690/2674-5208-2024-1-16
Nayak, R. (2019). A review of recent trends in sustainable fashion and textile production. *Current Trends in Fashion Technology & Textile Engineering, 4*(4), 555648. https://doi.org/10.19080/CTFTTE.2019.04.555648
Nayak, R. Panwar, T., Nguyen, L. T. V. (2024). A review of emerging sustainable fashion business models: Triple bottom line perspective. IFFTI Annual Proceedings, 3, 142–151.
Niinimäki, K. (2015). Ethical foundations in sustainable fashion. *Textiles and Clothing Sustainability, 1*(1), 3. https://doi.org/10.1186/S40689-015-0002-1
Niinimäki, K. (2018). *Sustainable fashion in a circular economy*. Aalto University.
Nisa, K., Andriyana, A., Mariana, S., & Ramdhani, M. A. (2025). A systematic review of reimagining fashion and textiles sustainability with AI: A circular economy approach. *Applied Sciences, 15*(10), 5691. https://doi.org/10.3390/app15105691
Pal, R. (2017). Sustainable design and business models in textile and fashion industry. In *Sustainable fibres and textiles* (pp. 109–138). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2639-3_6
Pasricha, A., & Kadolph, S. J. (2018). Exploration of 3D printing to create zero-waste sustainable fashion notions and jewelry. *Fashion and Textiles, 5*, 25. https://doi.org/10.1186/S40691-018-0152-2
Pasupuleti, R. (n.d.). Fashion Innovation 5.0: Transforming design with AI, AR, VR, and 3D printing. https://doi.org/10.62311/nesx/66258
Patwary, S. (2020). Clothing and textile sustainability: Current state of environmental challenges and the ways forward. *The Textile Learner Review, 16*, 1–15. https://doi.org/10.31881/TLR.2020.16

Pedersen, E. R. G., Earley, R., & Andersen, K. R. (2019). From singular to plural: Exploring organisational complexities and circular business model design. *Journal of Fashion Marketing and Management, 23*(3), 308–326. https://doi.org/10.1108/JFMM-04-2018-0062
Peters, G., Li, M., & Lenzen, M. (2021). The need to decelerate fast fashion in a hot climate: A global sustainability perspective on the garment industry. *Journal of Cleaner Production, 295*, 126390. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126390
Puteri, H. E., Sjafirah, N. A., & Nugraha, A. R. (2025). Greenwashing in fast fashion: A critical analysis of Shein's EvoluShein campaign. *Makna: Jurnal Kajian Komunikasi, Bahasa, dan Budaya, 17*(2), 168–184. https://doi.org/10.33558/makna.v17i2.11368
Rahee, A., Hashemi, S. H., & Aghsami, A. (2024). Circular product design strategies in the apparel industry: Toward the circular economy. *Discover Sustainability, 5*, 254. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00654-z
Real Earley, R., & Goldsworthy, K. (2018). Practices, places, projects: Enrolling stakeholders for circular fashion. In *Circular transitions* (pp. 89–112). Routledge.
Rehman, A., Jingdong, L., Chandio, A. A., & Hussain, I. (2024). Sustainable fashion: Mapping waste streams and life cycle management. *Journal of Cleaner Production, 434*, 141279. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141279
Riabchuk, O. (2023). A mini-review of using additive manufacturing in the fashion & textile industry. *Trends in Textile Engineering & Fashion Technology*. https://doi.org/10.31031/tteft.2023.07.000674
Rognoli, V., Bianchini, M., Maffei, S., & Karana, E. (2022). Materials biography as a tool for designers' exploration of bio-based and bio-fabricated materials for the sustainable fashion industry. *Sustainability: Science, Practice and Policy, 18*(1), 730–743. https://doi.org/10.1080/15487733.2022.2124740
Sakaue, L. (2023). The designer's role in fashion system transitions: A critical review of transition design. *Proceedings of IASDR, 2023*, 1–15. https://doi.org/10.21606/iasdr.2023.826
Schischke, K., Proske, M., Nissen, N. F., & Schneider-Ramelow, M. (2019). Impact of modularity as a circular design strategy on materials use for smart mobile devices. *MRS Energy & Sustainability, 6*, e17. https://doi.org/10.1557/mre.2019.17
Stanley, A. A., Hurst, A., & Weisz, J. D. (2022). Modular e-textile platform for real-time sensing. *Proceedings of the 2022 ACM International Symposium on Wearable Computers*, 29–33. https://doi.org/10.1145/3544794.3560293
Wang, H., Ma, B., & Bai, R. (2025). The aftermath of greenwashing in the fashion industry: Chinese consumer responses to different types of greenwashing. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, 37*(3), 567–585. https://doi.org/10.1108/apjml-06-2024-0858
Wang, H., Tao, D., Yu, N., & Qu, X. (2023). Design of customized garments towards sustainable fashion using 3D digital simulation and machine learning-supported human-product interactions. *International Journal of Computational Intelligence Systems, 16*, 41. https://doi.org/10.1007/s44196-023-00189-7
Wang, L., Liu, Y., Xu, L., Peng, H., Li, Y., Jiang, Y., Lan, W., Duan, Z., Zhao, Y., Ma, Y., Guo, C. F., & Cheng, H. (2023). Multifunctional electronic textiles by direct 3D printing of stretchable conductive fibers. *Advanced Electronic Materials, 9*(2), 2201194. https://doi.org/10.1002/aelm.202201194
Wang, Y. (2025). Optimization of 3D printed garment materials using reinforcement learning and generative design. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*. https://doi.org/10.1142/s0129156425408228

Wengerkiewicz, C., et al. (2022). Estudo de impressão 3D em materiais têxteis. *Blucher Design Proceedings*. https://doi.org/10.5151/ped2022-3333590
Xiao, L., Wang, B., Yang, G., & Gauthier, M. (2022). Review on development and application of 3D-printing technology in textile and fashion design. *Coatings, 12*(2), 267. https://doi.org/10.3390/coatings12020267
Yap, Y., et al. (2014). Additive manufacture of fashion and jewellery products: A mini review. *Virtual and Physical Prototyping*. https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993
Zdonek, I., Mularczyk, A., & Hysa, B. (2025). The sustainable fashion value proposition of companies identifying with the zero waste movement. *Sustainability, 17*(3), 887. https://doi.org/10.3390/su17030887
Zhang, H., Chen, M., & Wang, Y. (2024). Can modular garments be a sustainable fashion solution? In *Sustainable development and innovation in textiles and fashion* (pp. 103–118). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69682-4_8

Webografie:

1. 3DCaseFactory. (n.d.). Chainmail – Fabric of Thyme [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/456553-chainmail-fabric-of-thyme?from=search#profileId-364463 . Accesat la: 09.01.2026.
2. DotCom Artwork. (n.d.). Dragon Scales Chainmail [model 3D]. Printables. Disponibil la: https://www.printables.com/model/931534-dragon-scales-chainmail . Accesat la: 02.01.2026.
3. drewrokebythomas. (n.d.). 3D Printed Fabric/Armour [model 3D]. Cults. Disponibil la: https://cults3d.com/en/3d-model/tool/3d-printed-fabric-armour . Accesat la: 02.01.2026.
4. FCore Design. (n.d.). NASA Fabric – X [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/788250-nasa-fabric-x . Accesat la: 11.01.2026.
5. Hamstah. (n.d.). Fabric Fidget [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/64834-fabric-fidget#profileId-78492 . Accesat la: 09.01.2026.
6. jbergmans. (n.d.). Flat fabric (3mm) [model 3D]. Thingiverse. Disponibil la: https://www.thingiverse.com/thing:4917301 . Accesat la: 02.01.2026.
7. k.makesstuff. (n.d.). Chainmail – 3D Printed Fabric (Snap Together too) [model 3D]. Printables. Disponibil la: https://www.printables.com/model/177143-chainmail-3d-printed-fabric-snap-together . Accesat la: 02.01.2026.
8. LoboCNC. (n.d.). Extra Supple HexMaille Fabric [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/95179-extra-supple-hexmaille-fabric?from=search#profileId-157834 . Accesat la: 08.01.2026.
9. Nature Hut. (n.d.). Fabric Fidget/Coaster [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/698158-fabric-fidget-coaster?from=search#profileId-627305. Accesat la: 09.01.2026.
10. neobobkrause. (n.d.). FlexMesh 2.1 Snap Together Flexible Chainmail Mesh [model 3D]. Thingiverse. Disponibil la: https://www.thingiverse.com/thing:442571 . Accesat la: 02.01.2026.
11. protomota. (n.d.). Cyberpunk Armor [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/607036-cyberpunk-armor?from=search#profileId-529953. Accesat la: 11.01.2026.
12. Remixed by LoboCNC. (n.d.). Spiky HexMaille Fabric [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/95175-spiky-hexmaille-fabric?from=search#profileId-603654. Accesat la: 09.01.2026.
13. Sairae. (n.d.). Heart Shaped NASA Fabric (Heart Armor) [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/176792-heart-shaped-nasa-fabric-heart-armor?from=search#profileId-194379. Accesat la: 09.01.2026.
14. Triple G Workshop. (n.d.). Fabric 19 – Extreme Flexibility [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/718109-fabric-19-extreme-flexibility-8-models?from=search#profileId-648909. Accesat la: 08.01.2026.
15. Type1Printing. (n.d.). Fabric Fidget – Large [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/631618-fabric-fidget-large?from=search#profileId-556590. Accesat la: 08.01.2026.
16. tuxcat. (n.d.). Hexagonal Fabric [model 3D]. Thingiverse. Disponibil la: https://www.thingiverse.com/thing:6409809/files. Accesat la: 02.01.2026.
17. VRsculpts. (n.d.). 3D Printed Crochet Fabric [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/600846-3d-printed-crochet-fabric?from=search#profileId-523056. Accesat la: 08.01.2026.

18. WardCons. (n.d.). Fabric Fun 2 [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/592510-fabric-fun-2?from=search#profileId-514179. Accesat la: 09.01.2026.
19. WardCons. (n.d.). Fabric Fun 3 [model 3D]. MakerWorld. Disponibil la: https://makerworld.com/en/models/592514-fabric-fun-3#profileId-514182. Accesat la: 09.01.2026.