

Sistem experimental miniaturizat pentru testarea la tracțiune

Autori: Datcu Oana Maria Daniela, Ciocîrlan Nicolae

Facultatea de Inginerie Mecanică și Mecatronică; Anul III, Specializarea Mecatronică

Coordonatori: Șl. Dr. ing. Edgar Moraru și As. drd. ing. Vlad Stănescu

Cuprins

1.	Introducere	2
2.	Stadiul actual	2
3.	Soluția proprie	3
3.1	Alegere componente	3
3.2	Dimensionare motor	6
3.2.1	Ipoteza	6
3.2.2	Brevier de calcul	6
3.3	Alegere traductor	7
3.4	Interfața	7
3.5	Prelucrare Date	7
3.6	Considerații privind asamblarea și integrarea sistemului mecanic	8
3.6.1	Modularitate și precizie structurală	8
3.6.2	Alinierea ghidajelor liniare	8
3.6.3	Interfața mecanică a traductorului	8
3.7	Metodologia de testare și analiza comparativă a epruvetelor	9
3.8	Arhitectura sistemului electronic și interfețe de achiziție	10
3.8.1	Interfața traductorului de forță (Celulă tensometrică)	10
3.8.2	Interfața riglei optice și feedback-ul de poziție	10
3.9	Analiza limitărilor și a erorilor sistematice	11
3.10	Direcții de dezvoltare și perspective de viitor	11
3.10.1	Optimizarea mecanică și eliminarea erorilor sistematice	11
3.10.2	Dezvoltarea software-ului de monitorizare și achiziție	11
3.10.3	Democratizarea cercetării prin inițiativa Open-Source	11
3.11	Studiul analitic și fundamentele teoretice ale solicitării la tracțiune	12
3.11.1	Modelul matematic al solicitării axiale	12
3.11.2	Caracterizarea comportamentului elastic și plastic	12
3.11.3	Analiza punctelor critice pe diagrama Forță - Deplasare	13
3.11.4	Considerații privind anizotropia	13
4.	Rezultate experimentale	13
5.	Concluzii	14
6.	Bibliografie	15

Rezumat. Lucrarea prezintă proiectarea și realizarea unui sistem mecatronic destinat caracterizării proprietăților mecanice ale materialelor obținute prin tehnologii de fabricație aditivă, precum FDM (Fused Deposition Modeling) și SLA (Stereolithography). Problematika abordată pornește de la necesitatea determinării comportamentului real al structurilor anizotrope, ale căror proprietăți diferă semnificativ de valorile teoretice ale materialelor clasice izotrope. Dispozitivul dezvoltat permite testarea la diverse solicitări mecanice, cu accent pe încercarea la tracțiune, utilizând un sistem de acționare cu șurub cu bile SFU 1605 și un motor Nema 23 în buclă închisă. Această configurație, controlată prin algoritmi PID (Proportional–Integral–Derivative), asigură menținerea unei viteze de deplasare constante sub sarcină variabilă, conform cerințelor standardelor ISO (International Organization for Standardization). Monitorizarea forțelor și a deplasărilor este realizată prin integrarea unei rigle optice de înaltă precizie. Validarea experimentală a sistemului vizează corelarea directă a simulărilor de tip FEM (Finite Element Method) cu rezultatele experimentale obținute pe stand. Cercetarea contribuie la determinarea unor coeficienți de corecție pentru modulele de elasticitate (Young) în funcție de densitatea de umplere (infill), oferind o bază de date necesară pentru proiectarea riguroasă a componentelor destinate roboticii sau structurilor industriale complexe.

Cuvinte cheie: solicitare la tracțiune, stand mecatronic de testare, materiale termoplastice anizotrope, fabricație aditivă, caracterizare mecanică, curba forță-deplasare.

1. Introducere

Ideea acestui proiect a pornit de la o problemă observată în mod constant în domeniile care utilizează fabricația aditivă: risipa semnificativă de material. Pe de o parte, multe piese cedează deoarece comportamentul lor real, anizotrop, diferă de valorile teoretice ale materialului brut (izotrop), ceea ce duce la rebuturi și la reprintarea componentelor. Pe de altă parte, în lipsa unor date precise privind rezistența reală, inginerii și cercetătorii tind să compenseze incertitudinea prin supradimensionarea pieselor și prin densități de umplere (infill) excesive, consumând astfel mult mai mult material decât ar fi necesar. Acest fenomen se regăsește într-o gamă largă de industrii: în cea aerospațială și a autovehiculelor, unde fiecare gram în plus înseamnă greutate și cost suplimentar; în domeniul medical, la proteze și implanturi personalizate care trebuie să reziste la solicitări precise; în medicina dentară, la realizarea de modele și dispozitive funcționale; în robotică, unde componentele structurale ușoare trebuie totuși să suporte sarcini reale; precum și în producția de bunuri de larg consum și în prototiparea industrială. Plecând de la aceste constatări, am urmărit dezvoltarea unei soluții accesibile, care să nu necesite investiția într-un echipament industrial costisitor. Scopul a fost crearea unui stand de testare la tracțiune cu cost redus, dar suficient de precis, care să poată fi utilizat de facultăți, licee și laboratoare de prototipare pentru a determina experimental proprietățile mecanice reale ale pieselor printate 3D și, implicit, pentru a reduce risipa de material.

2. Stadiul actual

În prezent, caracterizarea materialelor se realizează prin trei tipuri principale de sisteme:

- Mașini Universale de Încercări (UTM (Universal Testing Machine)) Industriale: Produse de companii precum Instron sau ZwickRoell. Avantajul principal este precizia extremă și certificarea metrologică, însă dezavantajul major este costul ridicat și gabaritul mare, fiind greu de integrat în laboratoare de prototipare rapidă.[1] [2] [3]
- Sisteme Open-Source de testare: Proiecte de tip Open-Source. Acestea oferă avantajul costului redus și al accesibilității, dar aduc probleme la capitolul rigiditate structurală și precizie a controlului vitezei sub sarcini mari.[4]
- Simulări Software (FEM): Programe precum Ansys sau SolidWorks. Acestea permit analiza teoretică rapidă, dar necesită date de intrare precise – caracteristici de material (module Young corectate) pentru a oferi rezultate valide în cazul pieselor printate 3D, care se comportă anizotrop.

3. Soluția proprie

Soluția propusă constă într-un stand mecatronic destinat caracterizării experimentale a comportamentului mecanic la tracțiune al componentelor obținute prin tehnologii aditive, permițând evidențierea atât a domeniului elastic, cât și a celui plastic. Proiectarea integrală a ansamblului a fost realizată în mediul CAD (Computer-Aided Design) Autodesk Inventor, urmărind o structură rigidă care să minimizeze jocurile mecanice și forțele nedorite în timpul încercării.

3.1 Alegere componente

- a. Motor Nema 23 Closed Loop (3 Nm): Am optat pentru varianta Closed Loop deoarece acest sistem permite monitorizarea poziției în timp real și corectarea automată a erorilor de pași. Această caracteristică este critică în testele de întindere, unde sarcina crește progresiv, iar un motor pas-cu-pas standard ar putea pierde pași, compromițând viteza constantă impusă de standardele ISO (Fig. 1) [12] [13].
- b. Șurub cu bile SFU 1605 (300 mm): Alegerea șurubului cu bile în detrimentul celui trapezoidal a fost determinată de randamentul ridicat ($\eta = 0.9$) și de frecarea redusă. Pasul de 5 mm permite o viteză de translație controlată, iar precizia acestuia asigură o liniaritate ridicată a mișcării pe întreaga lungime utilă de aproximativ 235 mm. (Fig. 2) [15].
- c. Ghidaje liniare HGR20 și blocuri HGH20CA: S-au ales ghidaje pe șină pătrată datorită rigidității superioare față de arborii cilindrici. Acestea pot prelua momente și sarcini radiale mari fără a flexa, asigurând că proba este sollicitată pur axial, fără forțe parazite care ar putea influența rezultatul încercării de întindere. (Fig. 2) [16].
- d. Transmisie prin curea HTD 3M și roți de curea (raport 3:1): Utilizarea fuliilor cu 20, respectiv 60 de dinți, a fost necesară pentru a multiplica cuplul motorului de la 3 Nm la o valoare teoretică de 9 Nm. Acest lucru permite atingerea forței de tracțiune necesare pentru materiale rigide precum CF-Nylon (Carbon Fiber Nylon) fără a utiliza un motor Nema 34, care ar fi fost mai greu și mai costisitor.
- e. Riglă optică SINO KA35 (rezoluție 5 μm): Deși motorul are encoder propriu, rigla optică măsoară deplasarea reală a traversei mobile, eliminând din calcul erorile cauzate de elasticitatea curelei sau jocurile mecanice din ansamblul șurub-piuliță. Rezoluția de 5 micrometri este esențială pentru a calcula corect deformarea specifică în zona elastică a materialului [14].
- f. Profile aluminiu V-slot 2040 (450 mm): Acestea oferă un raport excelent între greutate și rigiditate. Canalele profilului permit o montare modulară.
- g. Suporturi BK12/BF12: Utilizarea unor suporturi dedicate pentru capetele șurubului cu bile asigură o fixare rigidă și preia sarcinile axiale generate în timpul testului, protejând astfel rulmenții motorului sau ai transmisiei.
- h. Componente structurale din PET-G: Pentru suporturi, carcasele de protecție și anumite elemente de ghidaj secundare, s-a utilizat PET-G (Polyethylene Terephthalate Glycol). Alegerea acestui material a fost bazată pe un echilibru optim între rezistența mecanică a ABS-ului (Acrylonitrile Butadiene Styrene) și ușurința de imprimare a PLA-ului (Polylactic Acid). Componentele nu au fost printate cu setări standard, ci au fost optimizate pentru a rezista la vibrațiile motorului și la forțele de reacțiune ale transmisiei prin curea.



Fig. 1. Motor Nema 23, Driver CL57Y



Fig. 2. Șurub cu bile și Ghidaje liniare



Fig. 3. Riglă optică



Fig. 4. Profile aluminiiu

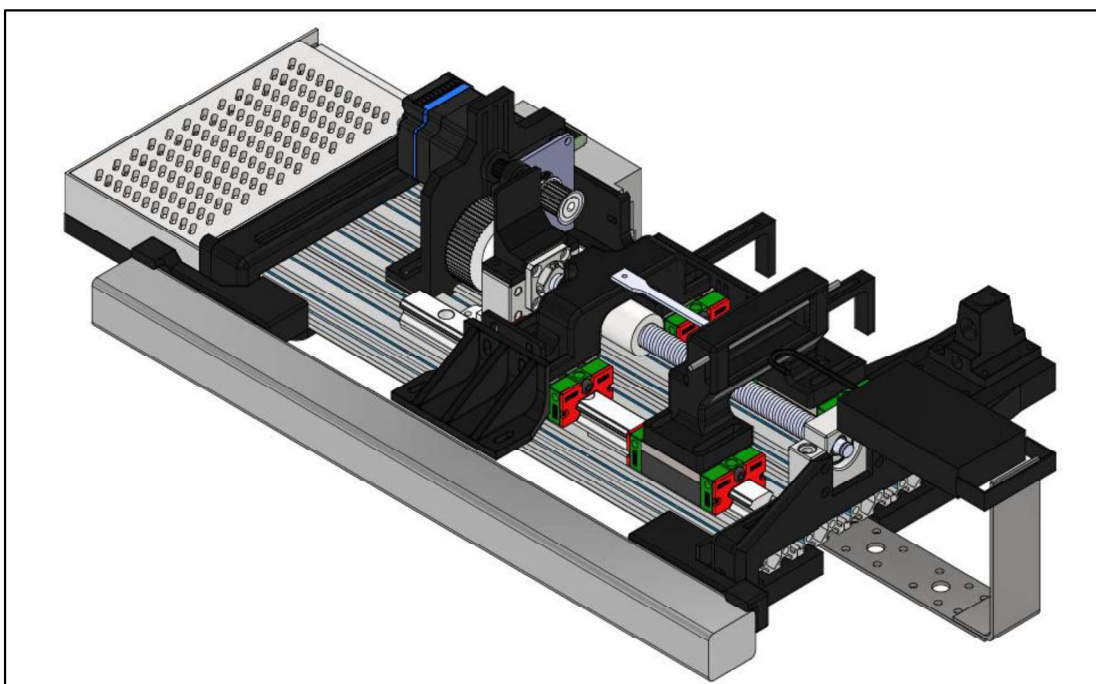


Fig. 5. Model 3D Soluție proprie

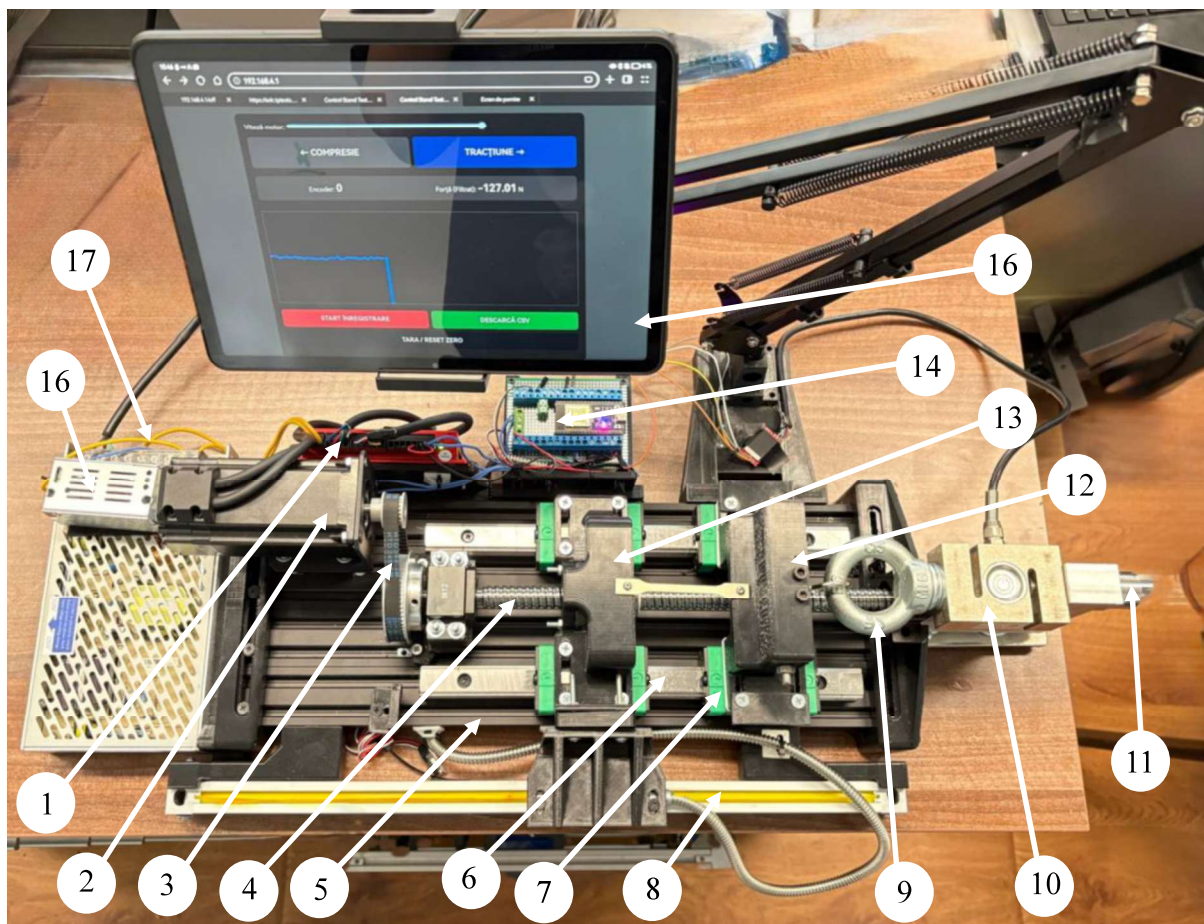


Fig. 6. Stand experimental – Anexa 5

Tabel 1. Componente stand experimental

Nr. Crt.	Nume componentă
1	Driver CL57Y
2	Motor Nema 23
3	Reductor prin curea
4	Șurub cu bile SFU 1605
5	Profile aluminiu V-slot 2040
6	Ghidaje liniare HGR20
7	Blocuri HGH20CA
8	Riglă optică SINO KA35
9	Cârlig prindere
10	Traductor forță
11	Suport aluminiu
12	Banc fix
13	Banc mobil
14	ESP32
15	Display
16	Coborâtor tensiune 5V
17	Sursa 36 V

3.2 Dimensionare motor

3.2.1 Ipoteza

- Epruveta este plină (100% infill)
- Material utilizat: PolyTerra PLA
 - Rezistența la tracțiune: 37 MPa [8]
 - Modulul lui Young E: 2450 MPa [8]
- Epruveta –ISO-527-3-2018 [7]
 - Lățimea zonei calibrate (b_1): 10 mm
 - Grosimea epruvetei (h): 4 mm
- Surub
 - pasul șurubului $P = 5 \text{ mm}$
 - $\eta = 0.9$

3.2.2 Brevier de calcul

Calculul forței maxime de rupere:

$$F_{rupere} = \sigma_{\max} \cdot A = 37 \text{ MPa} \cdot 40 \text{ mm}^2 = 1480 \text{ N} \quad (1)$$

Calculul momentului la șurubul SFU 1605:

$$T_{surub} = \frac{F_{tangent} \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{1480 \text{ N} \cdot 0.005}{2 \pi \cdot 0.9} = 1.31 \text{ Nm} \quad (2)$$

Verificarea sistemului de acționare (Nema 23):

$$T_{motor_necesar} = \frac{T_{surub}}{3} = \frac{1.31 \text{ Nm}}{3} = 0.44 \text{ Nm} < 9 \text{ Nm} \quad (3)$$

O caracteristică definitorie a acestui sistem mecatronic este integrarea unui reductor cu raport 3:1. Această configurație tehnică asigură o rezervă de putere considerabilă, având implicații directe asupra calității testărilor experimentale:

Prin utilizarea reductorului, cuplul nominal de 3 Nm al motorului este amplificat la 9 Nm la intrarea în sistemul de translație. Această forță este mai mult decât suficientă pentru a depăși rezistența la rupere a majorității filamentelor comerciale.

Testarea facilă a materialelor standard (PLA, PET-G, ABS):

- PLA (PolyTerra): Necesită un cuplu la motor de doar aproximativ 0,27 Nm pentru epruveta standard, ceea ce înseamnă că motorul funcționează la o sarcină minimă, garantând o durată de viață ridicată a componentelor electronice.
- PET-G: Necesită doar 0,59 Nm la motor. Reductorul permite standului să treacă prin zona de curgere a PET-G-ului fără nicio fluctuație de viteză.
- ABS / ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate): Cu un necesar de aproximativ 0,44 Nm testarea acestor materiale devine o sarcină ușoară pentru stand.

3.3 Alegere traductor

Solicitare la tracțiune = metalul se deformează imperceptibil (ordinul micronilor).

Senzorul are 4 mărci tensometrice conectate sub formă de pătrat (Punte Wheatstone).

Această configurație:

1. Compensează variațiile de temperatură (dacă metalul se dilată de la căldură, toate cele 4 rezistențe se schimbă la fel, păstrând echilibrul).
2. Amplifică semnalul de ieșire.

Semnalul care iese din senzorul de forță este extrem de mic (ordinul milivolților, adică 0.001V).

Amplificare (PGA (Programmable Gain Amplifier)): HX711 ia acei câțiva milivolți și îi amplifică de 128 de ori.

Conversie pe 24 de biți (ADC (Analog-to-Digital Converter)): Aceasta este partea cea mai importantă. Majoritatea plăcilor Arduino au 10 biți (adică pot împărți semnalul în 1024 de trepte). HX711 are 24 de biți, adică împarte semnalul în peste 16 milioane de trepte. Oferă rezoluția fină, permițând variații de forță de ordinul gramelor, chiar dacă senzorul duce sute de kilograme. [10]

Forma de tip S: Este ideală pentru standuri de tracțiune deoarece are găuri filetate sus și jos.

3.4 Interfața

Pentru a asigura o interacțiune eficientă cu sistemul experimental și pentru a optimiza procesul de testare, am dezvoltat o interfață de comunicare dedicată. Aceasta a fost concepută special pentru a facilita monitorizarea în timp real și managementul fluxului de date, fiind structurată în două module principale:

- Modulul de Control Motor: Permite operarea precisă a sistemului de acționare, oferind utilizatorului control asupra parametrilor de viteză și direcție. Această secțiune asigură sincronizarea mișcării mecanice cu cerințele specifice ale testului de tracțiune.
- Modulul de Colectare și Monitorizare Date: Această unitate centralizează informațiile provenite de la senzorii sistemului:
 - Monitorizarea Deplasării: Afișează în timp real datele furnizate de encoder, oferind o măsurătoare exactă a deplasării (displacement) cu rezoluție înaltă.
 - Monitorizarea Forței: Afișează valorile transmise de traductorul de forță, permițând observarea dinamică a sarcinii aplicate asupra piesei.

Managementul Datelor și Post-Procesarea: Interfața include o funcție de înregistrare a datelor într-un format CSV. Această arhitectură facilitează prelucrarea automată a rezultatelor printr-un script Matlab.

3.5 Prelucrare Date

Pentru prelucrarea datelor am utilizat un program în Matlab (Anexa 4):

- Codul transformă unitatea de timp din milisecunde în secunde pentru a respecta sistemul internațional (SI).
- Conversia Cinematică: din pași în milimetri (se bazează pe raportul de transmisie al șurubului).

$$R = \frac{pas_{\text{șurub}}}{pas_{\text{motor}}} = \frac{5}{20000} = 0.00025 \frac{mm}{pas} \quad (4)$$

- Deplasarea Relativă: Pentru ca graficul să înceapă de la punctul zero (originea), codul scade valoarea inițială a poziției (p_1) din toate valorile înregistrate (p_i):

$$d_i = (p_i - p_1) \cdot R \quad (5)$$

3.6 Considerații privind asamblarea și integrarea sistemului mecanic

Procesul de asamblare a standului mecatronic a fost conceput pentru a asigura o rigiditate structurală optimă, permițând, totodată, modularitatea necesară mentenanței sau eventualelor upgrade-uri.

3.6.1 Modularitate și precizie structurală

Utilizarea profilelor de aluminiu cu profil V-slot 2040 a facilitat o asamblare rapidă și precisă, grație sistemului de fixare bazat pe piulițe tip „T-nut” (piulițe dedicate). Această soluție constructivă a permis ajustări precise ale componentelor în timpul montajului, eliminând necesitatea unor operații de găurire sau prelucrare mecanică direct pe structura de rezistență. Datorită interfeței V-slot, alinierea componentelor a fost realizată cu o precizie ridicată, asigurând o geometrie stabilă și permițând dezasamblarea completă a subansamblelor fără a compromite integritatea structurală a profilelor.

3.6.2 Alinierea ghidajelor liniare

Pentru minimizarea forțelor parazite și evitarea blocajelor în timpul deplasării traversei, s-a pus un accent deosebit pe paralelismul ghidajelor liniare HGR20. În acest scop, a fost realizat un control dimensional riguros după procesul de imprimare 3D a pieselor suport. S-au utilizat șabloane de calibrare imprimate 3D pentru poziționarea relativă a șinelor, urmate de verificări metrologice. Această metodă a permis obținerea unui paralelism optim, factor critic pentru funcționarea cursivă a sistemului sub sarcină.



Fig. 7 Frezare CNC bloc aluminiu

3.6.3 Interfața mecanică a traductorului

Suportul traductorului de forță a fost proiectat pentru a asigura o transmisie pur axială a sarcinii. Elementul central al acestui subansamblu este un bloc de aluminiu prelucrat mecanic (frezat – CNC (Computer Numerical Control)) în regim manual în cadrul laboratorului facultății, respectând toleranțe strânse pentru a evita jocurile mecanice în zona de cuplare. Blocul de aluminiu a fost montat pe o placă de bază din fontă, alegere justificată de masa și rigiditatea superioară a acestui material. (Fig. 7)

3.7 Metodologia de testare și analiza comparativă a epruvetelor

Pentru validarea funcționalității sistemului mecatronic și pentru evaluarea influenței parametrilor de fabricație aditivă asupra proprietăților mecanice, au fost realizate o serie de teste experimentale pe epruvete conforme cu standardul ISO 527-3-2018 [7], scalate în raport cu standul miniaturizat (redușe la 50%; Anexa 3). Toate probele au fost fabricate utilizând imprimanta 3D Bambu Lab A1 Mini, asigurând o repetabilitate ridicată a procesului. Pentru a elimina variabilele externe (precum variația calității filamentului între loturi sau condițiile ambientale de stocare), întregul set de epruvete a fost realizat utilizând același lot de material. Identificarea probelor s-a realizat prin inscripționare, asigurând trasabilitatea datelor în cadrul bazei de date experimentale [5] [6] [7].

3.7.1 Parametrii de fabricație

Pentru uniformitatea analizei, setările de bază au fost constante pentru toate variantele, cu excepția variabilelor studiate:

- Înălțime strat (layer height): 0.2 mm
- Straturi superioare/inferioare (top/bottom layers): 4
- Perimetru (outer walls): 2 layere
- Material: PLA AzureFilm (cu excepția comparației cu PET-G) [8] [9].

3.7.2 Configurații experimentale analizate

A. Analiza structurii interne de umplere (Grid vs. Honeycomb):

S-a urmărit influența geometriei umplerii (infill) asupra rigidității structurale. Ambele serii au fost printate cu un grad de umplere de 40%.

B. Influența orientării de printare (Vertical vs. Orizontal):

Această serie a vizat caracterizarea anizotropiei pieselor printate 3D. Epruvetele au fost fabricate cu un grad de umplere de 100% . Prin compararea probelor orientate pe axa Z (vertical) versus cele orientate pe axa XY (orizontal).

C. Comparativ Materiale (PLA vs. PET-G): [8] [9]

Pentru a evalua versatilitatea standului, s-au testat epruvete cu 100% infill din ambele tipuri de polimeri.

Tabel 2. Centralizatorul parametrilor epruvetelor testate

ID Probă	Material	Infill (%)	Pattern Infill	Orientare Printare
Gr	PLA AzureFilm	40%	Grid	Orizontală
H0	PLA AzureFilm	40%	Honeycomb	Orizontală
V	PLA AzureFilm	100%	-	Verticală
H	PLA AzureFilm	100%	-	Orizontală
	PET-G	100%	-	Orizontală

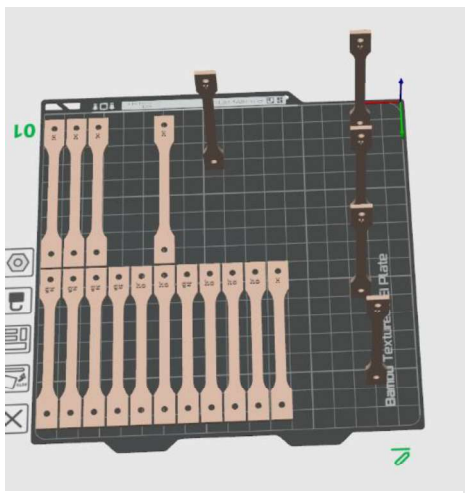


Fig. 8 Setări printare

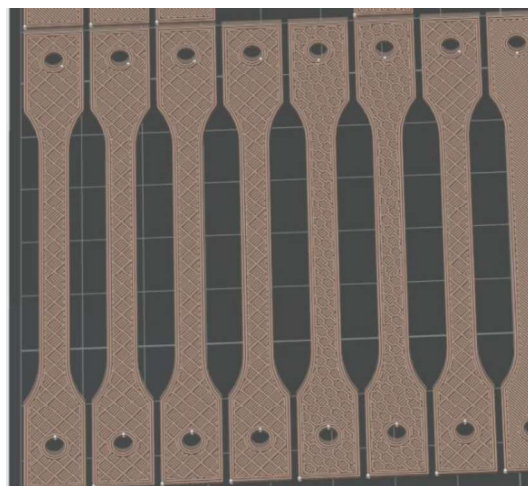


Fig. 9 Pattern Infill

3.8 Arhitectura sistemului electronic și interfețe de achiziție

Sistemul electronic a fost configurat pentru a asigura o buclă de control stabilă și o rezoluție ridicată în procesul de măsurare. Arhitectura se bazează pe o separare clară între partea de putere (acționarea motorului) și partea de achiziție de date (senzori), pentru a minimiza interferențele electromagnetice. Schema electrică este prezentată în Anexa 2.

3.8.1 Interfața traductorului de forță (Celulă tensometrică)

Pentru achiziția semnalului de la traductorul de forță (tip S), s-a utilizat modulul HX711, un convertor analog-digital de înaltă precizie pe 24 de biți.

- Interfața: Comunicarea cu unitatea centrală de procesare se realizează printr-un protocol serial digital (tip bit-banging), care transmite datele fără pierderi de fidelitate.
- Configurare: S-a optat pentru o frecvență de eșantionare de 80 Hz, care oferă un echilibru optim între viteza de răspuns și reducerea zgomotului de fond.
- Tehnic: Puntea Wheatstone din interiorul celulei este alimentată la 5 V, iar amplificarea programabilă (PGA) integrată în HX711 este setată la un câștig de 128, permițând detectarea variațiilor de forță de ordinul gramelor, esențiale pentru studiul zonei elastice a materialelor plastice.

3.8.2 Interfața riglei optice și feedback-ul de poziție

Deși motorul Nema 23 Closed Loop utilizează propriul encoder pentru menținerea buclei închise, s-a integrat suplimentar o riglă optică SINO KA35 pentru monitorizarea deplasării absolute a traversei.

Interfața: Aceasta transmite semnale de tip TTL (Transistor-Transistor Logic) prin intermediul fazelor A și B (cvaadratură).

Rol: Interfațarea cu sistemul de control permite citirea deplasării prin „hardware interrupts”. Acest lucru elimină eroarea de poziționare cauzată de jocurile mecanice (backlash) ale șurubului cu bile sau de eventualele dilatații elastice ale curelei de transmisie. Rezoluția de 5 μm a riglei optice asigură precizia metrologică necesară validării simulărilor FEM.

3.9 Analiza limitărilor și a erorilor sistematice

Deși sistemul mecatronic îndeplinește obiectivele de precizie propuse, în cadrul procesului de validare experimentală au fost identificate anumite limitări constructive care pot introduce erori în măsurătorile de înaltă finețe:

- Elasticitatea dispozitivelor de prindere: Elementele de fixare a epruvetelor (bancurile de prindere) au fost realizate prin imprimare 3D din PET-G. Deși materialul oferă un compromis bun între rezistență și procesabilitate, acesta prezintă o elasticitate proprie. În timpul testelor la forțe ridicate, acest lucru poate induce o deformare parazită care se suprapune peste alungirea reală a epruvetei.
- Jocurile mecanice la interfața de prindere: Fixarea epruvetelor pe bancul de probă a necesitat o adaptare geometrică specifică, constând în practicarea a două găuri de prindere în zonele de capăt ale epruvetelor conform normativelor de adaptare a standului. S-a observat un joc mecanic minimal la nivelul șuruburilor de fixare, rezultat din toleranțele de asamblare.
- Deși adaptarea epruvetelor prin găurire a permis o fixare sigură, aceasta introduce concentratori de tensiune în zonele din proximitatea găurilor.

3.10 Direcții de dezvoltare și perspective de viitor

Proiectul actual reprezintă o etapă de proof-of-concept care validează viabilitatea standului mecatronic.

3.10.1 Optimizarea mecanică și eliminarea erorilor sistematice

Următoarea iterație a standului va viza înlocuirea componentelor structurale plastice din zona de cuplare cu elemente metalice prelucrate.

- Bancuri de prindere metalice: Se va trece la utilizarea unor falci de prindere din aluminiu, cu suprafețe striate sau cu acoperire aderentă, care vor permite fixarea epruvetelor prin forță de strângere (fricțiune) și nu prin găurire. Această modificare va elimina concentratorii de tensiune introduși prin găuri și va asigura un comportament al materialului pur tensil, conform standardelor ISO.
- Creșterea rigidității: Implementarea unor elemente de fixare metalice va elimina elasticitatea parazită a dispozitivelor de prindere, îmbunătățind precizia curbei „Forță-Deplasare” în zona elastică inițială.

3.10.2 Dezvoltarea software-ului de monitorizare și achiziție

Se urmărește automatizarea completă a fluxului de date prin eliminarea necesității post-procesării manuale în Matlab. Noua arhitectură software va include dezvoltarea unui protocol de transmitere directă și neîntreruptă a datelor către o aplicație PC dedicată, capabilă să genereze rapoartele de testare (fișe tehnice) instantaneu, după finalizarea ciclului de încărcare.

3.10.3 Democratizarea cercetării prin inițiativa Open-Source

O componentă fundamentală a viziunii de viitor este transformarea acestui proiect într-o resursă globală:

Platforma de baze de date: Se propune crearea unei baze de date online, colaborative, unde utilizatorii din întreaga lume pot încărca rezultatele testelor efectuate pe diverse filamente și imprimante 3D. Acest repository va servi drept bibliotecă de referință pentru ingineri și

pasionați, reducând necesitatea ca fiecare utilizator să dețină un stand propriu pentru determinarea proprietăților mecanice.

Open-Source Hardware: Toate planurile CAD, schemele electronice, listele de piese și codul sursă vor fi open-source. Scopul este de a oferi comunității un instrument accesibil și robust, permițând oricărui laborator sau universitate cu buget redus să își construiască propriul sistem de testare, susținând astfel progresul în domeniul fabricației aditive.

3.11 Studiul analitic și fundamentele teoretice ale solicitării la tracțiune

Pentru interpretarea corectă a datelor experimentale obținute prin intermediul standului mecatronic, este necesară corelarea rezultatelor brute cu modelele matematice clasice ale rezistenței materialelor. Deși materialele polimerice obținute prin fabricație aditivă prezintă un comportament anizotrop, ipotezele fundamentale ale mecanicii mediilor continue servesc drept bază pentru evaluarea performanței acestora.

3.11.1 Modelul matematic al solicitării axiale

În cadrul încercărilor efectuate, epruveta este supusă unei forțe de tracțiune axială pură, exercitată prin sistemul șurub-piuliță. Relația de bază care definește tensiunea normală (σ) este:

$$\sigma = \frac{F}{A_{eff}} [MPa] \quad (6)$$

, unde:

- F - reprezintă forța axială instantanee înregistrată de traductorul de forță, exprimată în Newtoni $[N]$
- A_{eff} - reprezintă aria secțiunii transversale efective. În cazul epruvetelor printate cu infill < 100%, aria geometrică
-

$$A_0 = b_1 \cdot h \quad (7)$$

, trebuie corectată pentru a reflecta densitatea reală de material, fiind definită ca:

$$A_{eff} = A_0 \cdot \phi \quad (8)$$

, unde

- ϕ - reprezintă coeficientul de umplere (ex: 0.4 pentru 40% infill).

3.11.2 Caracterizarea comportamentului elastic și plastic

Deformația specifică (ϵ) este definită prin raportul dintre alungirea absolută (ΔL) și lungimea calibrată inițială (L_0):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (9)$$

Conform Legii lui Hooke, în zona de comportament elastic, relația dintre tensiune și deformație este liniară:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (10)$$

, unde

- E - (Modulul lui Young) definește rigiditatea materialului. Prin prelucrarea datelor achiziționate, panta porțiunii liniare a diagramei $\sigma - \epsilon$ permite determinarea valorii experimentale a Modulului lui Young. Discrepanța dintre această valoare și cea furnizată de producătorul filamentului (în fișa tehnică) cuantifică degradarea proprietăților mecanice cauzată de tehnologia de fabricație FDM (linii de aderență, orientarea straturilor, porozitatea internă).

3.11.3 Analiza punctelor critice pe diagrama Forță - Deplasare

Diagramele obținute experimental pe standul dezvoltat evidențiază trei zone distincte de analiză:

- A. Regiunea de eliminare a jocurilor: Aceasta reprezintă faza inițială în care sistemul de prindere și epruveta se aliniază sub sarcină. Din punct de vedere analitic, această zonă este considerată o eroare sistematică ce trebuie compensată prin translatarea originii graficului la punctul de intersecție al pantei elastice cu axa absciselor.
- B. Zona de regim elastic: Aceasta este zona de interes principal pentru ingineria de precizie. Linearitatea acestei porțiuni confirmă faptul că eforturile se distribuie uniform în secțiune. Orice deviație de la liniaritate în această zonă indică o structură internă neomogenă a epruvetei.
- C. Zona de cedare (Rupere): Forța maximă F_{max} înregistrată înainte de ruperea epruvetei permite calcularea Rezistenței la Tracțiune (σ_r):

$$\sigma_r = \frac{F_{max}}{A_{eff}} \quad (11)$$

La polimerii printați, ruperea este, în majoritatea cazurilor, de tip fragil sau semi-fragil.

Analiza curbei în această zonă indică dacă cedarea a avut loc prin ruperea fibrelor de material sau prin delaminarea straturilor (decolare inter-strat), fenomen specific fabricației aditive.

3.11.4 Considerații privind anizotropia

Un aspect critic al modelului analitic este faptul că proprietățile materialului (E și σ_r) nu sunt constante, ci funcție de orientarea depunerii stratului față de direcția forței. Analiza comparativă a probelor orientate pe axa Z (vertical) față de cele pe axa XY (orizontal) demonstrează că:

- Pe axa XY: Forța de tracțiune preia rezistența de întindere a filamentului (valori ridicate).
- Pe axa Z: Forța de tracțiune preia rezistența aderenței dintre straturi (valori semnificativ mai scăzute).

Acest studiu analitic furnizează baza necesară pentru determinarea coeficienților de corecție a rigidității. Acești coeficienți permit inginerului să ajusteze simulările FEM pentru a reflecta realitatea fizică a piesei imprimate, transformând ipotezele teoretice de izotropie (din software-ul de modelare) în certitudini experimentale corectate pentru anizotropie.

4. Rezultate experimentale

(Anexa 1)

- Orizontal PLA 100% — cel mai rezistent și mai consistent. F_{max} medie de ~1239 N, cu o deviație standard mică (± 11.7 N). Toate cele 5 eșantioane sunt strânse între 1228–1260 N, ceea ce indică o structură omogenă și un comportament predictibil la tracțiune.

- Grid PLA 40% — consistent, dar mai slab. Fmax medie ~1111 N, cu o deviație standard foarte mică (± 5.6 N) — de fapt cel mai reproductibil dintre toate trei. Valorile variază extrem de puțin (1107–1121 N), ceea ce sugerează că geometria grid e stabilă și bine definită structural, chiar și la 40% umplutură.
- Honeycomb PLA 40% — cel mai variabil. Fmax medie ~1156 N e mai bună decât Grid, dar deviația standard de ± 121 N e mult mai mare. E4 iese clar din lot cu doar 966 N — probabil un defect de imprimare sau aliniere a eșantionului. Dacă scoatem E4, media honeycomb urcă la ~1203 N, ceea ce l-ar plasa între Grid și Orizontal.

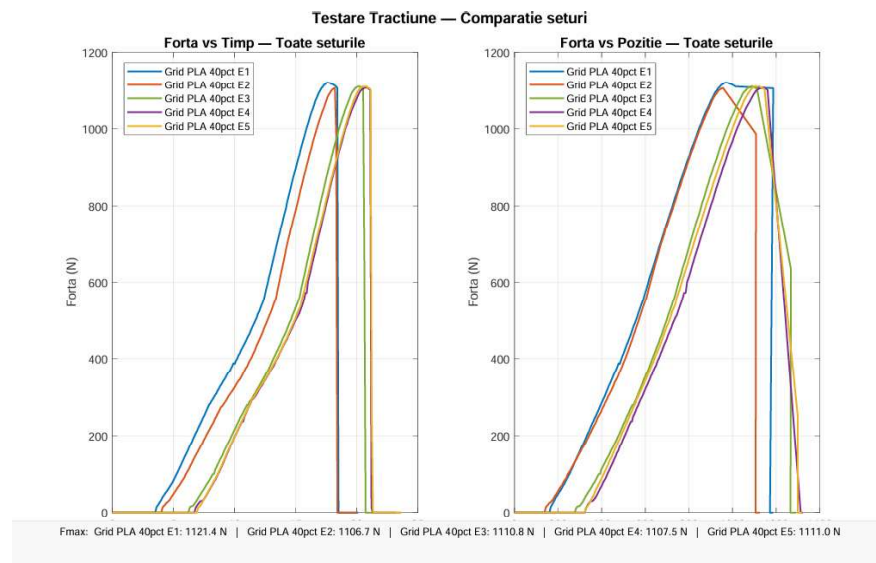


Fig. 10 Testare Grid PLA

5. Concluzii

Implementarea acestui sistem mecatronic reprezintă un pas esențial în tranziția de la prototiparea iterativă, bazată pe încercări și erori, la o inginerie de precizie în fabricația aditivă. Scopul fundamental al lucrării a fost atins prin corelarea directă a parametrilor de printare cu performanța mecanică reală. Într-un context industrial, acest stand rezolvă o problemă critică: risipa de material. Fără o cunoaștere exactă a forțelor la care rezistă o piesă anizotropă, inginerii tind să supradimensioneze componentele sau să utilizeze densități de umplere (infill) excesive pentru a asigura factori de siguranță arbitrari.

Standul transformă ipotezele teoretice în certitudini experimentale, permițând calibrarea modelelor digitale de analiză cu element finit.

- **Sustenabilitate și Eficiență:** Identificarea punctului exact de cedare pentru diverse orientări ale straturilor permite selectarea celei mai eficiente strategii de fabricație, minimizând rata de eșec a prototipurilor în condiții reale de lucru.
- **Controlul Calității:** Sistemul servește ca instrument de audit pentru noi tipuri de filamente sau rășini, asigurând un standard de calitate constant în producția de serie mică.

În concluzie, acest sistem nu este doar un instrument de măsură, ci o soluție de eficientizare economică. Prin reducerea risipei și validarea structurală a componentelor, proiectul demonstrează că fabricația aditivă poate deveni o metodă de producție robustă și predictibilă, pregătită pentru aplicații tehnice de înaltă responsabilitate.

6. Bibliografie

Articole științifice (Stadiul actual)

- [1] [Siddharth Garg, Aditya Singh], „Measuring the Impact of Infill Pattern and Infill Density on the Properties of 3D-Printed PLA via FDM,” *J. Mater. Eng. Perform.*, 2025, doi: 10.1007/s11665-025-10837-y. [Online]. Disponibil: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-025-10837-y>
- [2] [Zainab H. Obaide, Najim A. Saad], „Experimental Study of Effect of Infill Density on Tensile and Compressive Behaviors of PLA Prepared by 3D Printing (FDM),” *Rev. Compos. Matér. Avancés*, vol. 35, nr. 1, 2025, doi: 10.18280/rcma.350112. [Online]. Disponibil: <https://www.iicta.org/journals/rcma/paper/10.18280/rcma.350112>
- [3] [Shivani Sriya Ambati, Ravindra Ambatipudi], „Effect of infill density and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed PLA parts,” *Materials Today: Proceedings*, 2022. [Online]. Disponibil: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322035994>

Standuri de testare open-source / low-cost

- [4] [Krishanu Nandy, David W Collinson, Charlie M Scheftic, L Catherine Brinson], „Open-source micro-tensile testers via additive manufacturing for the mechanical characterization of thin films and papers,” *HardwareX*, 2018. [Online]. Disponibil: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29813103/>

Standarde

- [5] Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles, ISO 527-1:2019, 2019.
- [6] Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics, ISO 527-2:2012, 2012.
- [7] Plastics — Determination of tensile properties — Part 3: Test conditions for films and sheets, ISO-527-3-2018.

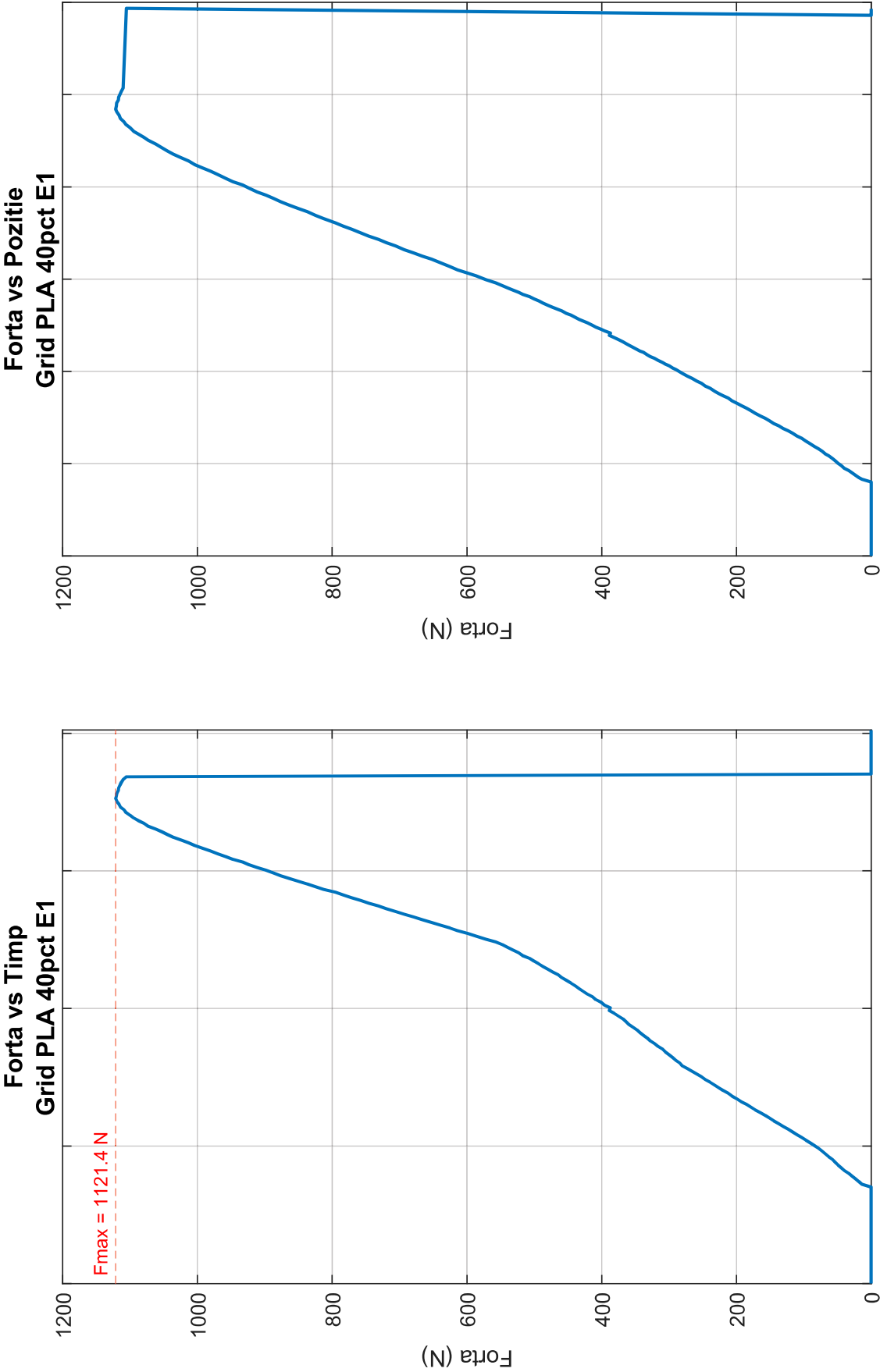
Datasheet-uri materiale

- [8] Polymaker, „PolyTerra PLA — Technical Data Sheet.” [Online]. Disponibil: <https://www.polymaker.com>
- [9] Polymaker, „PolyTerra PETG — Technical Data Sheet.” [Online]. Disponibil: <https://www.polymaker.com>

Componente electronice

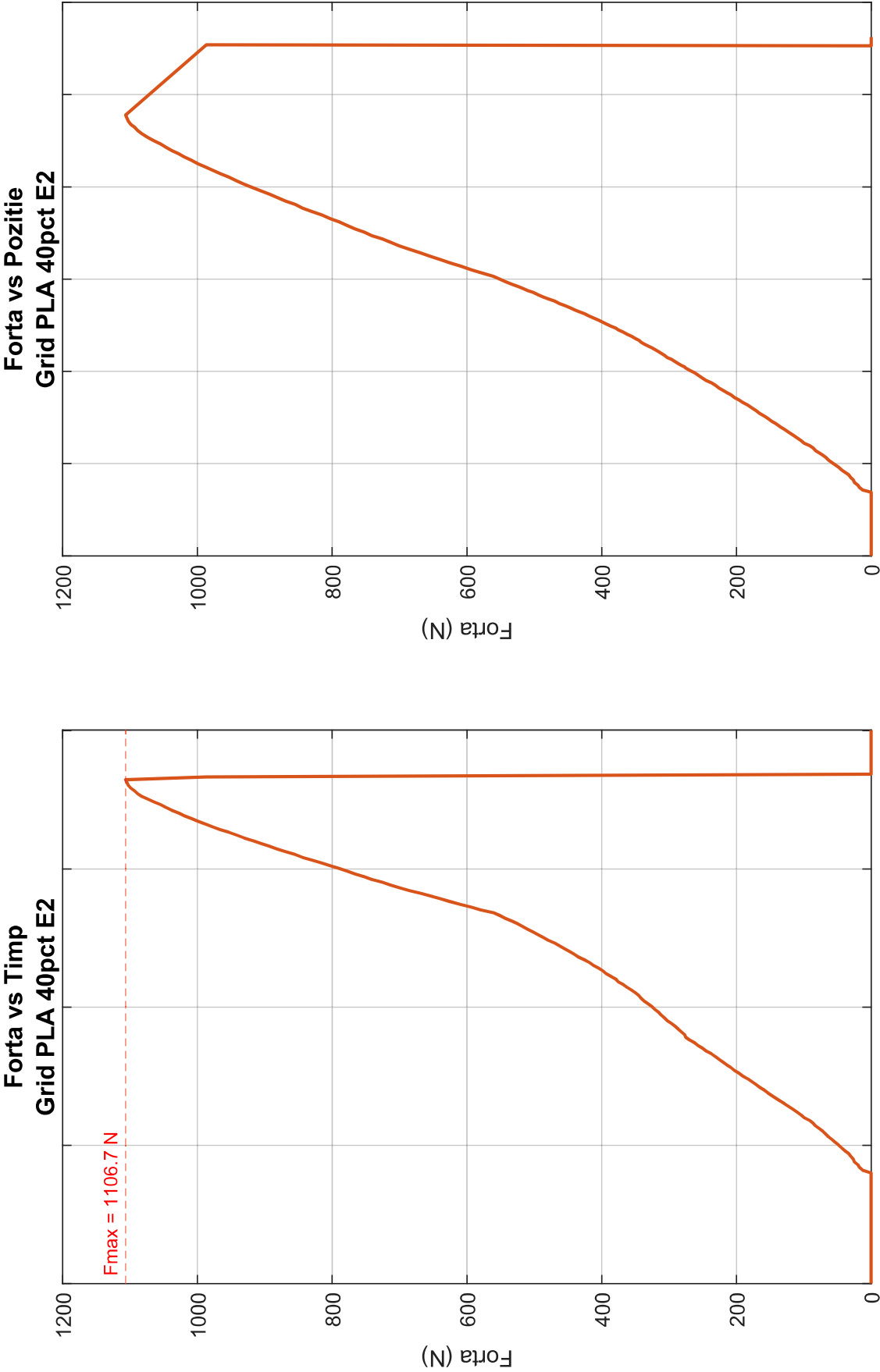
- [10] Avia Semiconductor, „HX711 — 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales,” Datasheet. [Online]. Disponibil: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- [11] Espressif Systems, „ESP32 Series Datasheet.” [Online]. Disponibil: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [12] [Producător], „CL57Y — Closed-Loop Stepper Driver,” Datasheet.
- [13] [Producător], „Motor pas cu pas NEMA 23 closed-loop (3 N·m),” Datasheet.
- [14] SINO, „KA35 Linear Encoder,” Datasheet. [Online].
- [15] [Producător], „Șurub cu bile SFU 1605,” Desen tehnic.
- [16] HIWIN, „Ghidaje liniare HGR20 / blocuri HGH20CA,” Date tehnice.

Testare Tractiune — Grid PLA 40pct E1



$F_{max} = 1121.38\text{ N}$ | $F_{med} = 534.05\text{ N}$ | Durata = 20.12 s | Deplasare = 1186 pasi

Testare Tractiune — Grid PLA 40pct E2

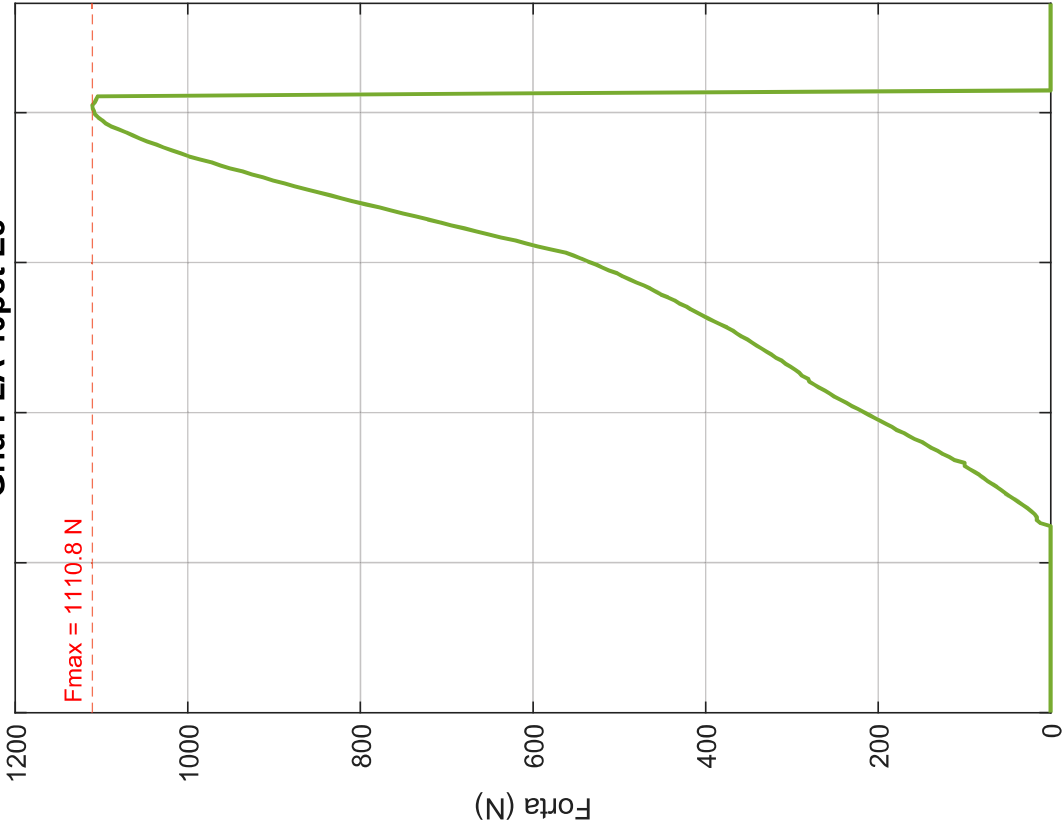


$F_{max} = 1106.69 \text{ N}$ | $F_{med} = 475.81 \text{ N}$ | Durata = 20.03 s | Deplasare = 1125 pasi

Testare Tractiune — Grid PLA 40pct E3

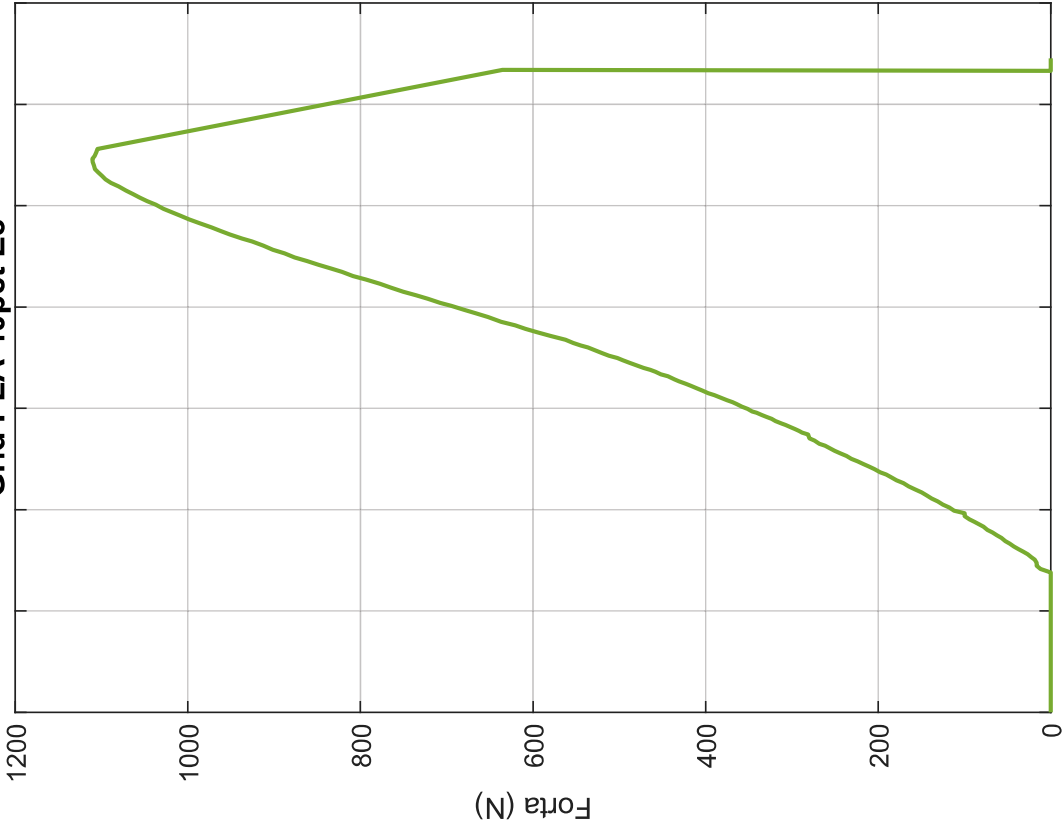
Forta vs Timp

Grid PLA 40pct E3



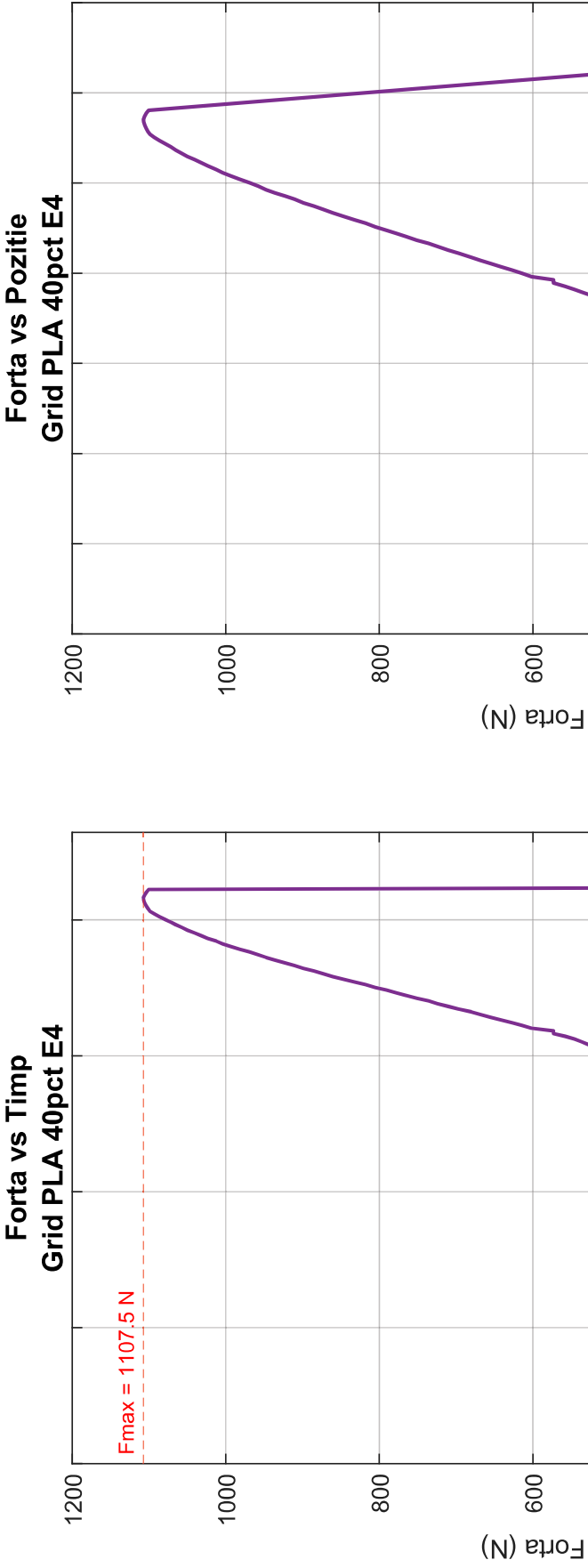
Forta vs Pozitie

Grid PLA 40pct E3



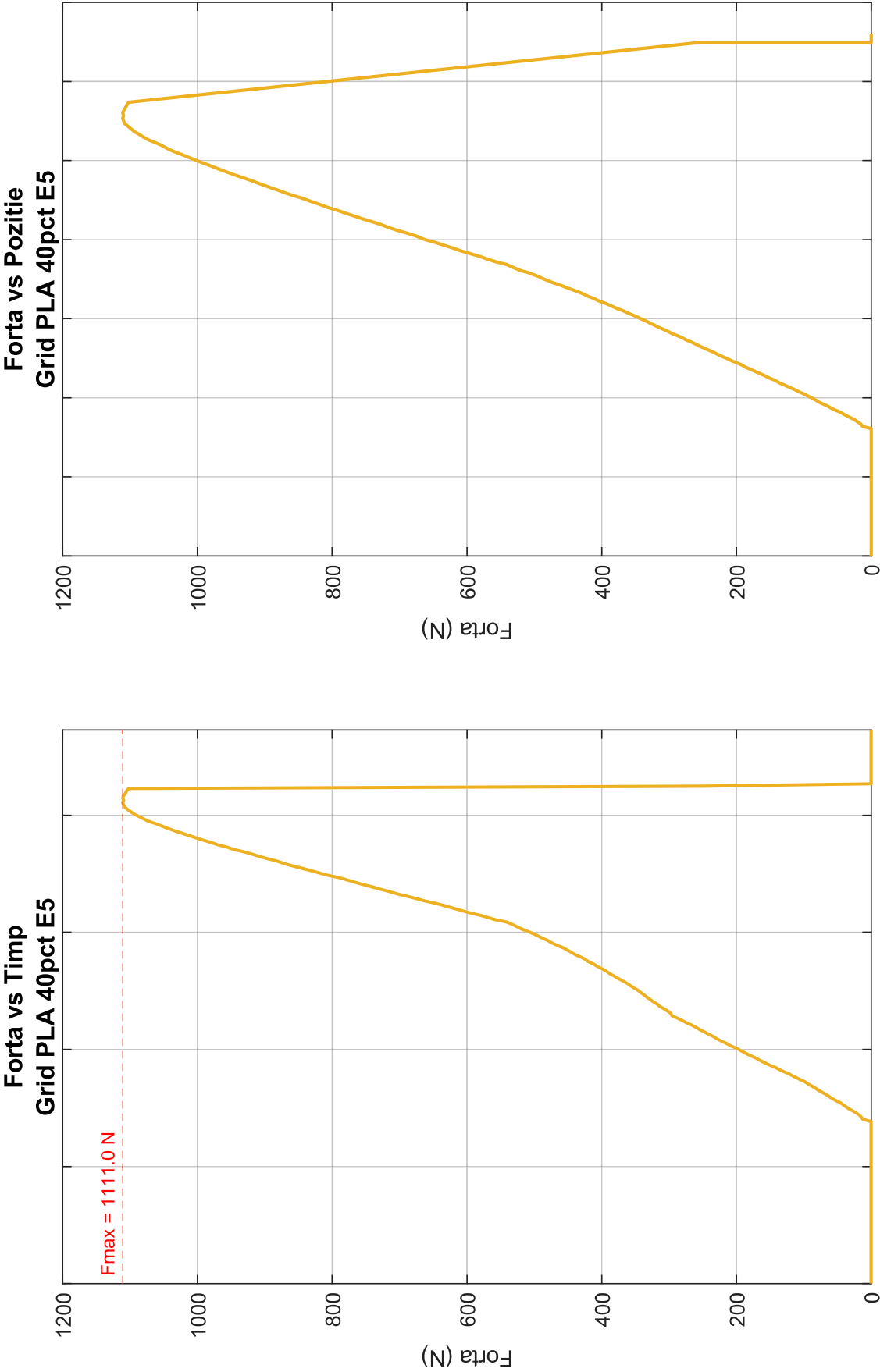
$F_{max} = 1110.78 \text{ N}$ | $F_{med} = 497.86 \text{ N}$ | Durata = 23.64 s | Deplasare = 1291 pasi

Testare Tractiune — Grid PLA 40pct E4



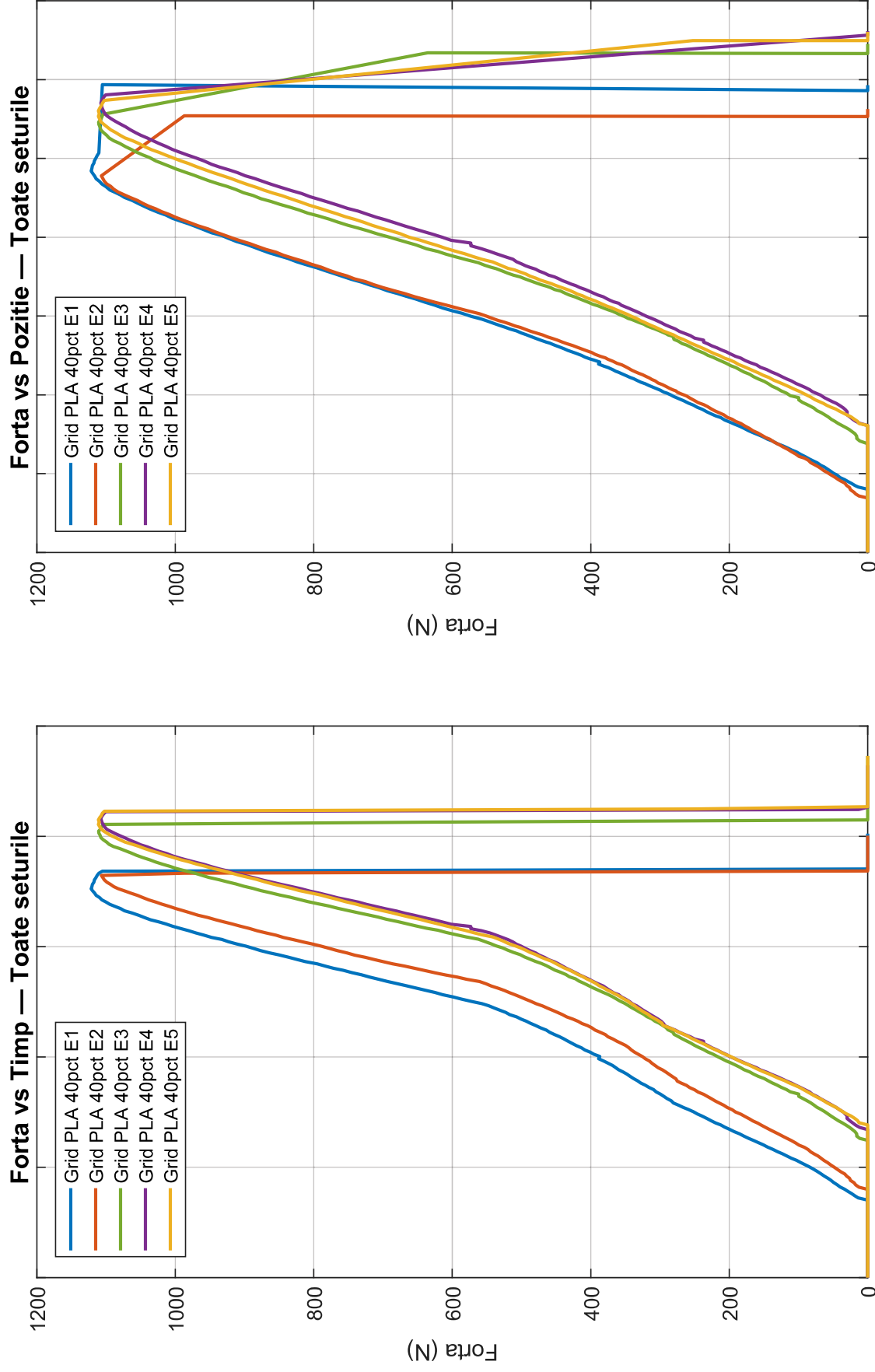
Fmax = 1107.45 N	Fmed = 502.66 N	Durata = 23.22 s	Deplasare = 1323 pasi
------------------	-----------------	------------------	-----------------------

Testare Tractiune — Grid PLA 40pct E5



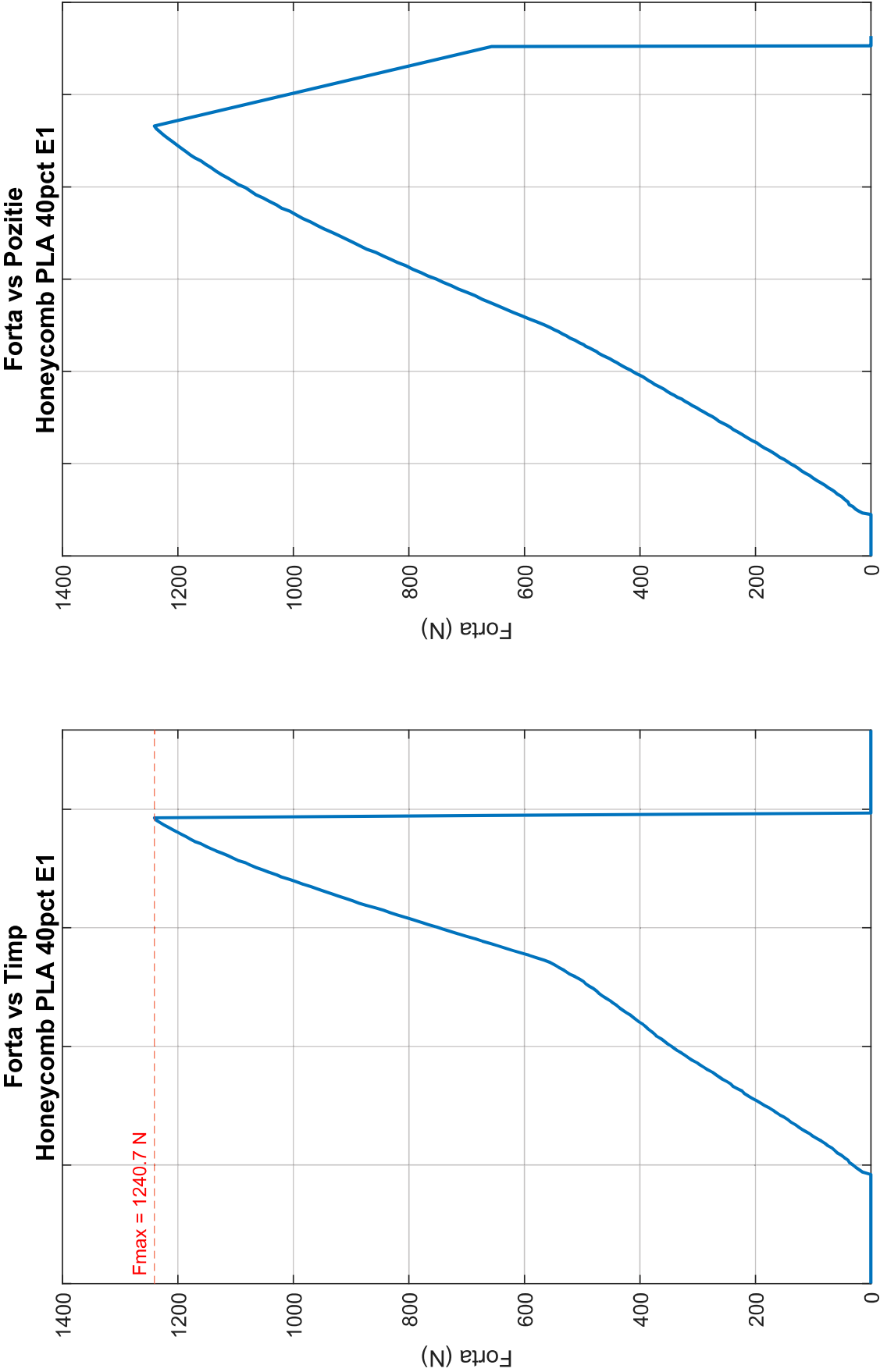
Fmax = 1111.05 N | Fmed = 518.54 N | Durata = 23.64 s | Deplasare = 1321 pasi

Testare Tractiune — Comparatie seturi



Fmax: Grid PLA 40pct E1: 1121.4 N | Grid PLA 40pct E2: 1106.7 N | Grid PLA 40pct E3: 1110.8 N | Grid PLA 40pct E4: 1107.5 N | Grid PLA 40pct E5: 1111.0 N

Testare Tractiune — Honeycomb PLA 40pct E1



Fmax = 1240.73 N | Fmed = 551.12 N | Durata = 23.34 s | Deplasare = 1127 pasi

The figure contains two graphs side-by-side, both with Force (N) on the y-axis (0 to 1400) and Displacement (mm) on the x-axis (0 to 1400).

- Left Graph: Forta vs Pozitie (Force vs Position)**
 - Shows a loading curve (solid orange) and an unloading curve (dashed orange).
 - The loading curve starts at (0,0), reaches a peak force of approximately 1206 N at a displacement of about 120 mm, and then continues to rise to about 1350 N at 1400 mm.
 - The unloading curve starts at approximately (1350, 1400) and returns to (0,0).
- Right Graph: Forta vs Timp (Force vs Time)**
 - Shows a loading curve (solid orange) and an unloading curve (dashed orange).
 - The loading curve starts at (0,0), reaches a peak force of approximately 1206 N at a time of about 120 ms, and then continues to rise to about 1350 N at 1400 ms.
 - The unloading curve starts at approximately (1350, 1400) and returns to (0,0).

Fmax = 1206.17 N	Fmed = 526.61 N	Durata = 27.12 s	Deplasare = 1535 pasi
------------------	-----------------	------------------	-----------------------

The figure consists of two side-by-side line graphs, both plotting Force (N) on the y-axis (0 to 1200) against an x-axis variable. Both graphs show a green curve that starts at (0,0), rises to a peak, and then falls back to zero.

Left Graph: Forta vs Pozitie
 The x-axis represents displacement in mm, ranging from 0 to 1200. The curve peaks at approximately 1126.2 N at a displacement of about 110 mm. The force then decreases as displacement increases further.

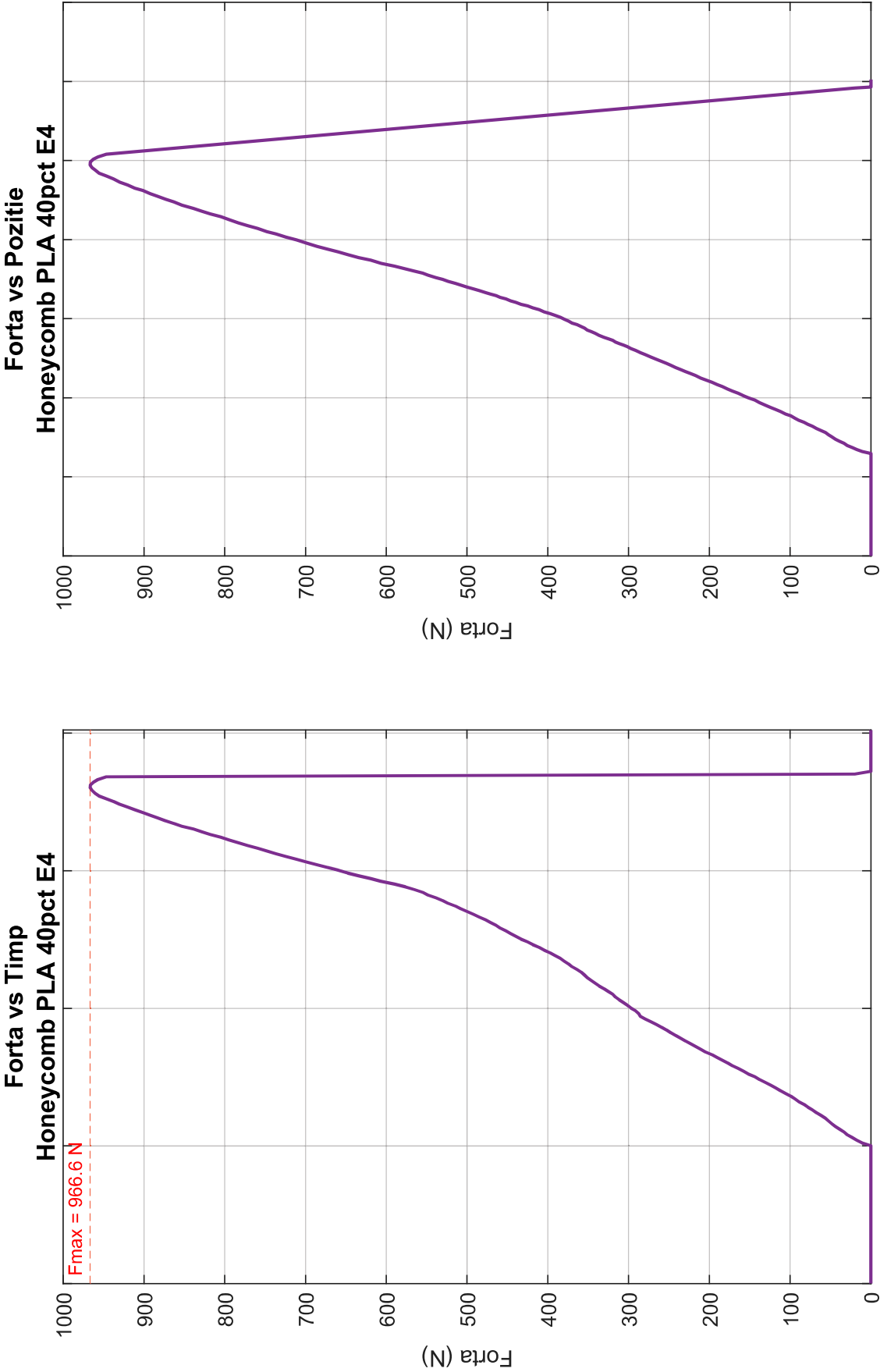
Right Graph: Forta vs Timp
 The x-axis represents time in seconds, ranging from 0 to 1200. The curve peaks at approximately 1126.2 N at a time of about 110 seconds. The force then decreases as time increases further.

Common Data Points (Estimated):

Force (N)	Displacement (mm) [Forta vs Pozitie]	Time (s) [Forta vs Timp]
0	0	0
1126.2	~110	~110
1000	~250	~250
800	~450	~450
600	~650	~650
400	~850	~850
200	~1050	~1050
0	~1200	~1200

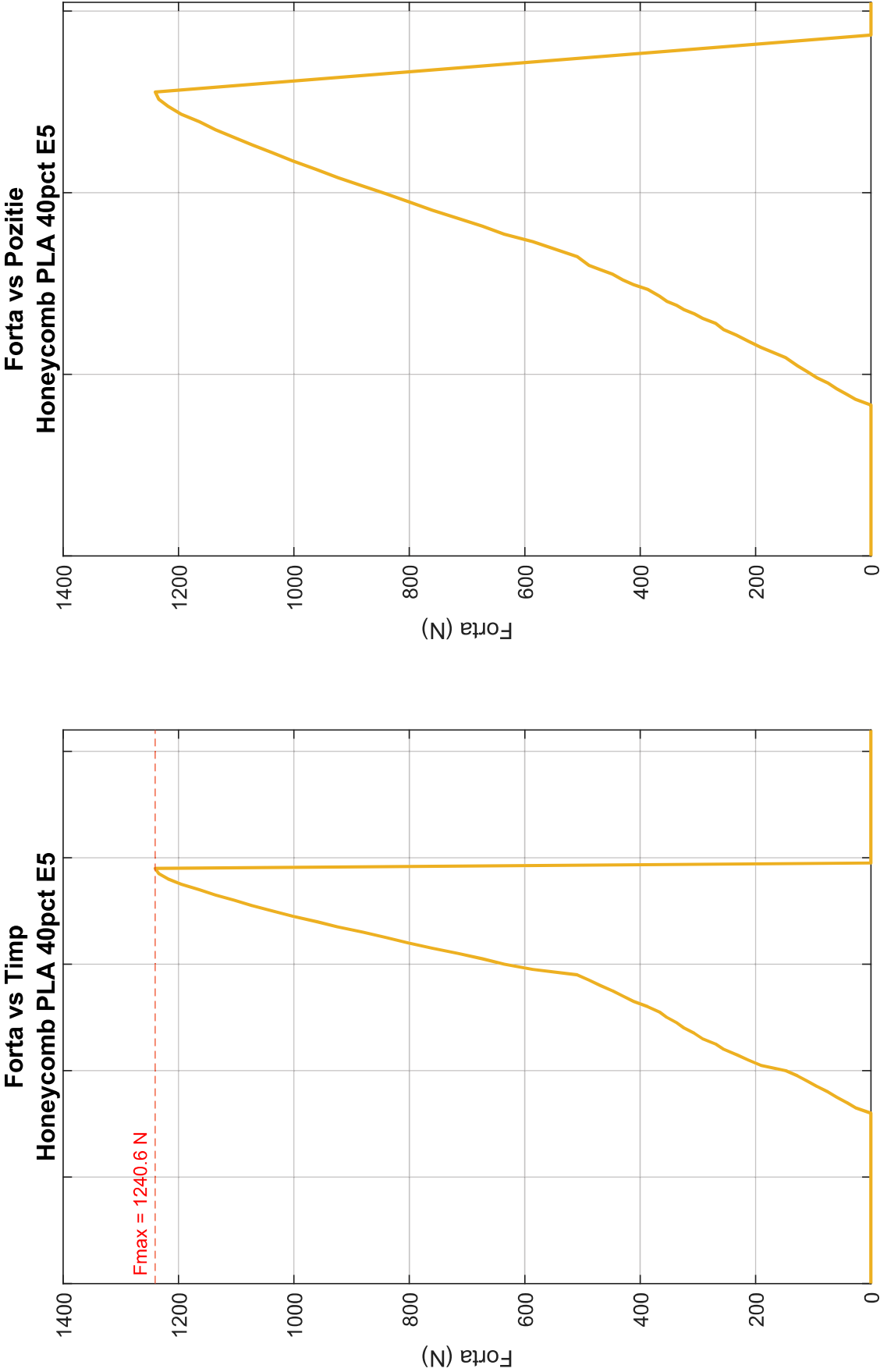
Fmax = 1126.25 N	Fmed = 487.25 N	Durata = 24.41 s	Deplasare = 1392 pasi
------------------	-----------------	------------------	-----------------------

Testare Tractiune — Honeycomb PLA 40pct E4



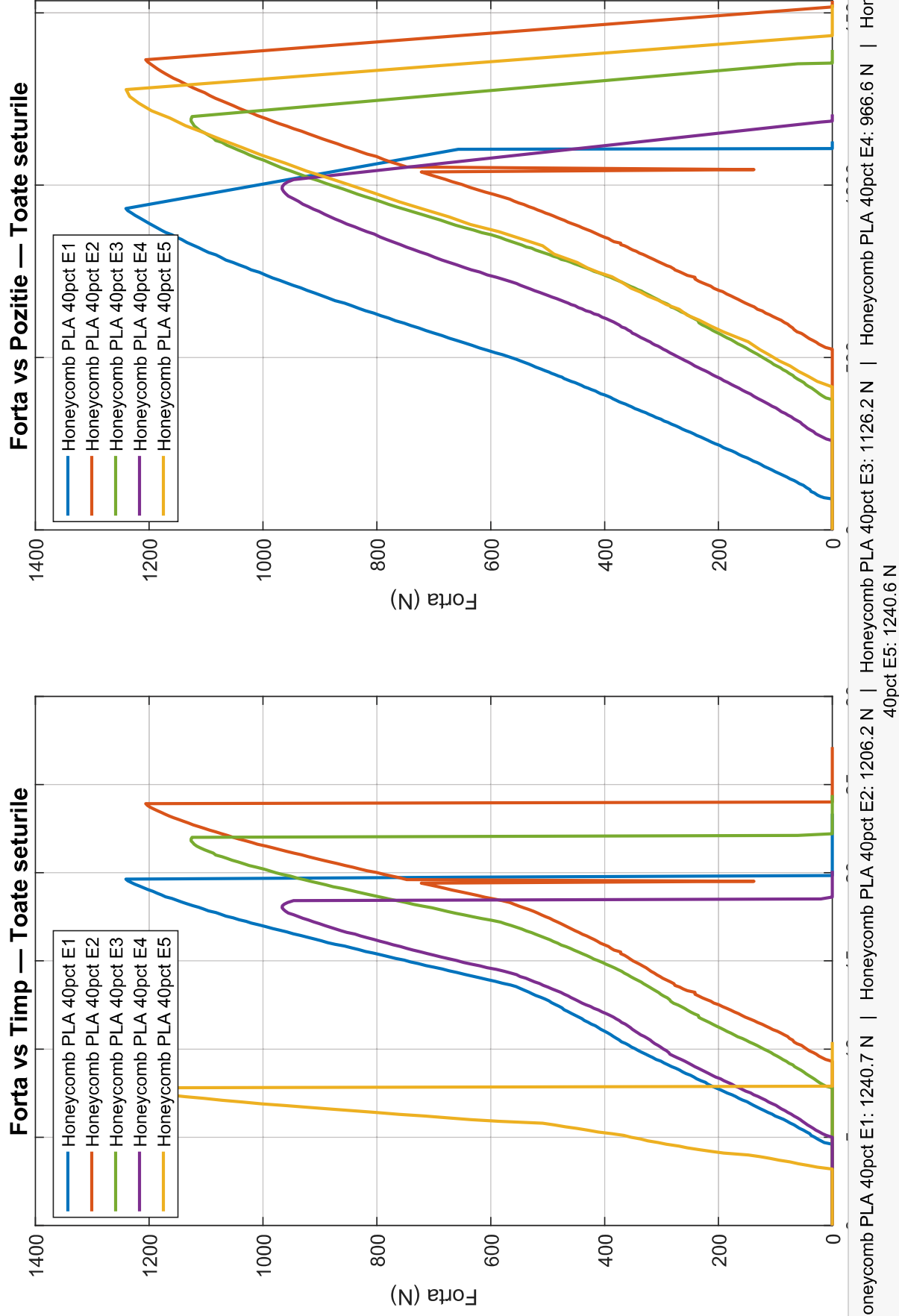
Fmax = 966.59 N | Fmed = 436.29 N | Durata = 20.11 s | Deplasare = 1205 pasi

Testare Tractiune — Honeycomb PLA 40pct E5

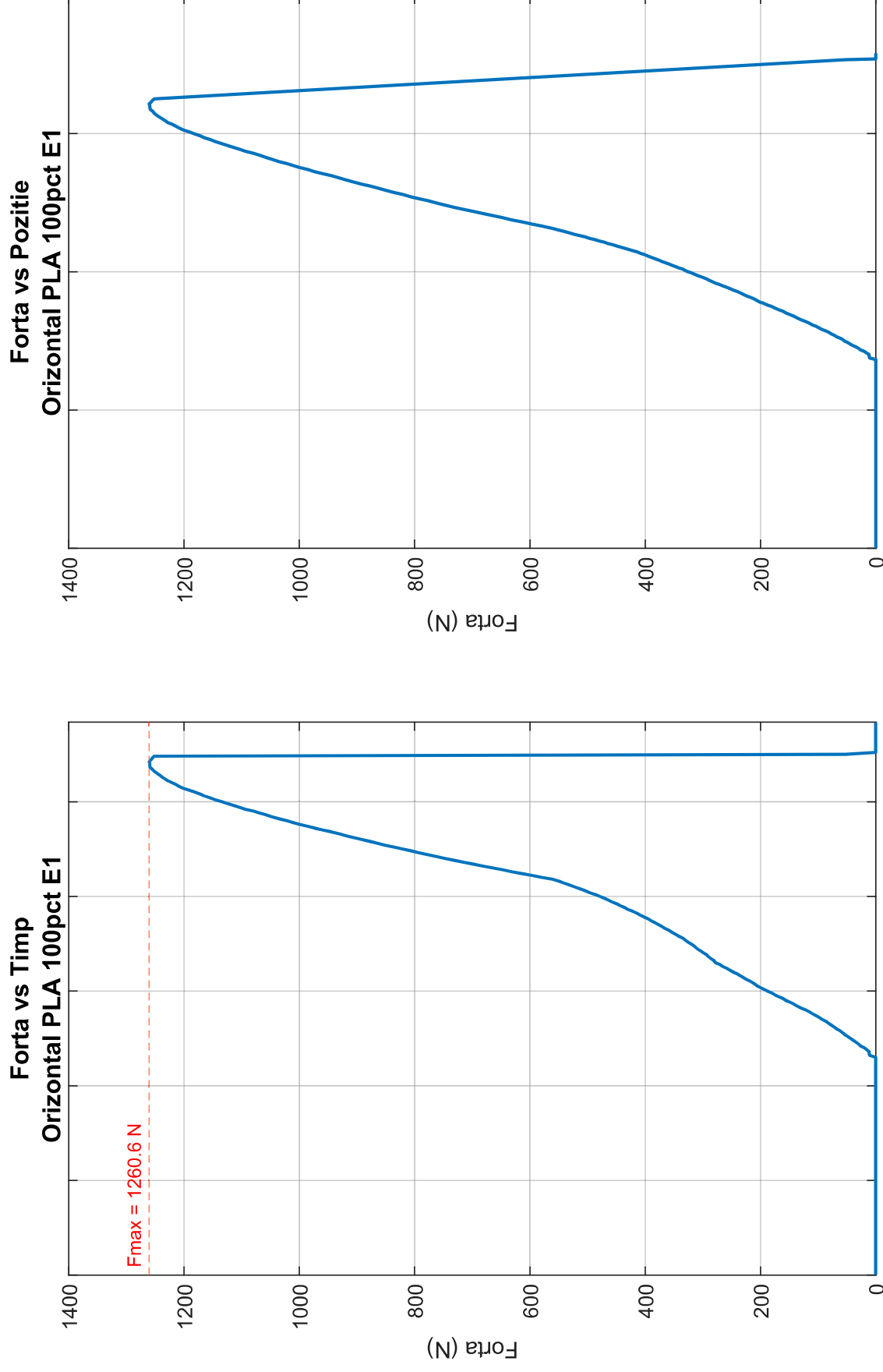


Fmax = 1240.60 N | Fmed = 568.33 N | Durata = 10.40 s | Deplasare = 1524 pasi

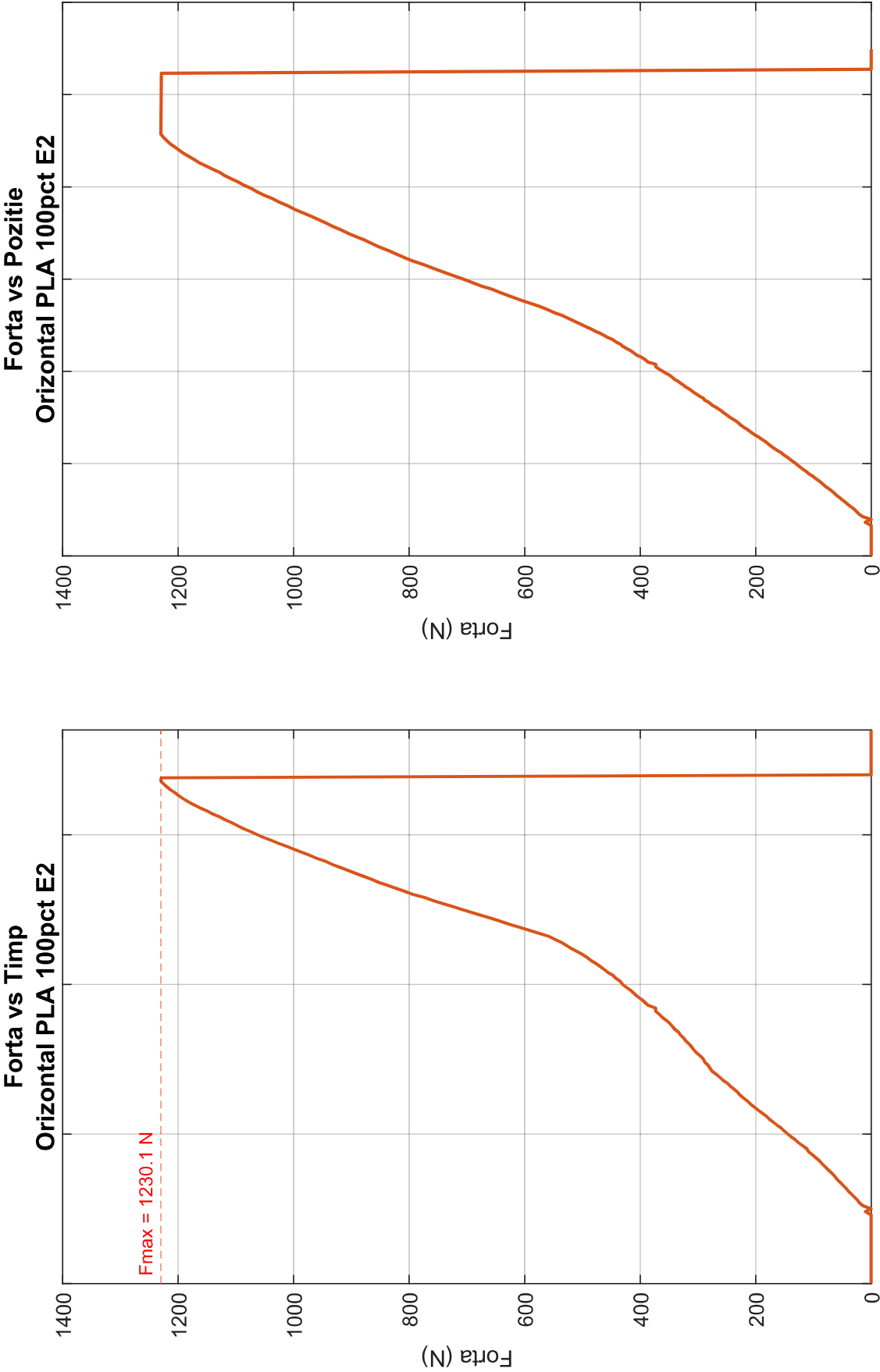
Testare Tractiune — Comparatie seturi



Testare Tractiune — Orizontal PLA 100pct E1

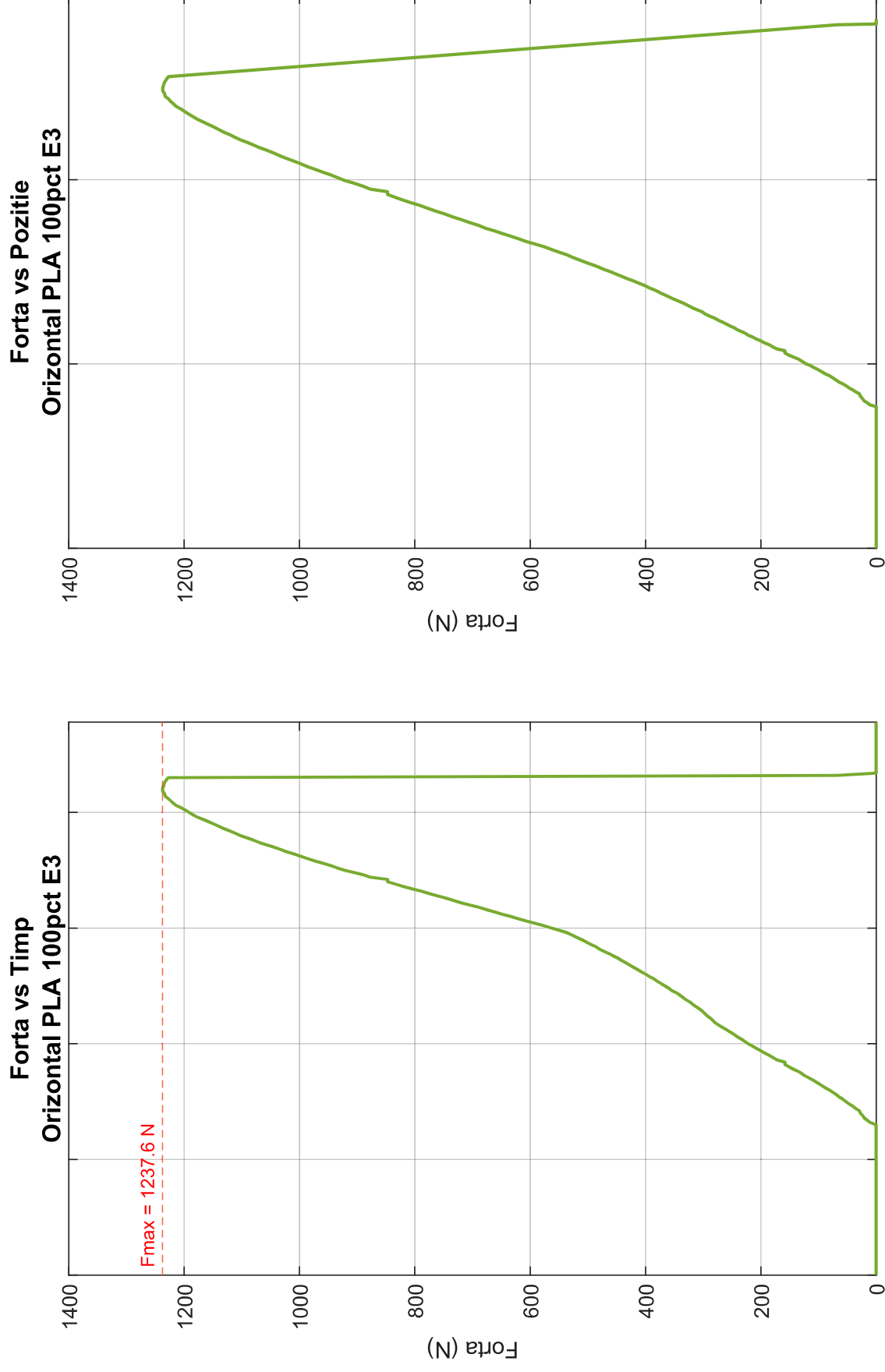


Testare Tractiune — Orizzontal PLA 100pct E2

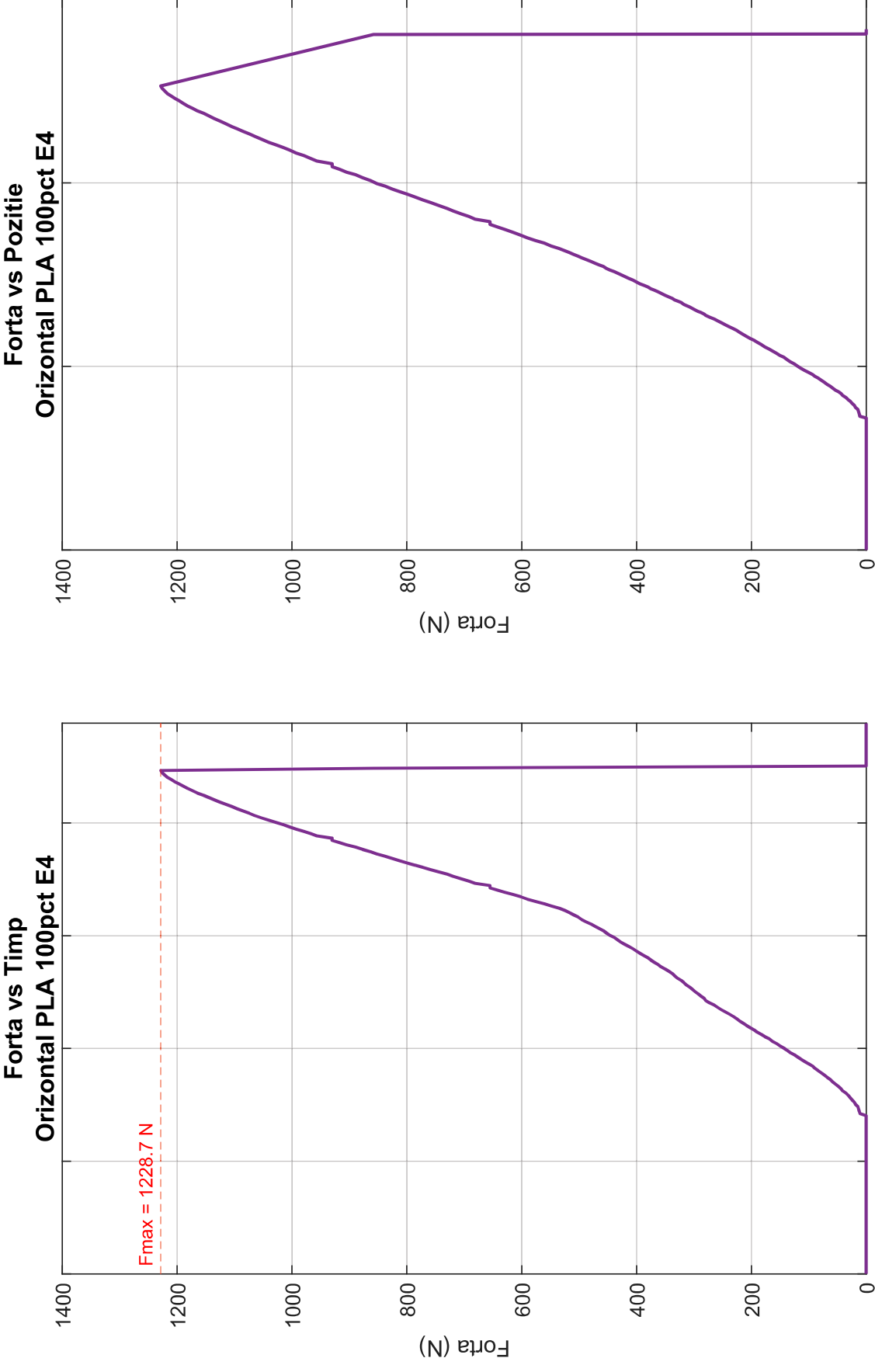


Fmax = 1230.11 N | Fmed = 516.08 N | Durata = 18.51 s | Deplasare = 1098 pasi

Testare Tractiune — Orizzontal PLA 100pct E3

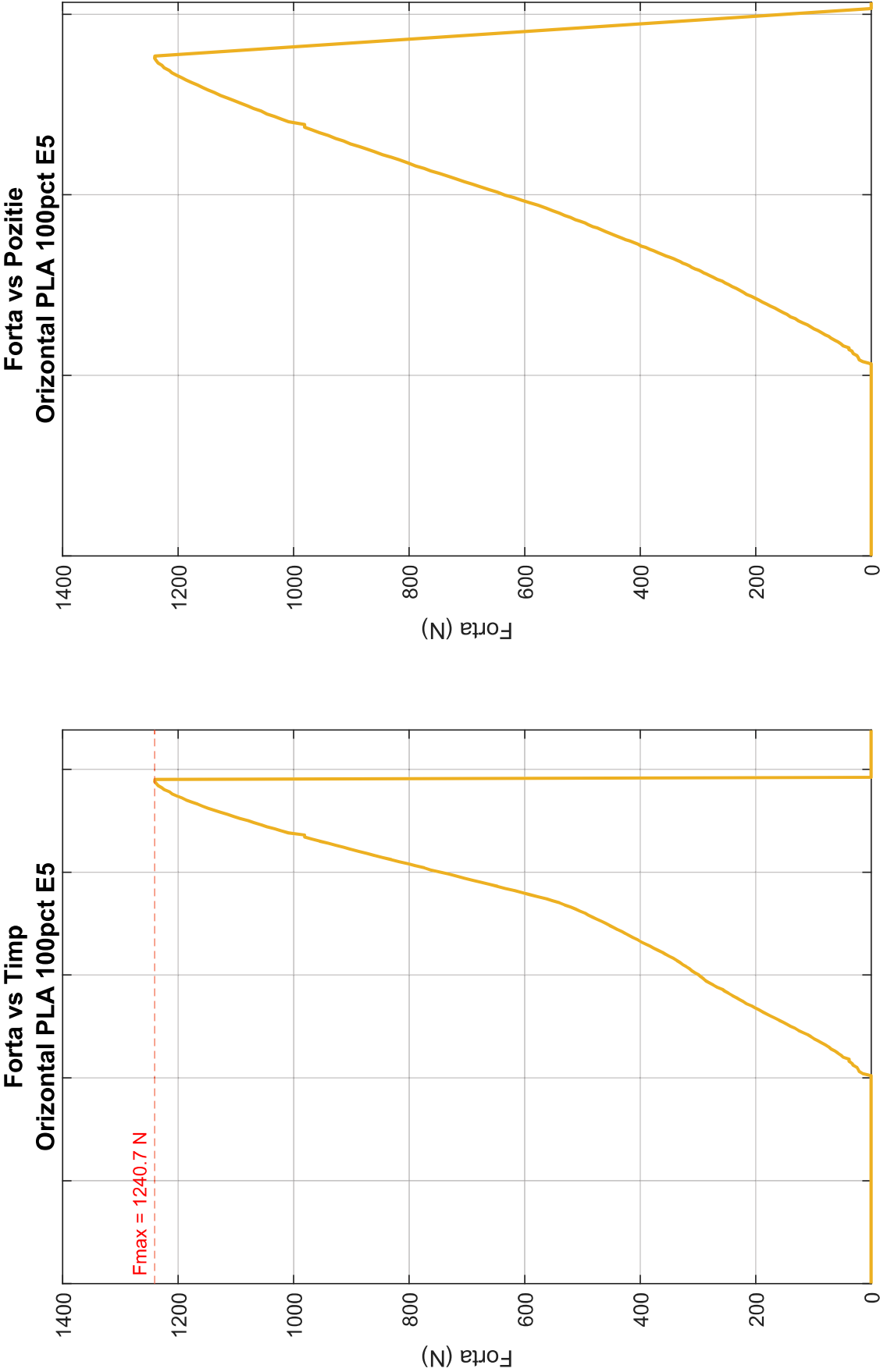


Testare Tractiune — Orizontal PLA 100pct E4



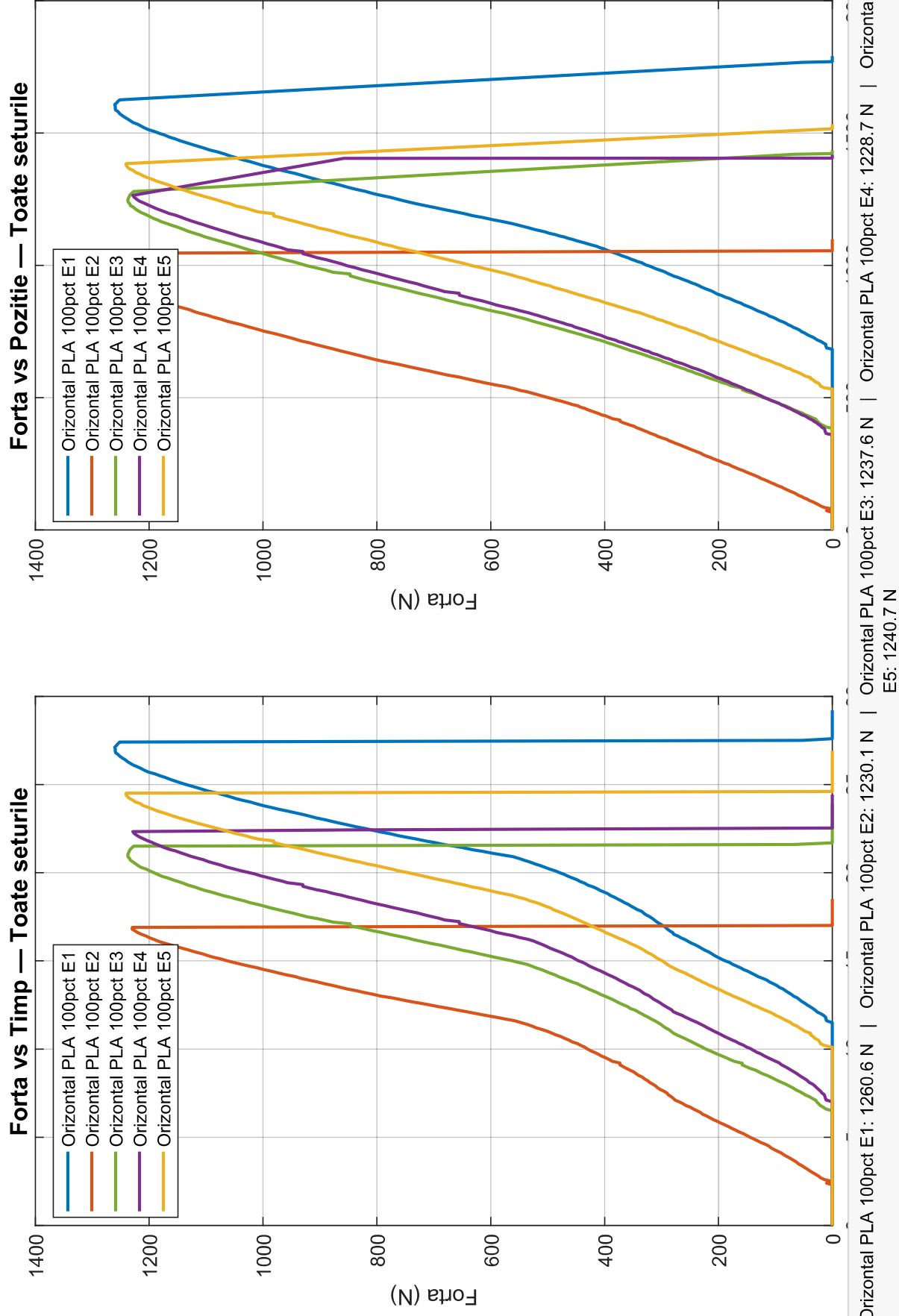
$F_{max} = 1228.70 \text{ N}$	$F_{med} = 520.31 \text{ N}$	$Durata = 24.43 \text{ s}$	$Deplasare = 1418 \text{ pas}$
-------------------------------	------------------------------	----------------------------	--------------------------------

Testare Tractiune — Orizzontal PLA 100pct E5

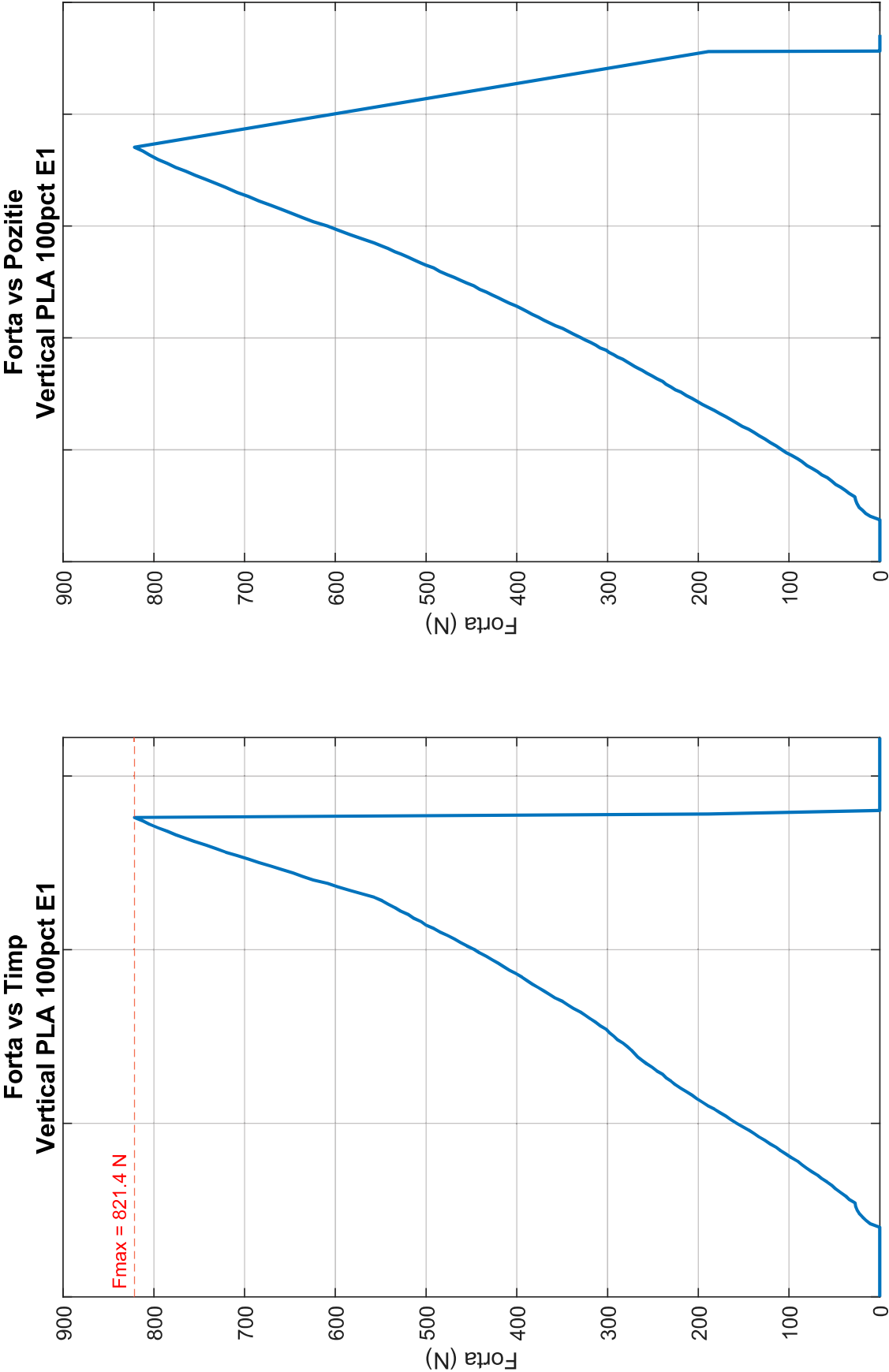


Fmax = 1240.68 N | Fmed = 543.63 N | Durata = 26.91 s | Deplasare = 1533 pasi

Testare Tractiune — Comparatie seturi

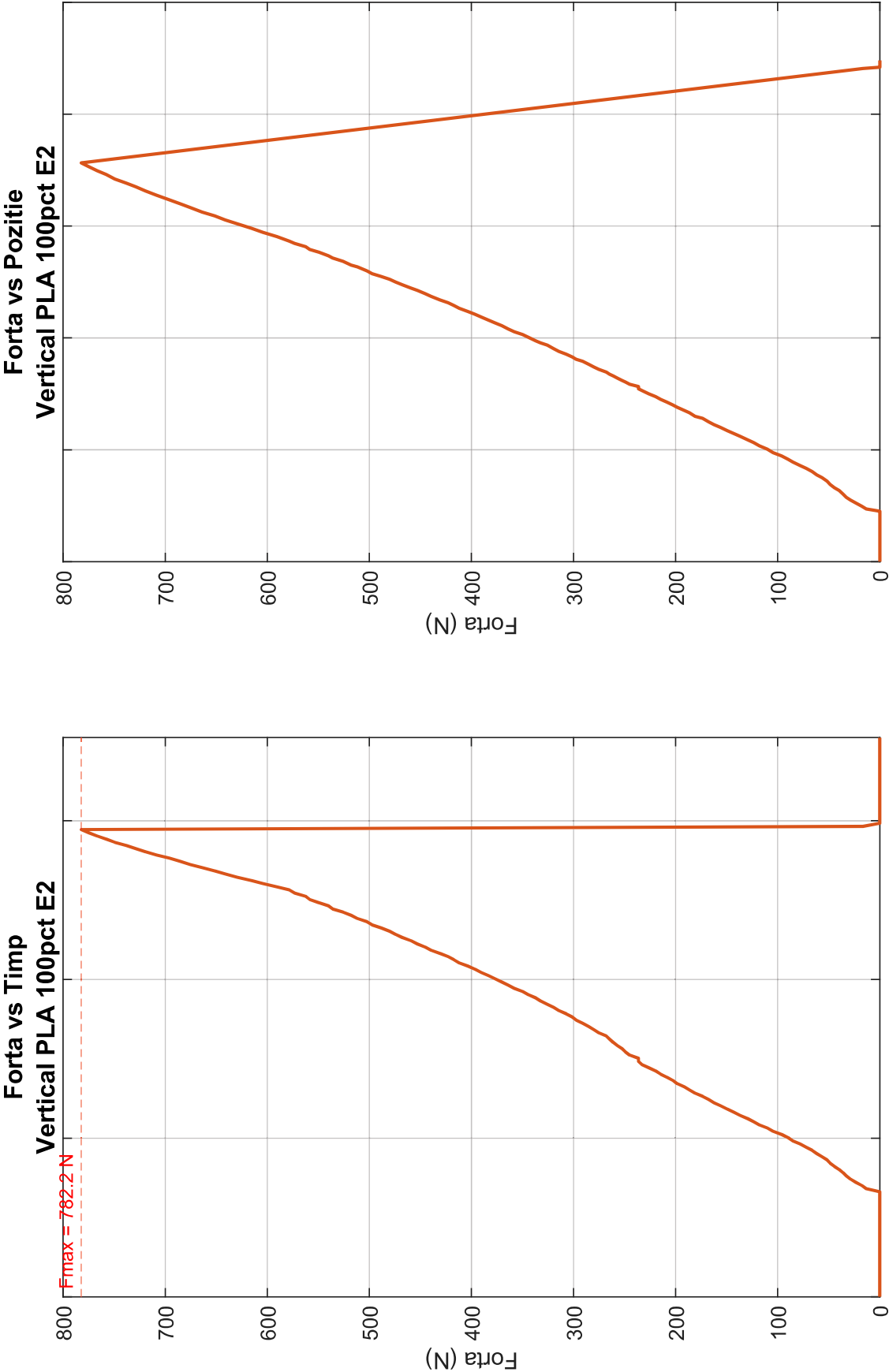


Testare Trattiune — Vertical PLA 100pct E1



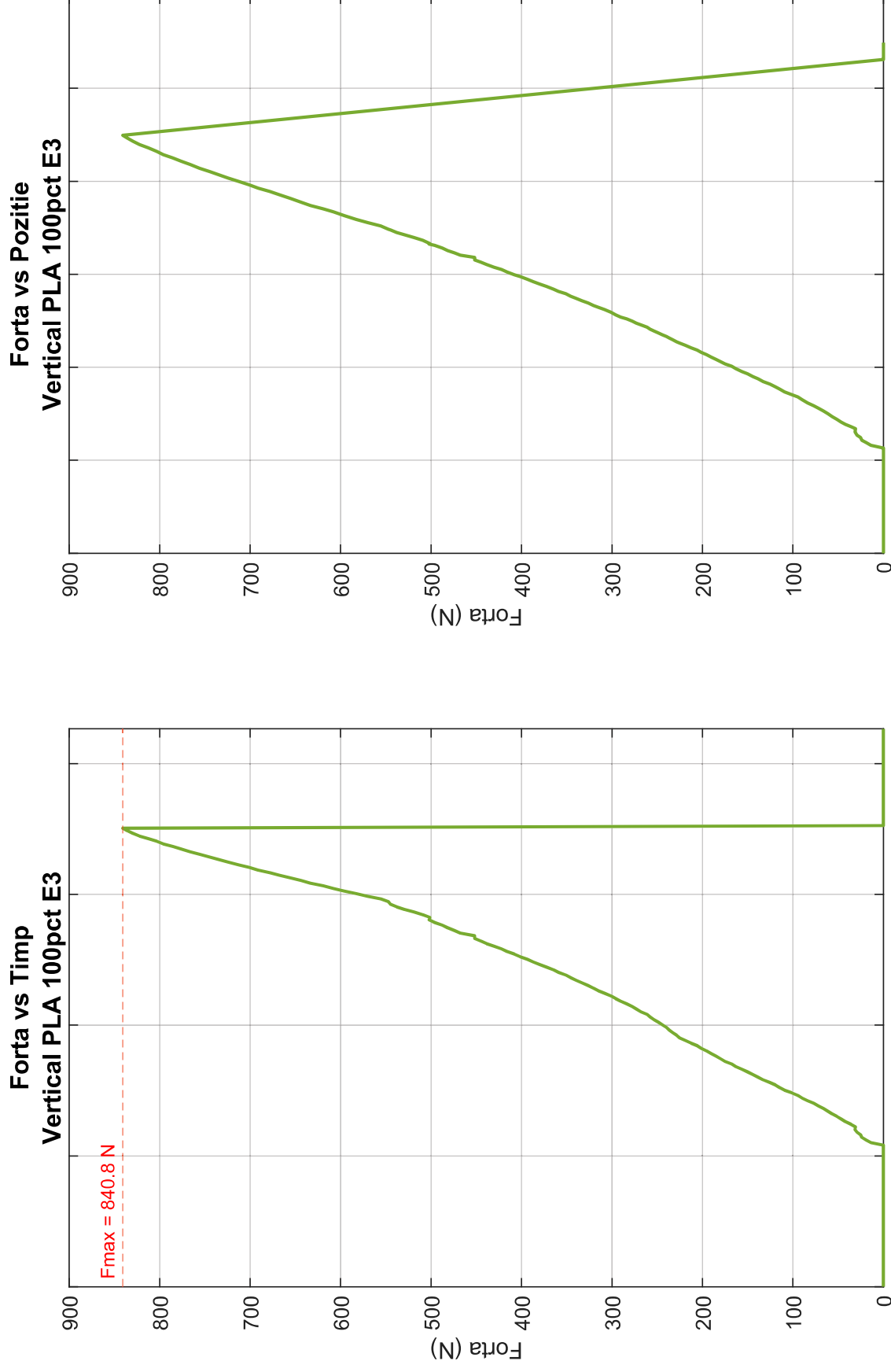
Fmax = 821.38 N | Fmed = 347.23 N | Durata = 16.11 s | Deplasare = 942 pasi

Testare Trattiune — Vertical PLA 100pct E2

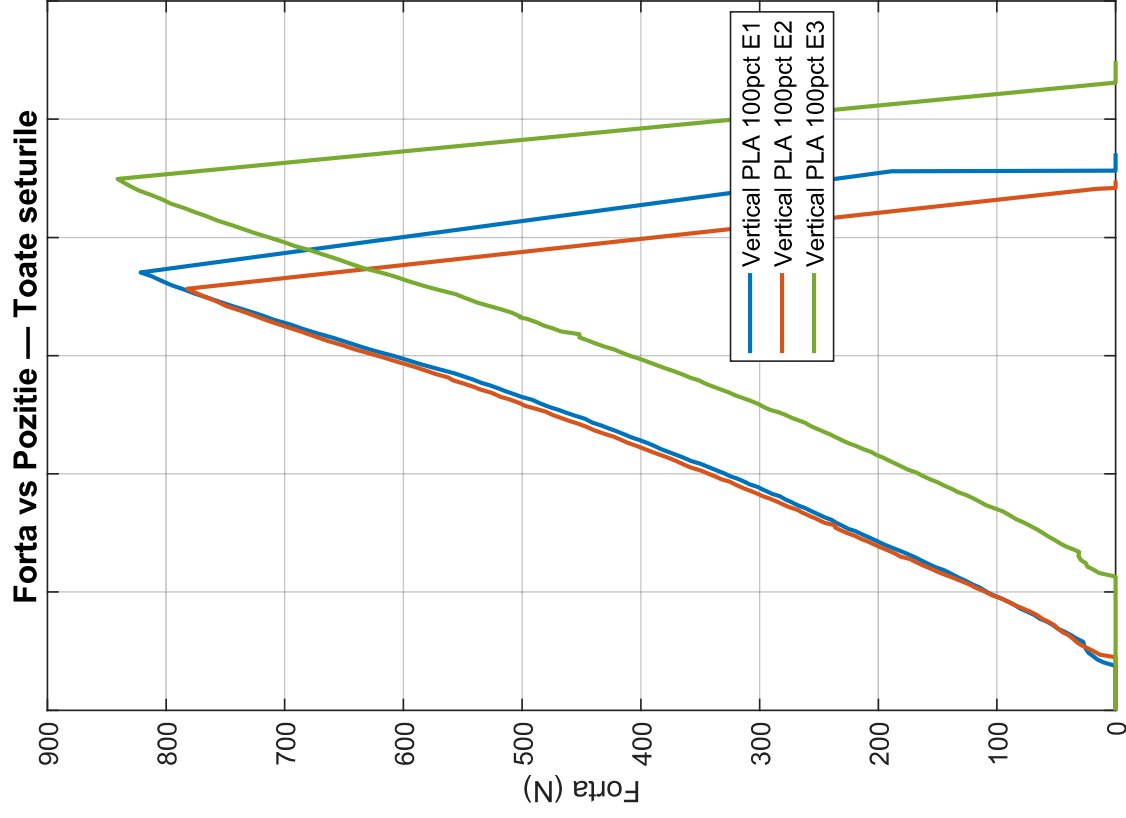
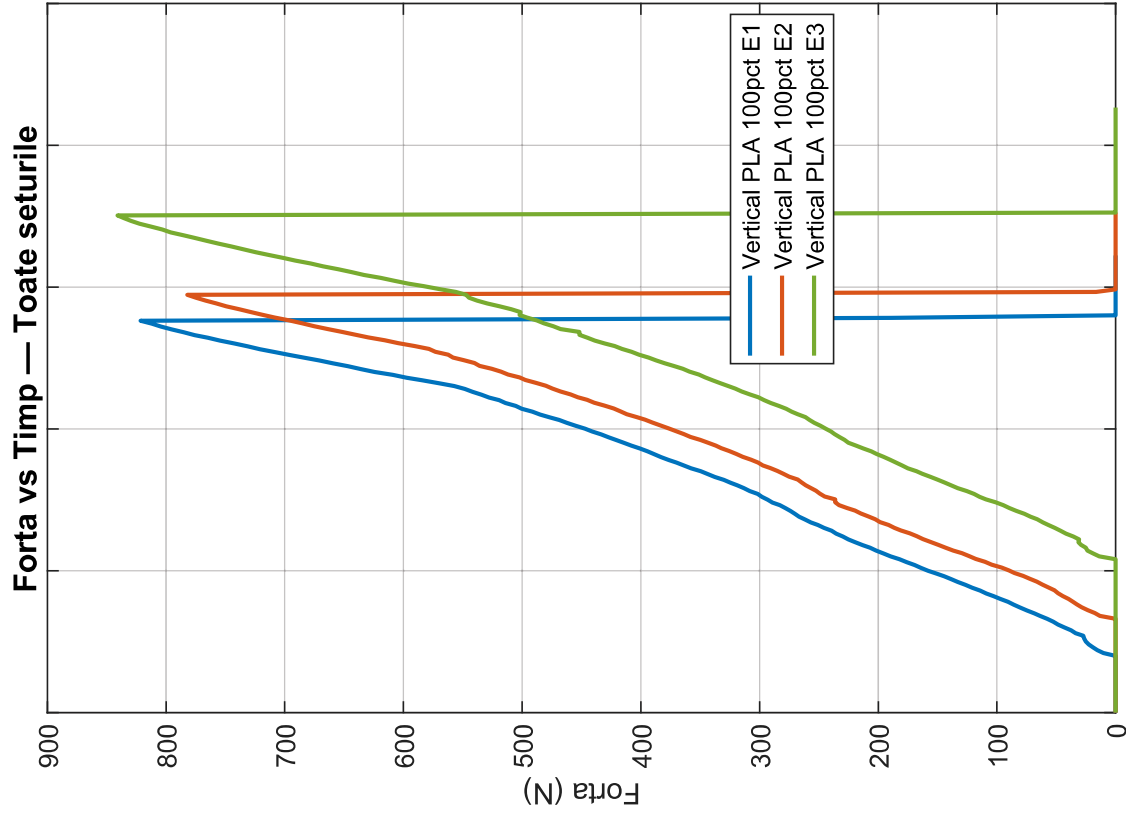


Fmax = 782.21 N | Fmed = 342.51 N | Durata = 17.62 s | Deplasare = 896 pasi

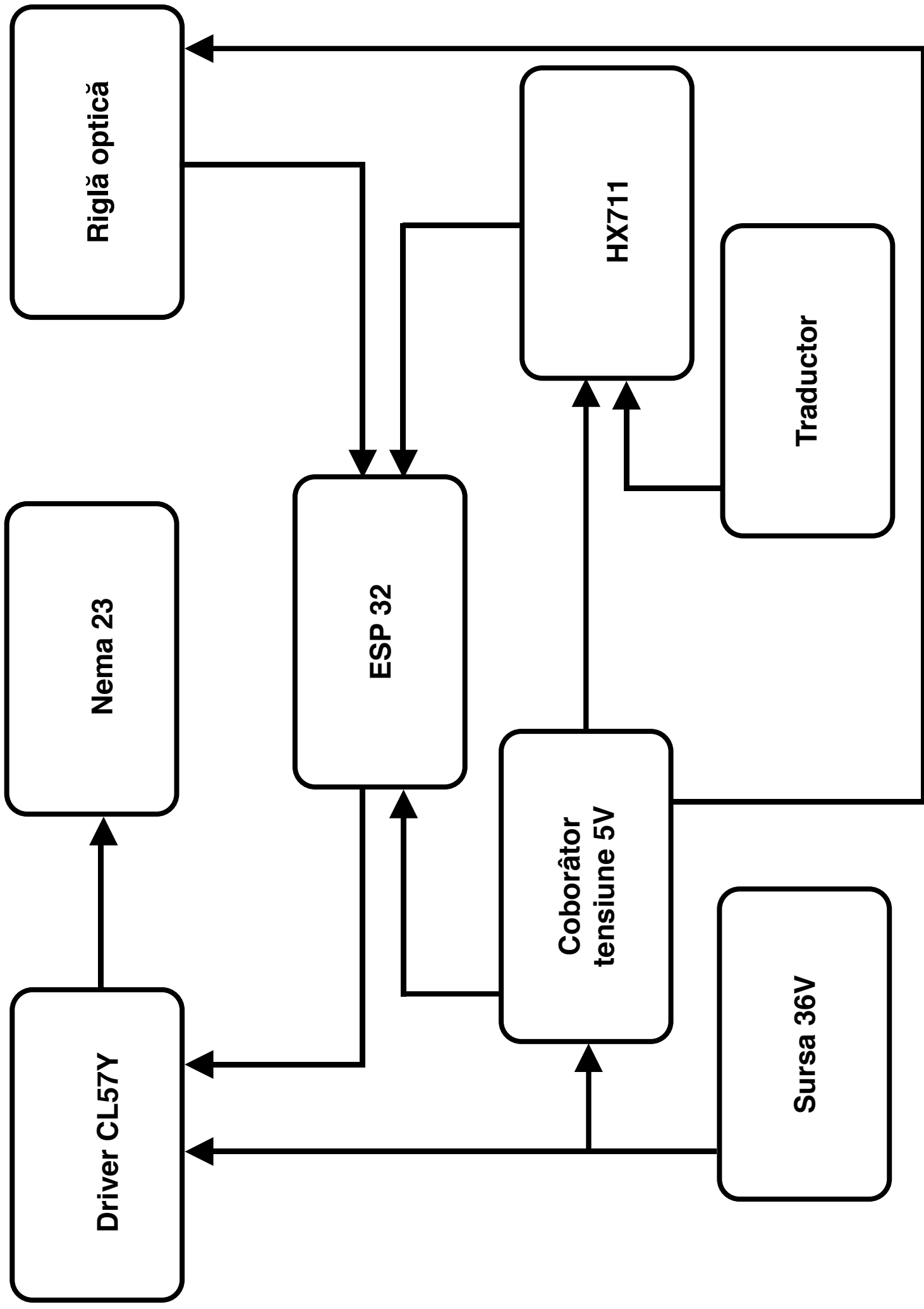
Testare Tractiune — Vertical PLA 100pct E3

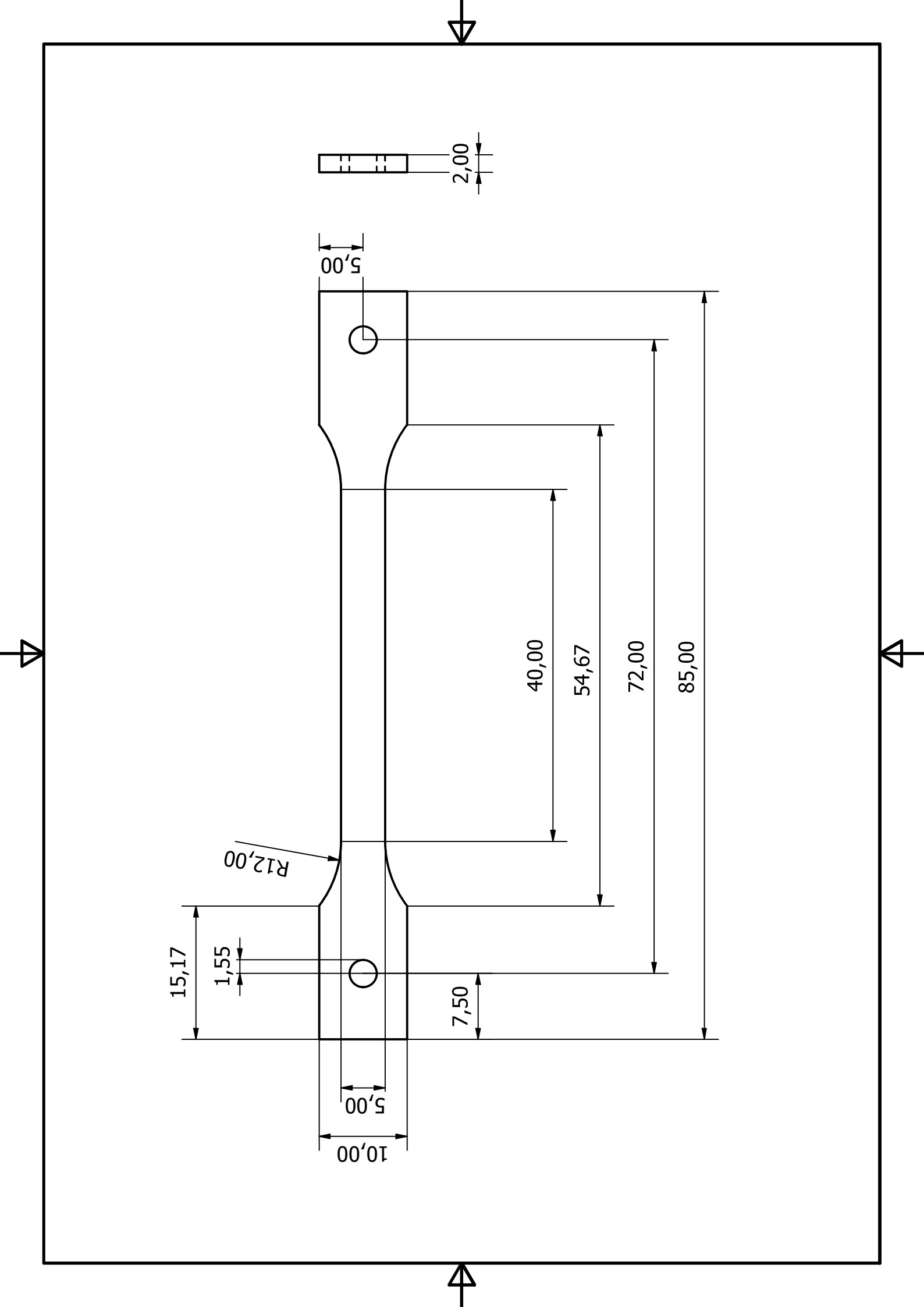


Testare Tractiune — Comparatie seturi



Fmax: Vertical PLA 100pct E1: 821.4 N | Vertical PLA 100pct E2: 782.2 N | Vertical PLA 100pct E3: 840.8 N





Cod utilizat pentru procesarea datelor (Matlab):

```
1. % =====
2. % PROCESARE DATE STAND TESTARE - pana la 5 seturi CSV
3. % Exporta grafice individuale + grafic combinat intr-un PDF
4. % =====
5.
6. clear; clc; close all;
7.
8. %% CONFIGURARE
9. titlu_raport = 'Testare Tractiune';
10. nume_pdf = 'rezultate_testare.pdf';
11.
12. culori = [
13.     0.0 0.45 0.74;
14.     0.85 0.33 0.10;
15.     0.47 0.67 0.19;
16.     0.49 0.18 0.56;
17.     0.93 0.69 0.13;
18. ];
19.
20. %% SELECTARE FISIERE
21. [numeFisiere, cale] = uigetfile('*.csv', ...
22.     'Selecteaza fisierele CSV (max 5, Ctrl+click pentru mai multe)', ...
23.     'MultiSelect', 'on');
24.
25. if isequal(numeFisiere, 0)
26.     error('Niciun fisier selectat. Scriptul s-a oprit.');
```

```
27. end
28.
29. if ischar(numeFisiere)
30.     numeFisiere = {numeFisiere};
31. end
32.
33. if length(numeFisiere) > 5
34.     warning('S-au selectat %d fisiere, se folosesc doar primele 5.', length(numeFisiere));
35.     numeFisiere = numeFisiere(1:5);
36. end
37.
38. fisiere = cell(1, 5);
39. etichete = cell(1, 5);
40. for i = 1:length(numeFisiere)
41.     fisiere{i} = fullfile(cale, numeFisiere{i});
42.     [~, nume_fara_ext, ~] = fileparts(numeFisiere{i});
43.     etichete{i} = strrep(nume_fara_ext, '_', ' ');
44. end
45. for i = length(numeFisiere)+1:5
46.     fisiere{i} = '';
47.     etichete{i} = sprintf('Set %d', i);
48. end
49.
50. nume_pdf_complet = fullfile(cale, nume_pdf);
51.
52. %% INCARCARE DATE
53. date = {};
54. valid = false(1, 5);
55.
56. for i = 1:5
57.     if isempty(fisiere{i}), continue; end
58.     if ~isfile(fisiere{i})
59.         warning('Fisierul "%s" nu a fost gasit. Set %d ignorat.', fisiere{i}, i);
60.         continue;
61.     end
62.     try
63.         T = readtable(fisiere{i});
64.         T.Properties.VariableNames = {'Timp_ms', 'Pozitie_pasi', 'Forta_N'};
65.         T.Forta_N = abs(T.Forta_N);
66.         date{i} = T;
67.         valid(i) = true;
68.         fprintf('Set %d incarcat: %s (%d puncte)\n', i, numeFisiere{i}, height(T));
69.     catch e
```

```

70.         warning('Eroare la citirea "%s": %s', fisiere{i}, e.message);
71.     end
72. end
73.
74. n_valide = sum(valid);
75. if n_valide == 0
76.     error('Niciun fisier CSV valid gasit.');
```

77. end

```

78. idx_valide = find(valid);
79.
80. %% STATISTICI
81. fprintf('\n--- STATISTICI ---\n');
82. stats = struct();
83. for k = 1:length(idx_valide)
84.     i = idx_valide(k);
85.     T = date{i};
86.     F = T.Forta_N;
87.     t = T.Timp_ms / 1000;
88.
89.     stats(k).label      = etichete{i};
90.     stats(k).F_max      = max(F);
91.     F_activ            = F(F > 0);
92.     stats(k).F_medie    = mean(F_activ);
93.     stats(k).t_total    = t(end) - t(1);
94.     stats(k).deplasare  = T.Pozitie_pasi(end) - T.Pozitie_pasi(1);
95.
96.     fprintf('  %s: Fmax=%.2f N | Fmed=%.2f N | Durata=%.2f s | Deplasare=%d pasi\n', ...
97.         stats(k).label, stats(k).F_max, stats(k).F_medie, ...
98.         stats(k).t_total, stats(k).deplasare);
99. end
100.
101. %% GRAFICE INDIVIDUALE
102. if isfile(num_pdf_complet), delete(num_pdf_complet); end
103.
104. for k = 1:length(idx_valide)
105.     i      = idx_valide(k);
106.     T      = date{i};
107.     t      = T.Timp_ms / 1000;
108.     F      = T.Forta_N;
109.     culoare = culori(i, :);
110.
111.     fig = figure('Visible', 'off', 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 28 18]);
112.
113.     subplot(1, 2, 1);
114.     plot(t, F, 'Color', culoare, 'LineWidth', 1.5);
115.     xlabel('Timp (s)', 'FontSize', 11);
116.     ylabel('Forta (N)', 'FontSize', 11);
117.     title(sprintf('Forta vs Timp\n%s', etichete{i}), 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
118.     grid on; box on;
119.     xlim([t(1) t(end)]);
120.     yline(stats(k).F_max, '--r', sprintf('Fmax = %.1f N', stats(k).F_max), ...
121.         'LabelHorizontalAlignment', 'left', 'FontSize', 9);
122.
123.     subplot(1, 2, 2);
124.     plot(T.Pozitie_pasi, F, 'Color', culoare, 'LineWidth', 1.5);
125.     xlabel('Pozitie (pasi encoder)', 'FontSize', 11);
126.     ylabel('Forta (N)', 'FontSize', 11);
127.     title(sprintf('Forta vs Pozitie\n%s', etichete{i}), 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
128.     grid on; box on;
129.
130.     annotation('textbox', [0.02 0.01 0.96 0.08], ...
131.         'String', sprintf('Fmax = %.2f N   |   Fmed = %.2f N   |   Durata = %.2f s   |   Deplasare = %d pasi',
132.             ...
133.             stats(k).F_max, stats(k).F_medie, stats(k).t_total, stats(k).deplasare), ...
134.             'FontSize', 9, 'EdgeColor', [0.8 0.8 0.8], ...
135.             'BackgroundColor', [0.97 0.97 0.97], ...
136.             'HorizontalAlignment', 'center', 'FitBoxToText', 'off');
137.
138.     sgtitle(sprintf('%s - %s', titlu_raport, etichete{i}), 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
139.
140.     exportgraphics(fig, num_pdf_complet, 'ContentType', 'vector', 'Append', true);
141.     close(fig);

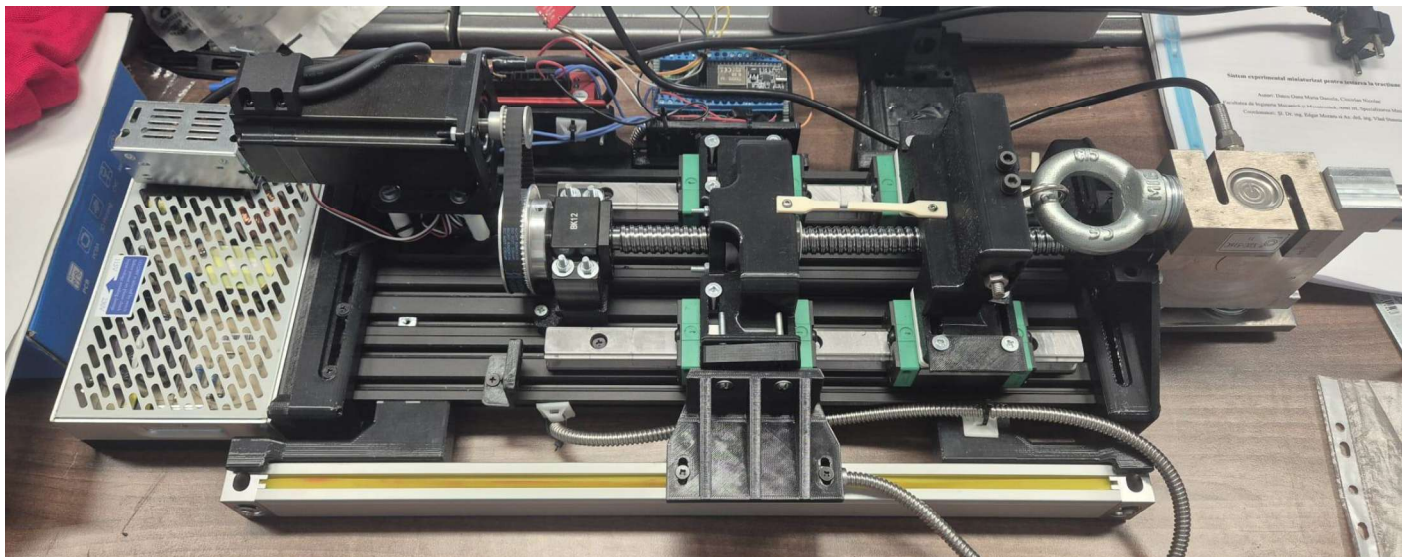
```

```

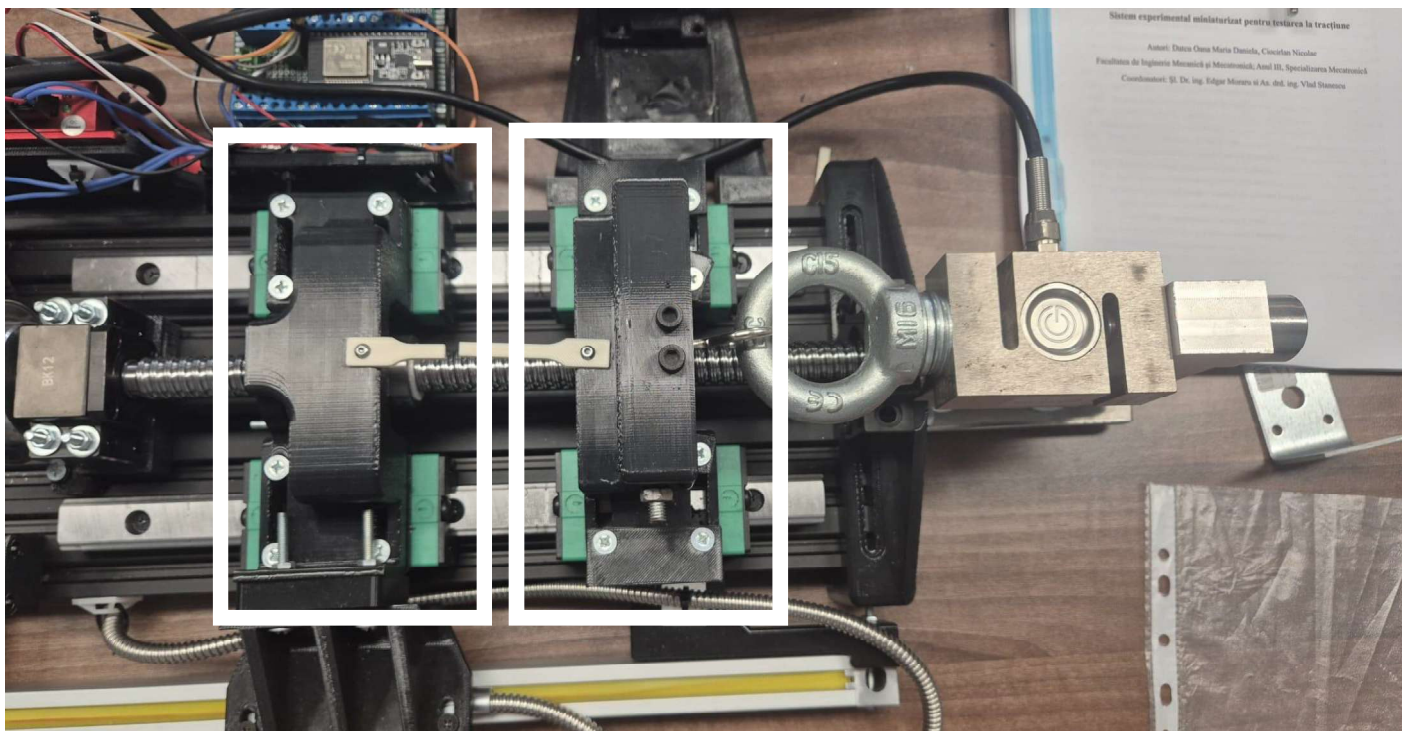
141.     fprintf('Pagina %d/%d exportata (%s)\n', k, n_valide + 1, etichete{i});
142. end
143.
144. %% GRAFIC COMBINAT
145. fig_comb = figure('Visible', 'off', 'Units', 'centimeters', 'Position', [0 0 28 18]);
146.
147. ax1 = subplot(1, 2, 1);
148. hold(ax1, 'on');
149. for k = 1:length(idx_valide)
150.     i = idx_valide(k);
151.     T = date{i};
152.     plot(ax1, T.Timp_ms/1000, T.Forta_N, 'Color', culori(i,:), 'LineWidth', 1.5, ...
153.          'DisplayName', etichete{i});
154. end
155. hold(ax1, 'off');
156. xlabel(ax1, 'Timp (s)', 'FontSize', 11);
157. ylabel(ax1, 'Forta (N)', 'FontSize', 11);
158. title(ax1, 'Forta vs Timp – Toate seturile', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
159. legend(ax1, 'Location', 'best', 'FontSize', 9);
160. grid(ax1, 'on'); box(ax1, 'on');
161.
162. ax2 = subplot(1, 2, 2);
163. hold(ax2, 'on');
164. for k = 1:length(idx_valide)
165.     i = idx_valide(k);
166.     T = date{i};
167.     plot(ax2, T.Pozitie_pasi, T.Forta_N, 'Color', culori(i,:), 'LineWidth', 1.5, ...
168.          'DisplayName', etichete{i});
169. end
170. hold(ax2, 'off');
171. xlabel(ax2, 'Pozitie (pasi encoder)', 'FontSize', 11);
172. ylabel(ax2, 'Forta (N)', 'FontSize', 11);
173. title(ax2, 'Forta vs Pozitie – Toate seturile', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold');
174. legend(ax2, 'Location', 'best', 'FontSize', 9);
175. grid(ax2, 'on'); box(ax2, 'on');
176.
177. fmax_str = '';
178. for k = 1:length(idx_valide)
179.     fmax_str = [fmax_str sprintf('%s: %.1f N', stats(k).label, stats(k).F_max)]; %#ok<AGROW>
180.     if k < length(idx_valide), fmax_str = [fmax_str ' | ']; end %#ok<AGROW>
181. end
182. annotation('textbox', [0.02 0.01 0.96 0.08], ...
183.            'String', ['Fmax: ' fmax_str], ...
184.            'FontSize', 9, 'EdgeColor', [0.8 0.8 0.8], ...
185.            'BackgroundColor', [0.97 0.97 0.97], ...
186.            'HorizontalAlignment', 'center', 'FitBoxToText', 'off');
187.
188. sgtitle(sprintf('%s – Comparatie seturi', titlu_raport), 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');
189.
190. exportgraphics(fig_comb, nume_pdf_complet, 'ContentType', 'vector', 'Append', true);
191. close(fig_comb);
192.
193. fprintf('\nPDF generat: %s\n', nume_pdf_complet);
194. fprintf('Total pagini: %d (%d individuale + 1 combinat)\n', n_valide + 1, n_valide);

```

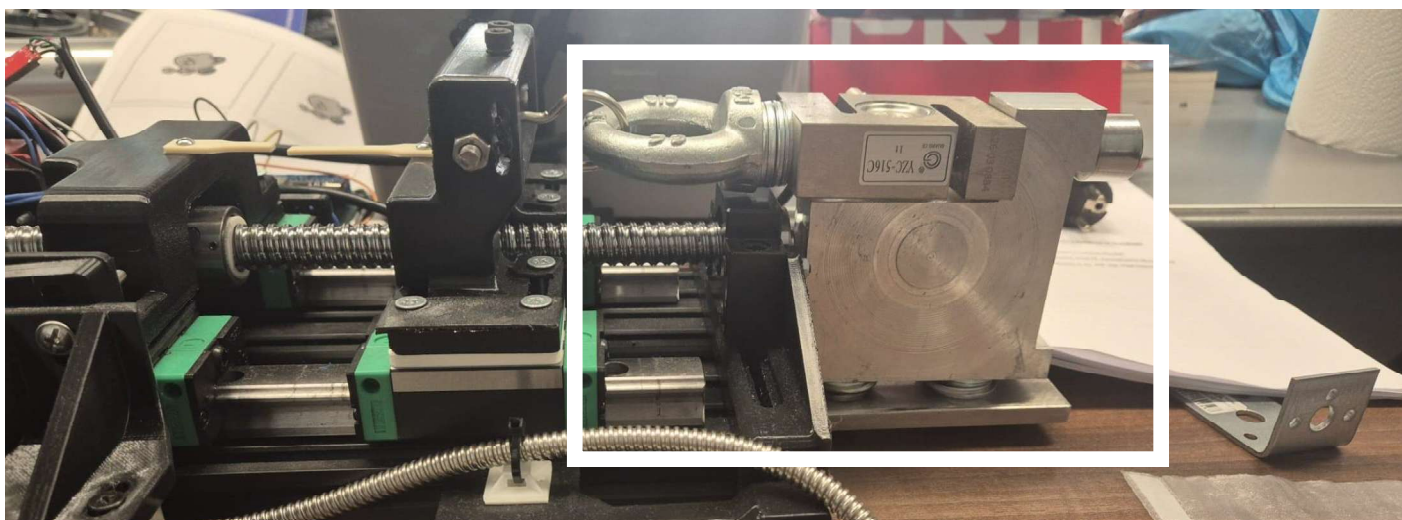
Anexa 5



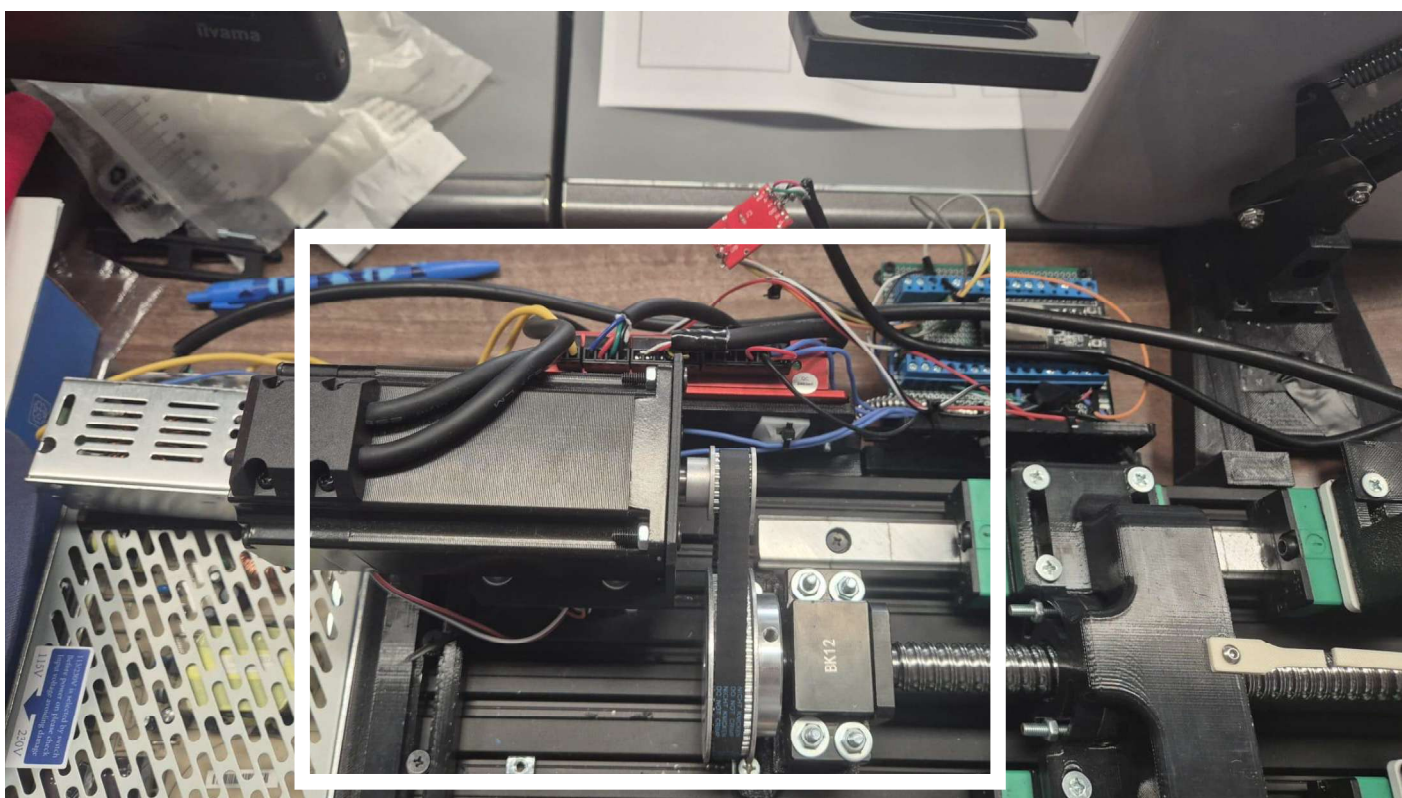
Sistem experimental miniaturizat pentru testarea la tracțiune



Bloc mobil și fix pentru prinderea epruvetelor



Traductor și prinderea traductorului



Motor și reductor