

**Academia
Oamenilor de Știință
din România**



**Academy
of Romanian
Scientists**

Add: Splaiul Independenței nr. 54 sector 5, 050094, București, ROMANIA, Cod Fiscal: 5091859
Tel. 00-4021/314.74.91; Fax. 00-4021/314.75.39, Web-site: www.aos.ro, E-mail: aosromania@yahoo.com

**Materiale compozite pentru aplicații în medicină și inginerie, obținute prin
fabricație aditivă**

**Etapă 2
Influența parametrilor de printare asupra comportamentului mecanic al
materialelor printate 3D**

Autor:

Conf. dr. ing. Florin BACIU

Coordonator:

Prof. dr. ing. Anton HADĂR

CUPRINS

1. Introducere	2
2. Tehnologii folosite	3
2.1 Printarea prin procesul FDM – Modelare prin Extrudare Termoplastică;	3
2.2 Determinari experimentale ale caracteristicilor mecanice	6
3. Rezultate experimentale și concluzii	11
3.1 Curbele caracteristice ale epruvetelor testate	11
3.2 Proprietățile mecanice ale epruvetelor testate	21
3.3 Concluzi	24
Bibliografie	26

1. Introducere

Fabricația aditivă (AM - Additive Manufacturing), cunoscută, de asemenea, și ca tipărire 3D (3D printing), a apărut în anii '80 și de atunci a fost subiectul multor cercetări și dezvoltări tehnologice, ajungând la multe tehnologii de tipărire 3D (SLS, SLM, LOM, FDM etc.). În 2012, publicația "The Economist" a descris fabricația aditivă, ca fiind a treia revoluție industrială și am asistat la utilizarea acesteia în diferite sectoare industriale, dar și în aplicații de prototipare a proiectelor ingineresti și de creare a unor produse personalizate pentru diferite categorii de utilizatori.

Imprimarea 3D este un proces de formare a unui obiect solid tridimensional de orice formă, realizat printr-un proces repetitiv de adăugare a unor straturi succesive de material, în diferite forme. Imprimarea 3D este, de asemenea, distinctă de tehnicile de prelucrare tradiționale, care se bazează, în principal, pe eliminarea materialelor prin metode, precum strunjirea, frezarea etc.

Imprimarea 3D este folosită în prezent în foarte multe domenii, punându-se bazele unui nou salt tehnologic, cu implicații în toate aspectele vieții personale, comerciale și industriale de zi cu zi.

Cunoașterea influenței parametrilor de printare asupra comportamentului materialului printat 3D ajută la îmbunătățirea și alegerea optimă a acestora pentru piesele prototip sau de serie.

În continuare sunt prezentate influențele gradului și modului de umplere în funcție de viteza de printare a unor epruvete standard în vederea determinării comportamentului mecanic al acestora (modul de elasticitate, limită de curgere și rezistența la rupere).

Aceste determinări sunt necesare în vederea alegerii parametrilor optimi pentru realizarea materialelor compozite pentru aplicații în medicină și inginerie.

2. Tehnologii folosite

2.1 Printarea prin procesul FDM – Modelare prin Extrudare Termoplastică

Tehnologia de prototipare rapidă FDM (Fused Deposition Modeling), în traducere Modelare prin Extrudare Termoplastică (depunere de material topit), este cea mai utilizată tehnologie de fabricare aditivă, datorită simplității și accesibilității acesteia. Este utilizată în modelare, în prototipare dar și în aplicații de producție. Alte denumiri utilizate sunt: MEM (Melting Extrusion Modeling), extrudare termoplastică TPE (Thermoplastic Extrusion), FFF (Fused Filament Fabrication).

Cu ajutorul unei aplicații dedicate, de tip software, modelul 3D dorit este feliat inițial în secțiuni transversale numite straturi (layere). Tehnologia de printare constă în trecerea unui filament din material plastic printr-un extrudor, care îl încălzește până la punctul de topire, aplicându-l apoi uniform (prin extrudare), strat peste strat, cu mare acuratețe, pentru a printa fizic modelul 3D, conform fișierului CAD.

Capul (extrudorul) este încălzit pentru a topi filamentul plastic, deplasându-se atât pe orizontală, cât și pe verticală, sub coordonarea unui mecanism de comandă numerică, controlat direct de aplicația CAM a imprimantei. În deplasare, capul depune un șir subțire de plastic extrudat, care la răcire se întărește imediat, lipindu-se de stratul precedent, pentru a forma modelul 3D dorit.

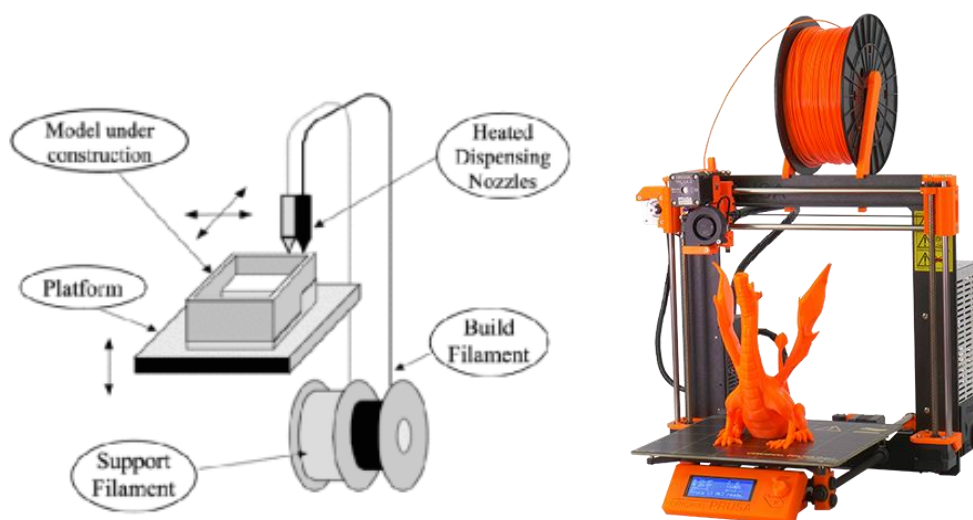


Fig.1 Principiul tehnologic FDM și modelul de imprimantă[1] folosit

Pentru a preveni deformarea pieselor, cauzată de răcirea bruscă a plasticului, unele modele profesionale de printere 3D includ, din construcție, o cameră închisă, încălzită la temperatură ridicată. Pentru geometrii complexe sau pentru modele în consolă, tehnologia FDM necesită printarea cu material suport, care va trebui ulterior îndepărtat manual. Principiul tehnologic și modelul de imprimantă folosit este prezentat în figura 1.

Materiale utilizate:

ABS (acrylonitrile butadiene styrene), PLA (polylactic acid), PVA (solubil), PC (polycarbonat), polietilena HDPE, polipropilena, elastomer, polyphenylsulfone (PPSU) și ULTEM Polyphenylsulfone (PPSF), poliamida, ceara de turnare.

Aplicații FDM/MEM:

Piese și subansamble rezistente pentru testare funcțională, design conceptual, modele de prezentare și marketing, piese de detaliu pentru aplicații alimentare sau medicale, subansamble din plastic pentru aplicații la temperaturi înalte, producții de serie foarte mică. Forme de turnare. Prototiparea matricelor (schele structurale) pentru aplicații medicale din ingineria țesuturilor, prototipare rapidă a pieselor și sculelor de mici dimensiuni.

Epruvetele printate

Epruvetele printate sunt umplute(infill) cu două tipuri de forme și anume diagonal și hexagonal, acestea sunt prezentate în figura 2.

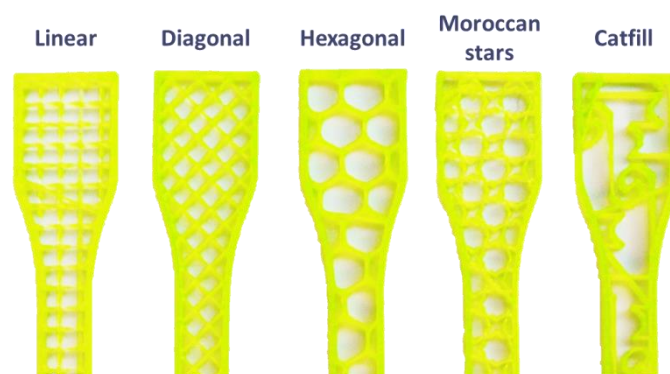


Fig. 2 Moduri de umplere(infill) al epruvetelor sau pieselor printate 3D

În vederea determinării influenței gradului de umplere, forma de umplere și viteza de printare, au fost printate un total de 46 epruvete, câte două pentru fiecare

modificare de parametru, din PLA, acestea sunt prezentate în figura 3. Aceste epruvete au fost codificate conform tabelului de mai jos.



Fig. 3 Epruvetele pregătite pentru testare

Tabel 1. Tabel cu modul de codificare al epruvetelor

Codul	Gradul de umplere	Modul de umplere	Viteza de printare
100G40(_1,_2)	100 %	diagonal	40 mm/s
100G60(_1,_2)	100 %	diagonal	60 mm/s
100G80(_1,_2)	100 %	diagonal	80 mm/s
100G100(_1,_2)	100 %	diagonal	100 mm/s
80G40(_1,_2)	80 %	diagonal	40 mm/s
80G60(_1,_2)	80 %	diagonal	60 mm/s
80G80(_1,_2)	80 %	diagonal	80 mm/s
80G100(_1,_2)	80 %	diagonal	100 mm/s
60G40(_1,_2)	60 %	diagonal	40 mm/s
60G60(_1,_2)	60 %	diagonal	60 mm/s
60G80(_1,_2)	60 %	diagonal	80 mm/s
60G100(_1,_2)	60 %	diagonal	100 mm/s
80F40(_1,_2)	80 %	hexagonal	40 mm/s
80F60(_1,_2)	80 %	hexagonal	60 mm/s
80F80(_1,_2)	80 %	hexagonal	80 mm/s
80F100(_1,_2)	80 %	hexagonal	100 mm/s
60F40(_1,_2)	60 %	hexagonal	40 mm/s
60F60(_1,_2)	60 %	hexagonal	60 mm/s
60F80(_1,_2)	60 %	hexagonal	80 mm/s
60F100(_1,_2)	60 %	hexagonal	100 mm/s

2.2 Determinări experimentale ale caracteristicilor mecanice

O serie de încercări mecanice relativ simple sunt folosite pentru evaluarea proprietăților materialelor. Rezultatele sunt utilizate în proiectarea inginerescă și ca bază în compararea și alegerea materialelor.

Încercările la tracțiune se fac pentru evaluarea constantelor elastice, a rezistenței, ductilității și întăririi materialelor. Se determină modulul de elasticitate, E , ca o măsură a rigidității, limita de curgere, σ_c , care definește rezistența la apariția deformațiilor plastice, și rezistența la tracțiune, σ_r , cea mai mare tensiune convențională care poate exista în material. Coeficientul lui Poisson, ν , poate fi calculat dacă se măsoară și deformația specifică transversală. Alungirea la rupere caracterizează ductilitatea materialului, capacitatea de a se deforma fără să se rupă.

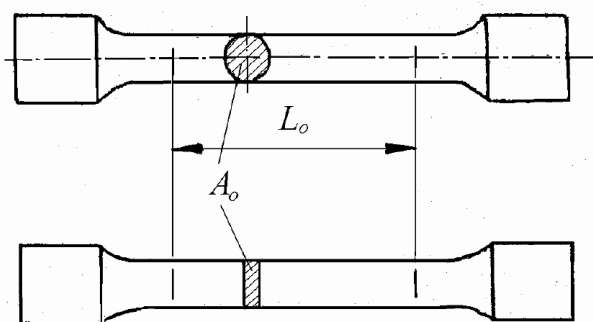


Fig. 4 Epruveta de tracțiune [2]

Pentru stabilirea relației între tensiunile normale σ și alungirile specific ϵ , se face încercarea la tracțiune (la materiale metalice, conform SR EN 10002-1). Se utilizează o epruvetă, având forma din figura 4, la care se cunoaște aria A_0 secțiunii transversale inițiale în porțiunea centrală calibrată și pe care se marchează două repere la distanța L_0 .

Epruveta se obține, în general, prin prelucrarea unei probe dintr-un semifabricat turnat. Produsele cu secțiuni constante (profile, bare, sârme etc.) precum și epruvetele brute turnate (de exemplu: fonte, aliaje neferoase) pot fi supuse încercării fără a fi prelucrate. Secțiunea transversală a epruvetelor poate fi circulară, pătrată, dreptunghiulară, inelară, sau, în cazuri speciale, de alte forme.

Epruveta se montează într-o mașină de încercat la tracțiune, cu ajutorul căreia se aplică pe direcția axei longitudinale o forță de întindere F , care în timpul încercării crește continuu, fără șoc sau vibrații, până se produce ruperea epruvetei.

Concomitent se măsoară distanța între repere L , respectiv alungirea (extensia) epruvetei $\Delta L = L - L_0$, cu ajutorul unui extensometru.

Dacă se reprezintă grafic forța de întindere F în funcție de alungirea ΔL , se obține o diagramă care depinde de dimensiunile epruvetei, deci care nu caracterizează numai comportarea materialului încercat.

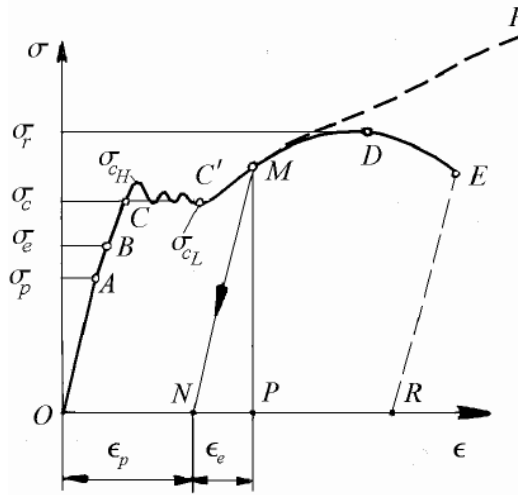


Fig. 5 Curba caracteristică a materialului[2]

Dacă se reprezintă grafic dependența între tensiunea normală $\sigma = \frac{F}{A_0}$ și alungirea specific $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$, atunci se obține curba caracteristică a materialului (vezi figura 5), denumită și diagrama încercării la tracțiune. Aceasta este o curbă convențională, deoarece tensiunea se calculează pe baza ariei secțiunii inițiale A_0 a epruvetei, iar alungirea specifică - pe baza lungimii inițiale între repere L_0 , mărimi mai ușor de măsurat.

Pe curba din figura 5, care corespunde unui oțel cu conținut redus de carbon, s-au marcat câteva puncte importante, ale căror ordonate definesc unele caracteristici mecanice ale materialului.

a) Limita de proporționalitate σ_p este valoarea tensiunii până la care relația între σ și ϵ este liniară (ordonata punctului A). Ecuația porțiunii OA a curbei caracteristice se poate scrie sub forma legii lui Hooke

$$\sigma = E \epsilon$$

a cărei pantă E este modulul de elasticitate longitudinal (Th. Young, 1807).

b) Limita de elasticitate σ_e este valoarea tensiunii până la care materialul se comportă elastic (ordonata punctului B), deci până la care deformațiile sunt

reversibile. La unele materiale se definește o limită de elasticitate convențională $\sigma_{0,01}$. Aceasta reprezintă valoarea tensiunii la care apar local primele deformări plastice, căreia îi corespunde, după descărcarea epruvetei, o alungire specific remanentă de 0,01% (100 $\mu\text{m}/\text{m}$).

Pentru majoritatea materialelor utilizate în construcția de mașini, limita de elasticitate este foarte apropiată de limita de proporționalitate, deși cele două mărimi sunt definite diferit. De asemenea, unele materiale pot avea o comportare elastică (revin după descărcare la dimensiunile inițiale), însă neliniară. De exemplu, particulele filamentare denumite whiskers pot avea deformări specific elastice până la 2%.

c) Limita de curgere aparentă σ_c este valoarea tensiunii la care epruveta începe să se deformeze apreciabil sub sarcină constantă (ordonată punctului C), marcând apariția deformărilor plastice ireversibile. Porțiunea CC' a curbei caracteristice se numește palier de curgere. Se distinge limita de curgere superioară, σ_c , definită de valoarea tensiunii în momentul când se observă prima scădere a forței aplicate epruvetei, și limita de curgere inferioară, σ_{cL} , valoarea cea mai mică a tensiunii în timpul curgerii plastice (C. Bach – 1904), neglijând în acest timp eventualele fenomene tranzitorii.

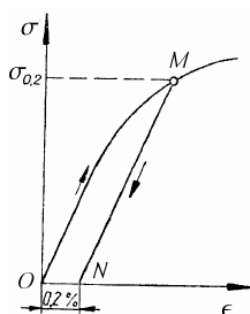


Fig. 6 Material fără limita de curgere[2]

La unele materiale, palierul de curgere nu există, curba caracteristică având alura din figura 6. Se definește o limită de curgere convențională $\sigma_{0,2}$. Aceasta reprezintă valoarea tensiunii căreia îi corespunde, după descărcarea epruvetei, o alungire specifică remanentă de 0,2% (2 mm/ m).

d) Rezistența la tracțiune σ_r , denumită și rezistență la rupere, este tensiunea corespunzătoare forței maxime înregistrate în cursul încercării după depășirea limitei de curgere (ordonată punctului D din figura 5). Limitele și rezistențele definite pe

baza curbei caracteristice convenționale sunt constante de material, deci valori fixe ale tensiunii normale. Pentru a le distinge de tensiunile de întindere variabile σ , acestea se notează uneori diferit. În încercarea materialelor se folosesc următoarele notații: rezistența la tracțiune $\sigma_r = R_m$, limita de curgere $\sigma_c = R_e$, limita de curgere convențională $\sigma_{0,2} = R_{p0,2}$ (conform SR EN 10002-1).

Punctul E marchează ruperea epruvetei. Aparent, ruperea se produce la o valoare a tensiunii inferioară rezistenței la tracțiune. Aceasta se datorește faptului că se trasează o curbă caracteristică convențională, calculând tensiunea prin împărțirea forței F la aria inițială A_0 a secțiunii transversale.

Încercările mecanice pentru determinarea curbelor caracteristice au fost efectuate pe mașina universală de încercat INSTRON 8872 (figura 7).

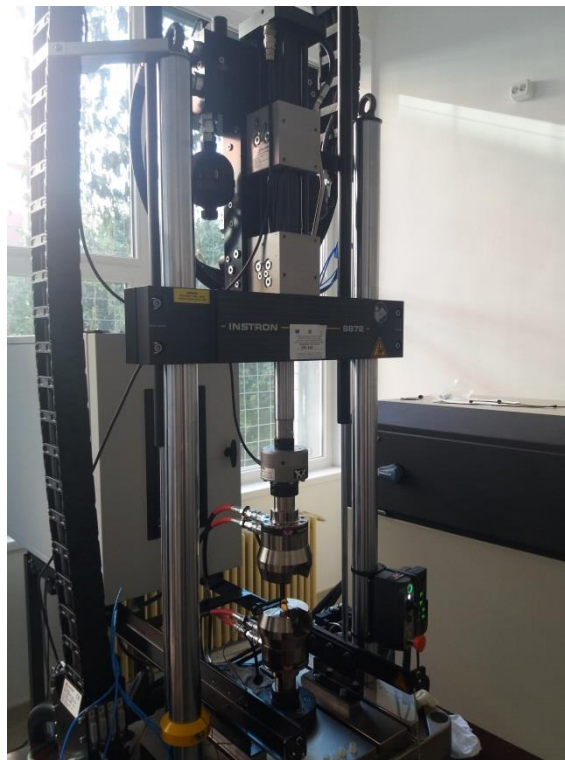


Fig. 7 Mașina de încercat INSTRON 8872

Caracteristicile mașinii sunt:

Forța maximă 25 kN în regim static și ± 25 kN în regim dinamic.

Teste posibile:

- tracțiune mediu ambiant, dotată cu bacuri hidraulice,
- tracțiune temperaturi scăzute și ridicate (între -70°C și $+120^{\circ}\text{C}$),
- compresiune,

- incovoiere in trei puncte,
- oboseala in regimuri variabile,
- alte teste neconventionale(piese finite cu gabarit mare, max 1m inaltime si latime)

Pentru a determina comportamentul mecanic al otelului s-a efectua o serie de teste mecanice distructive și s-a folosit extensometrul în vederea măsurări deformațiilor locale(vezi figura 8)



Fig. 8 Extensometrul prins de epruvetă în timpul testării

3. Rezultate experimentale și concluzii

3.1 Curbele caracteristice ale epruvetelor testate

În figura 9 - 28 sunt prezentate curbele caracteristice ale epruvetelor testate câte două pentru fiecare set.

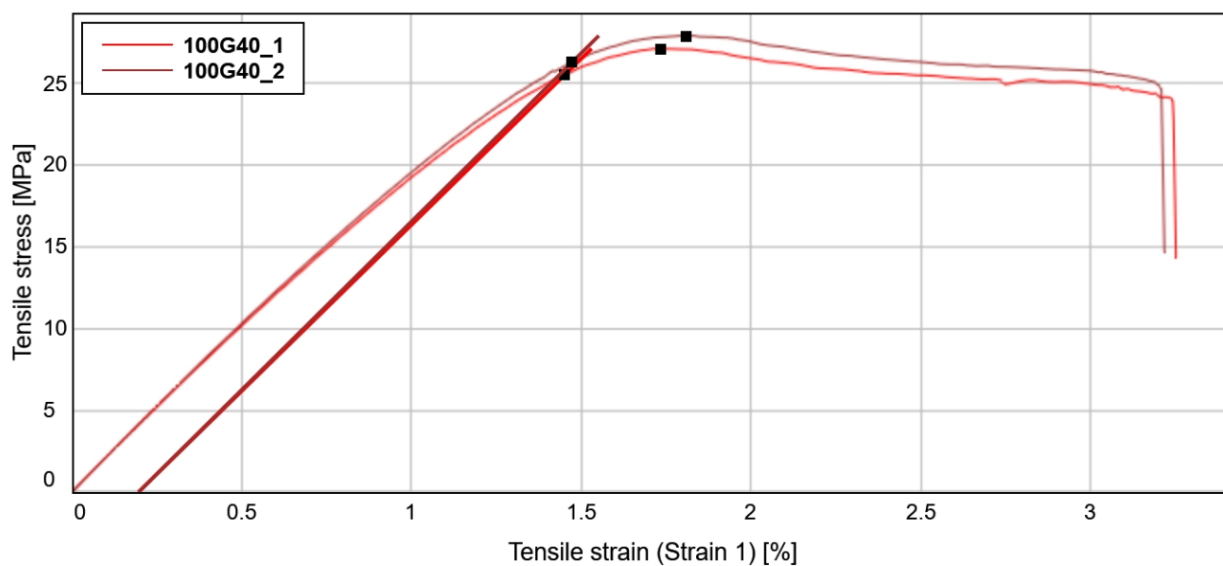


Fig. 9 Curba caracteristică a epruvetelor testate (100%,40mm/s)

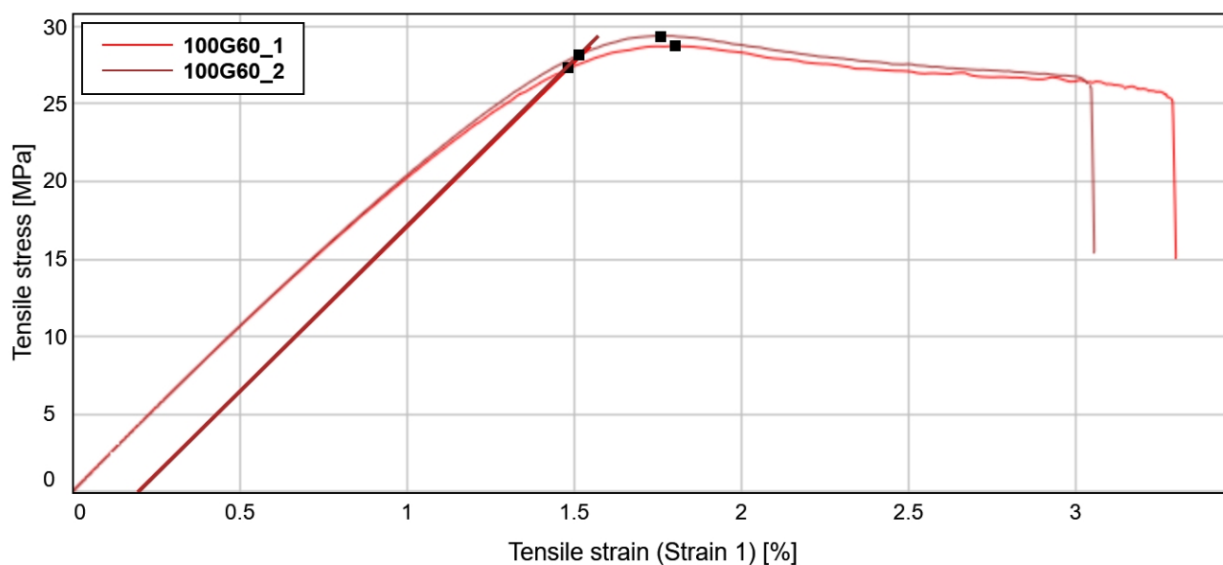


Fig. 10 Curba caracteristică a epruvetelor testate (100%,60mm/s)

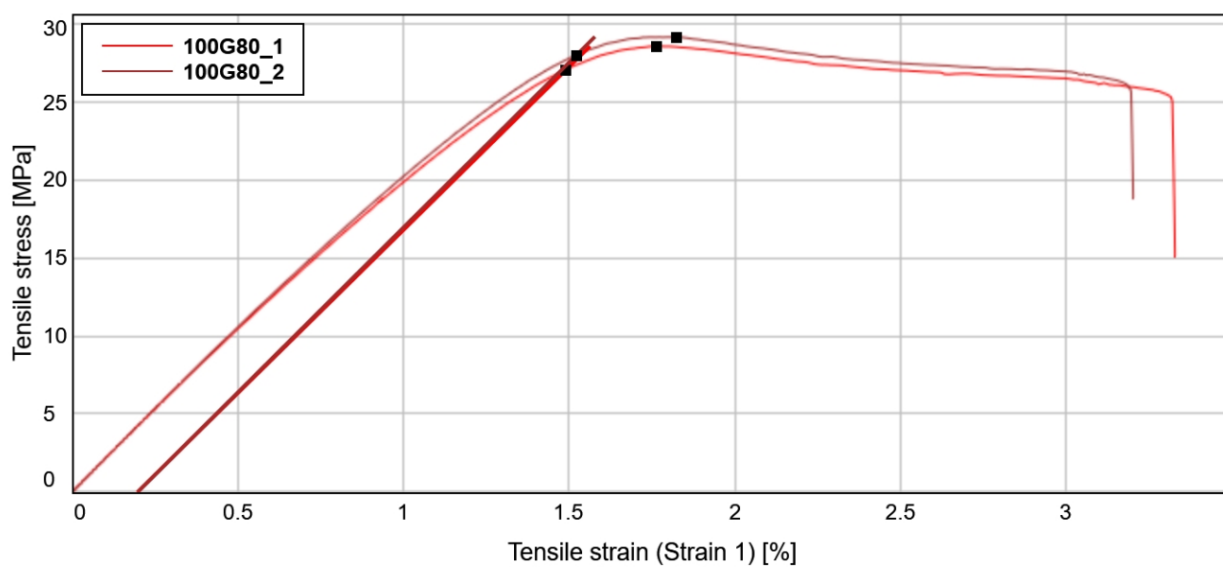


Fig. 11 Curba caracteristică a epruvetelor testate (100%,80mm/s)

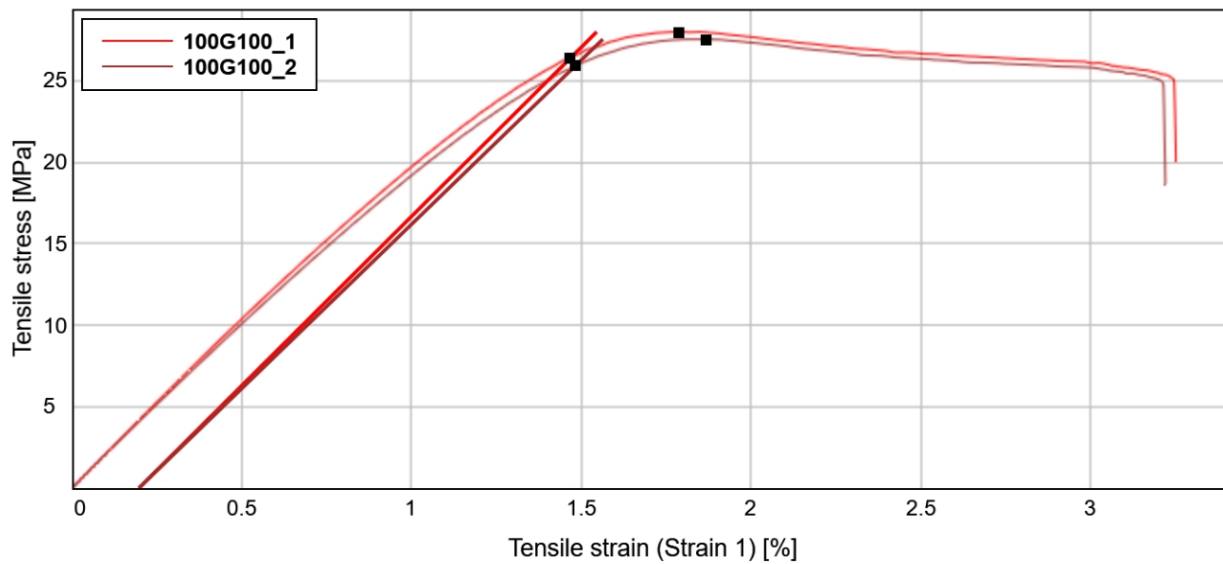


Fig. 12 Curba caracteristică a epruvetelor testate (100%,100mm/s)

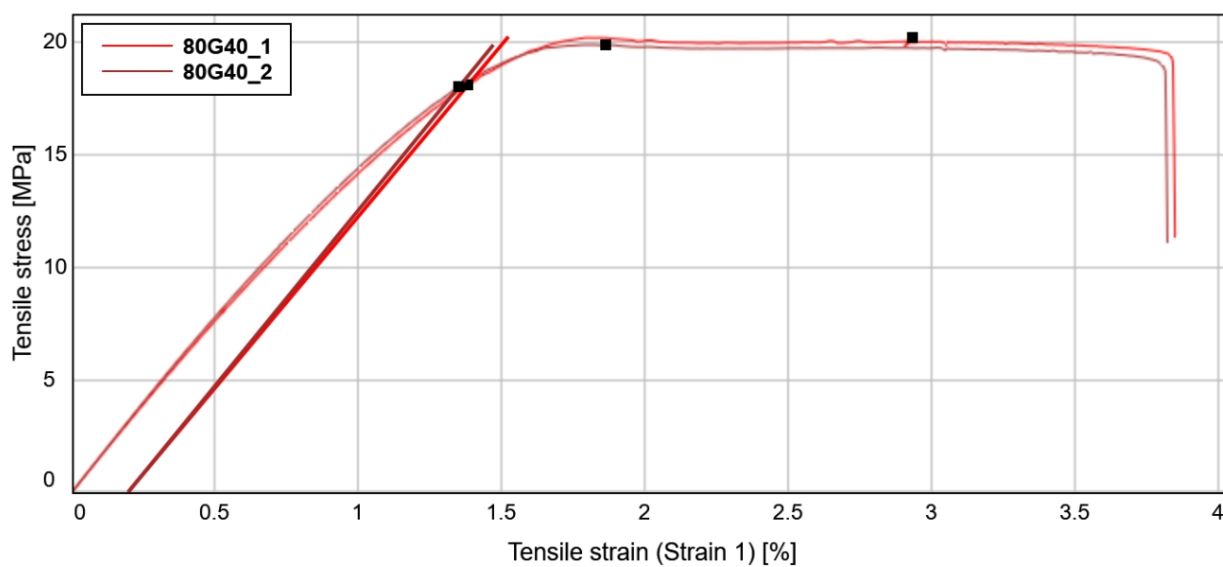


Fig. 13 Curba caracteristică a epruvetelor testate (80%,40mm/s)

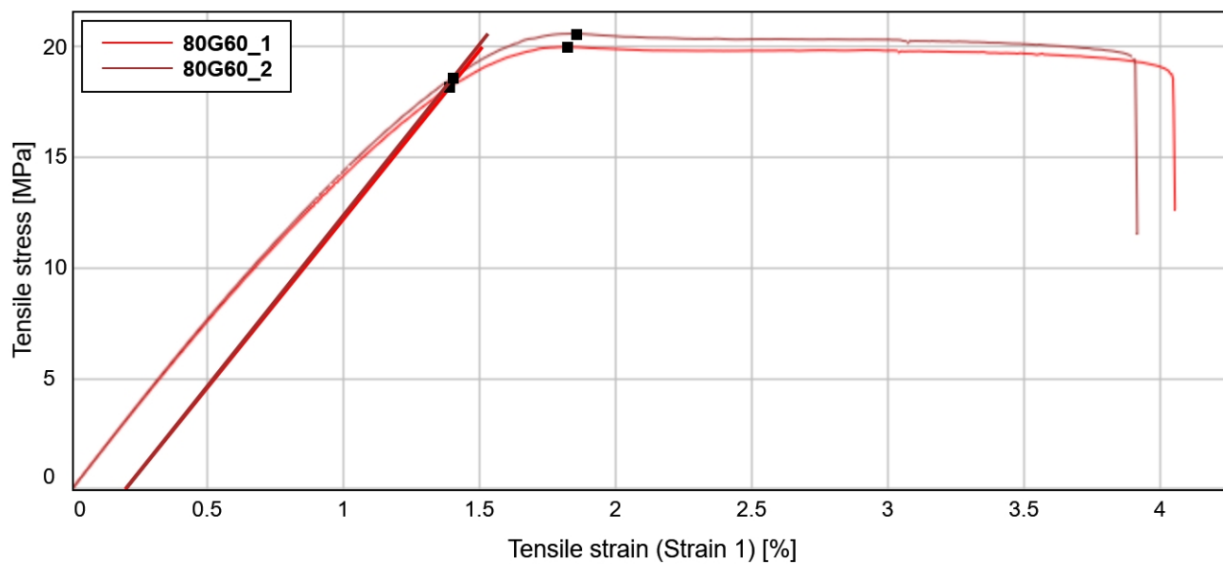


Fig. 14 Curba caracteristică a epruvetelor testate (80%,60mm/s)

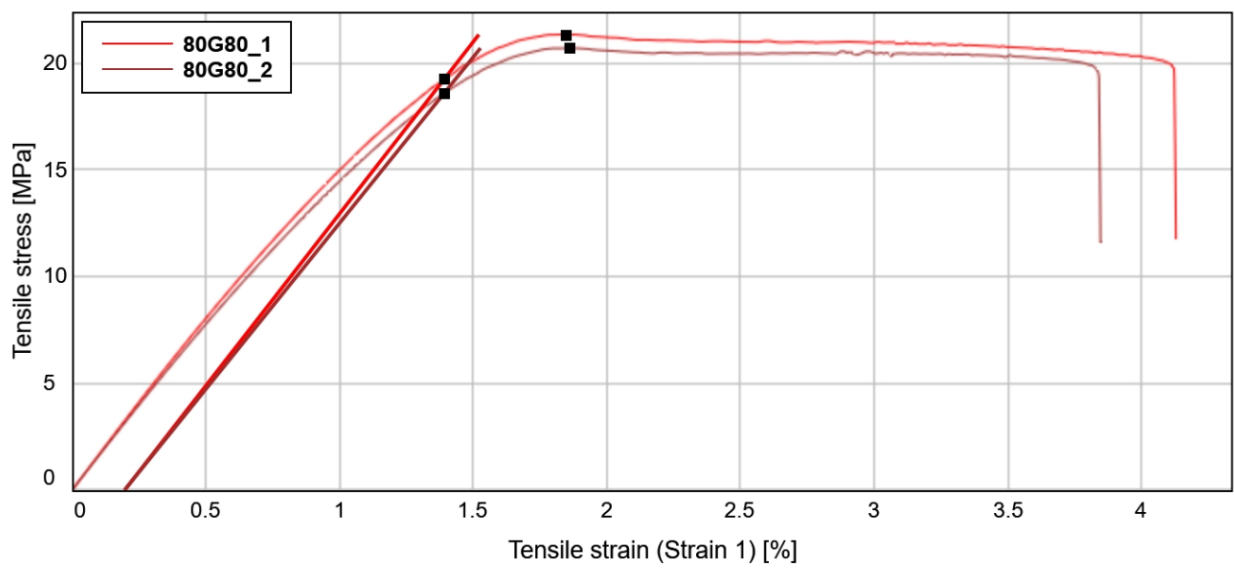


Fig. 15 Curba caracteristică a epruvetelor testate (80%,80mm/s)

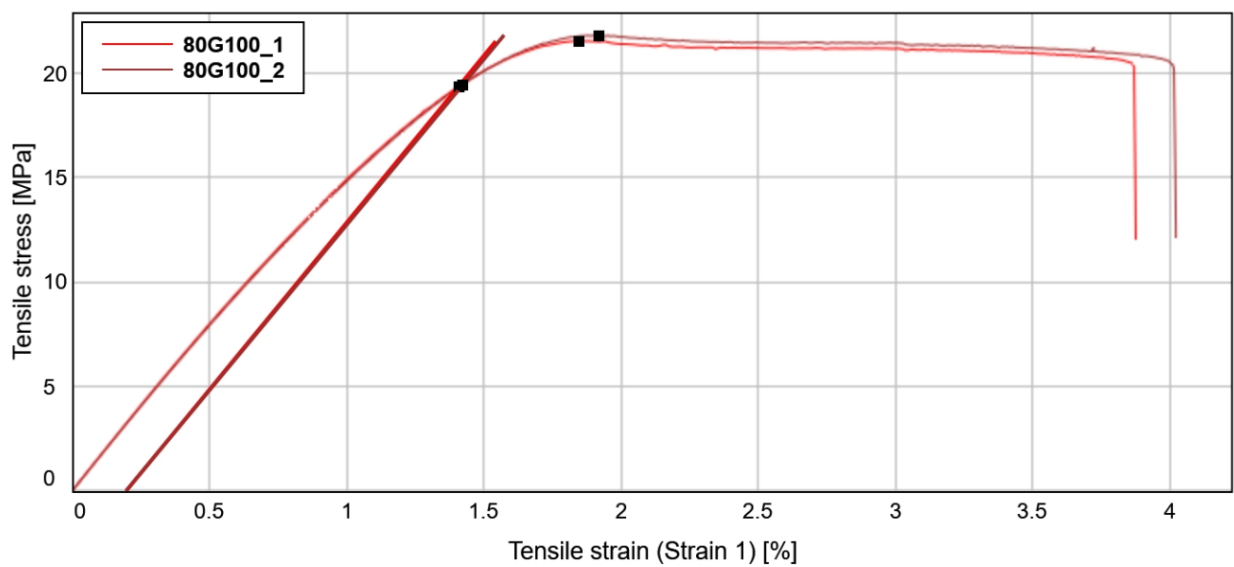


Fig. 16 Curba caracteristică a epruvetelor testate (80%,100mm/s)

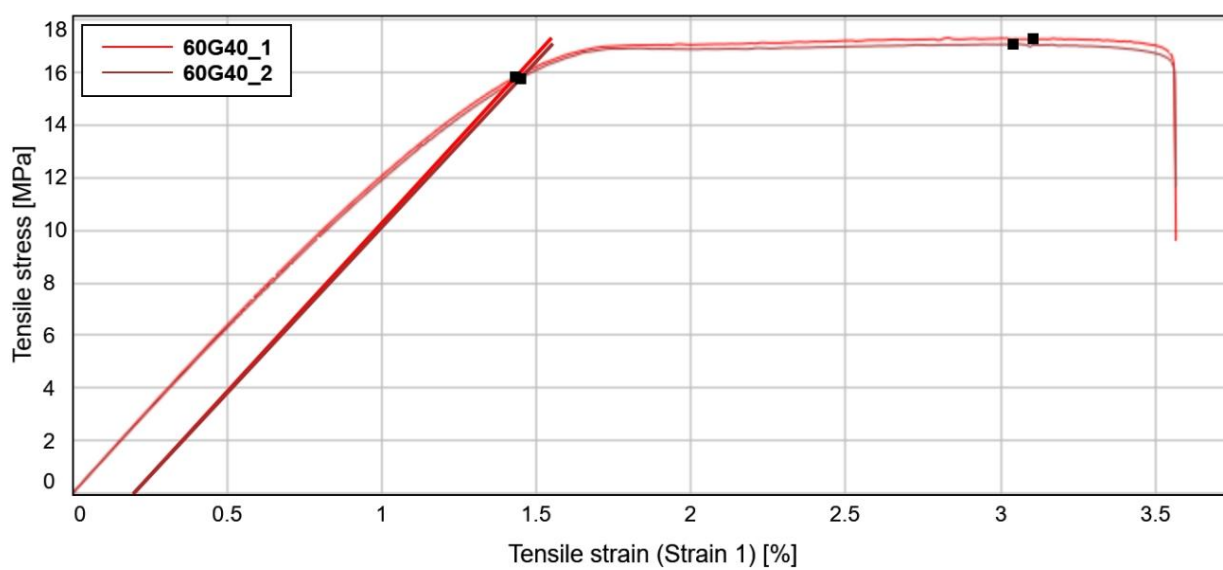


Fig. 17 Curba caracteristică a epruvetelor testate (60%,40mm/s)

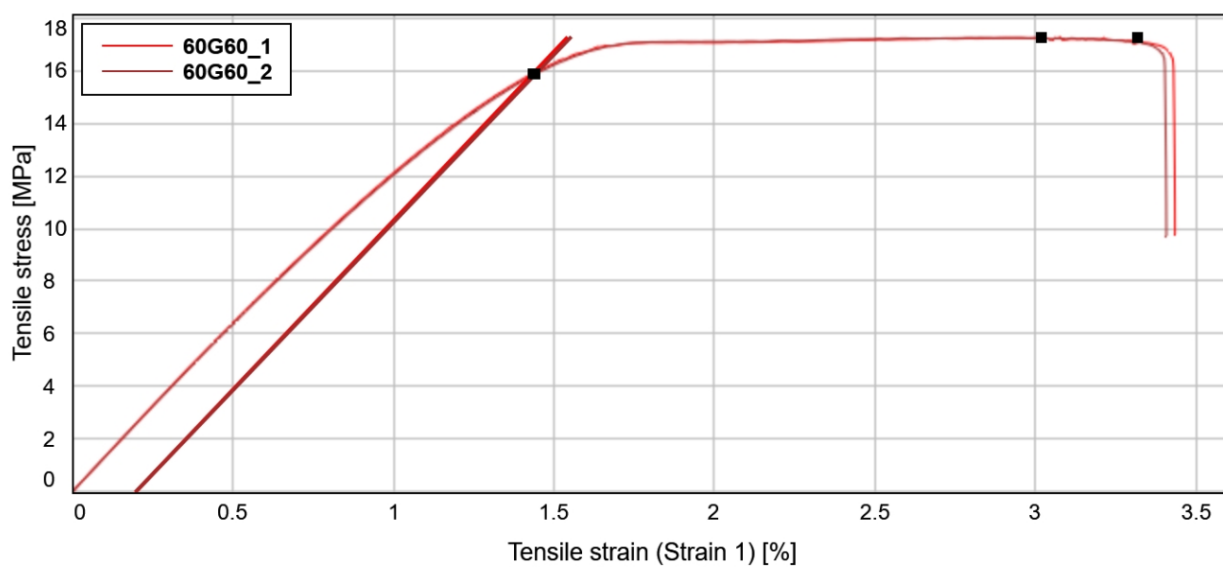


Fig. 18 Curba caracteristică a epruvetelor testate (60%,60mm/s)

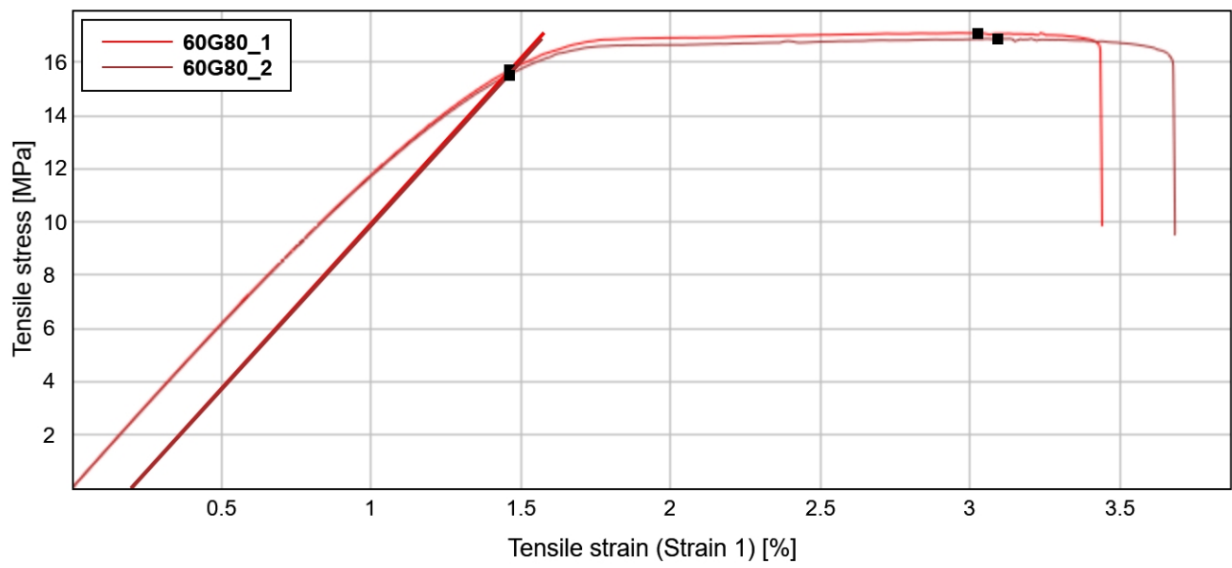


Fig. 19 Curba caracteristică a epruvetelor testate (60%,80mm/s)

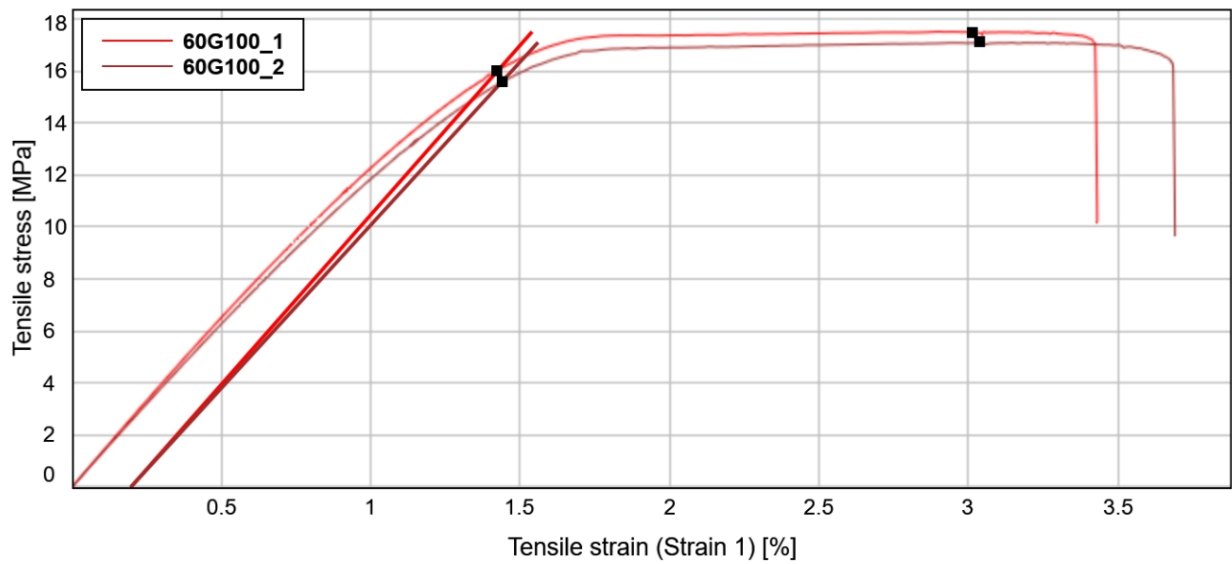


Fig. 20 Curba caracteristică a epruvetelor testate (60%,100mm/s)

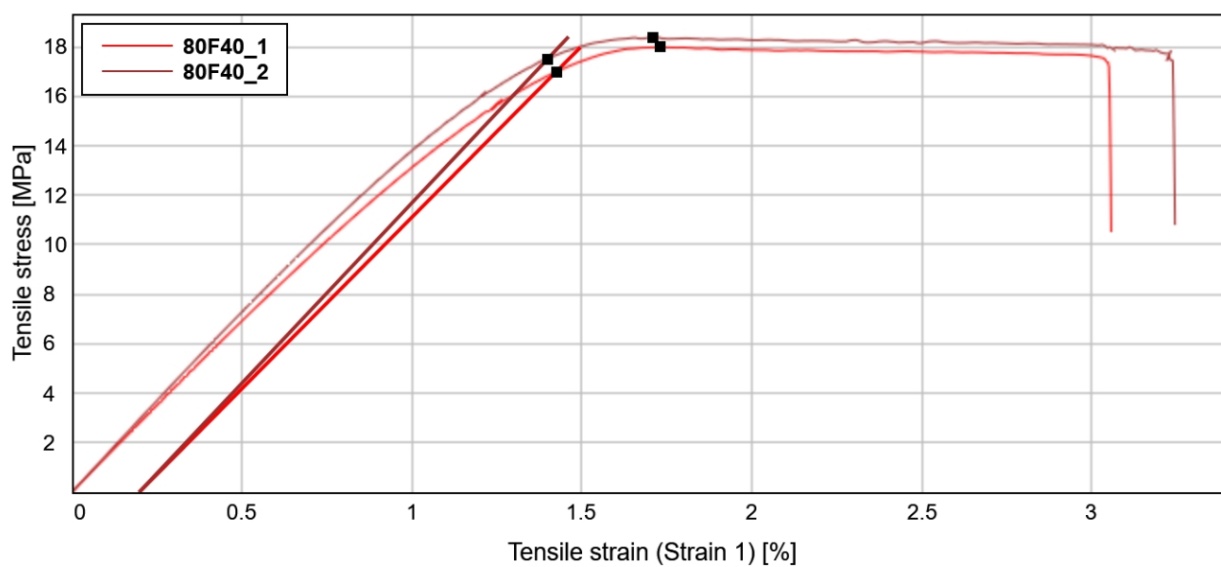


Fig. 21 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală(80%, 40mm/s)

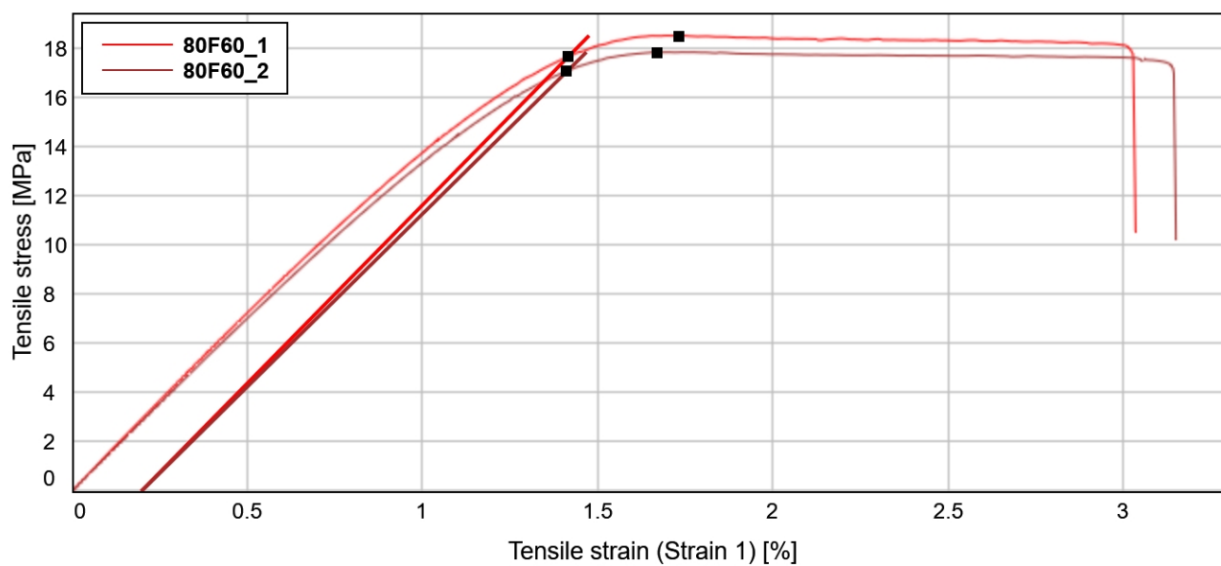


Fig. 22 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală(80%, 60mm/s)

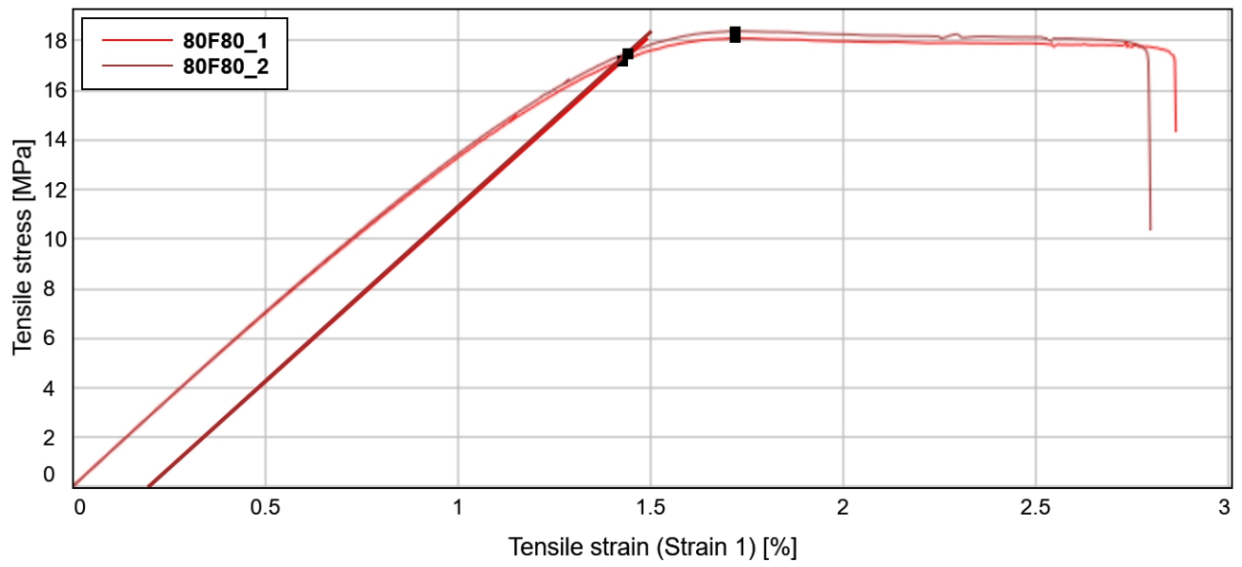


Fig. 23 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală(80%, 80mm/s)

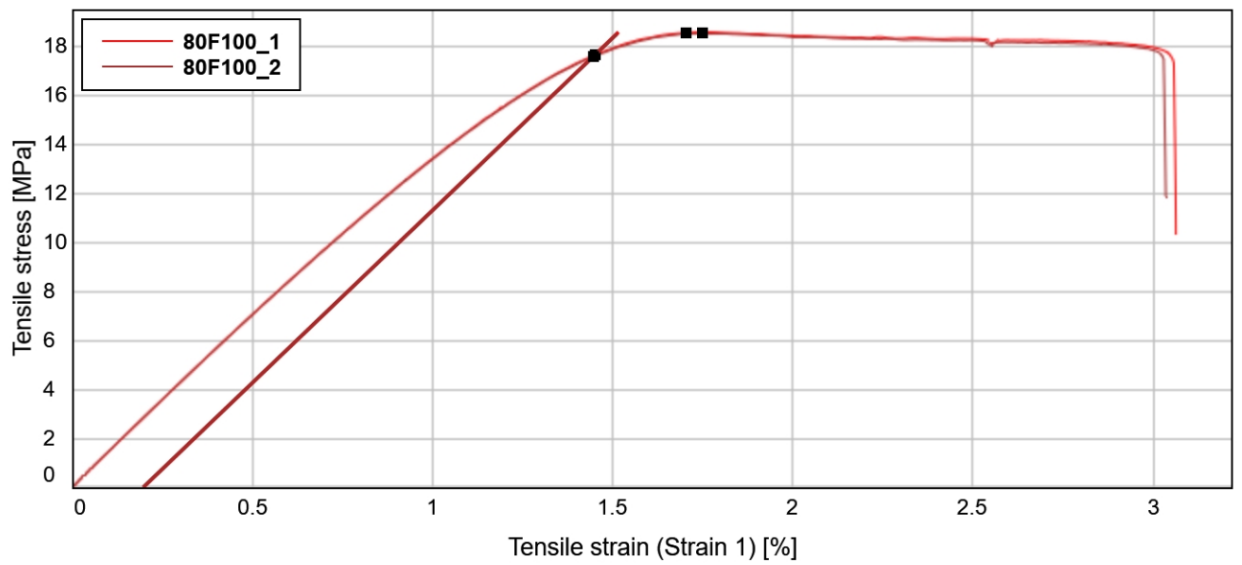


Fig. 24 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală(80%, 100mm/s)

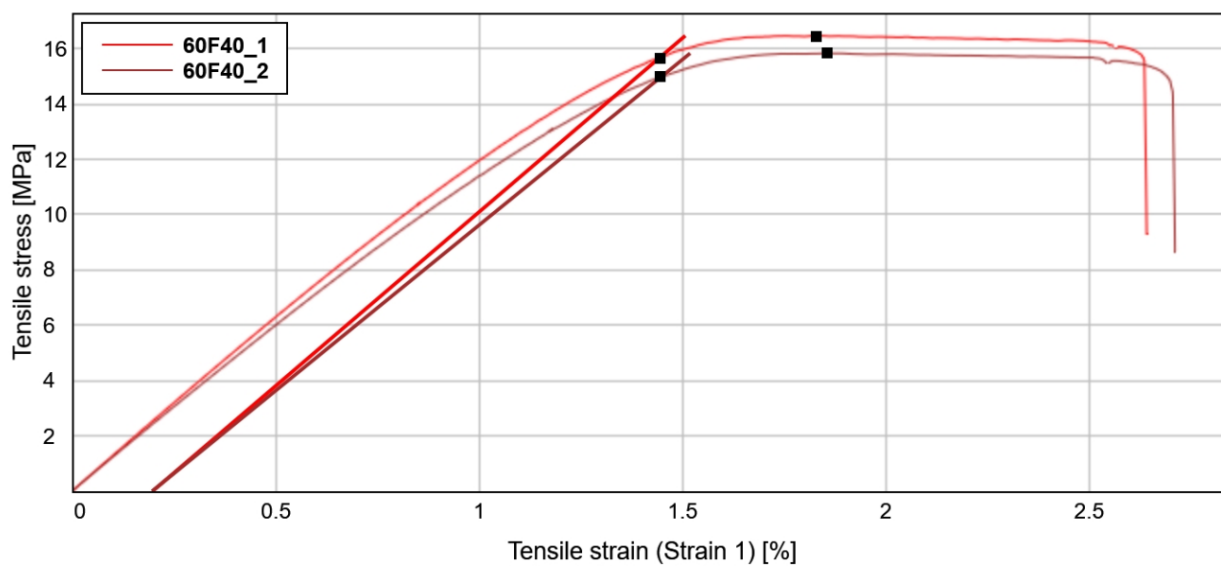


Fig. 25 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală(60%, 40mm/s)

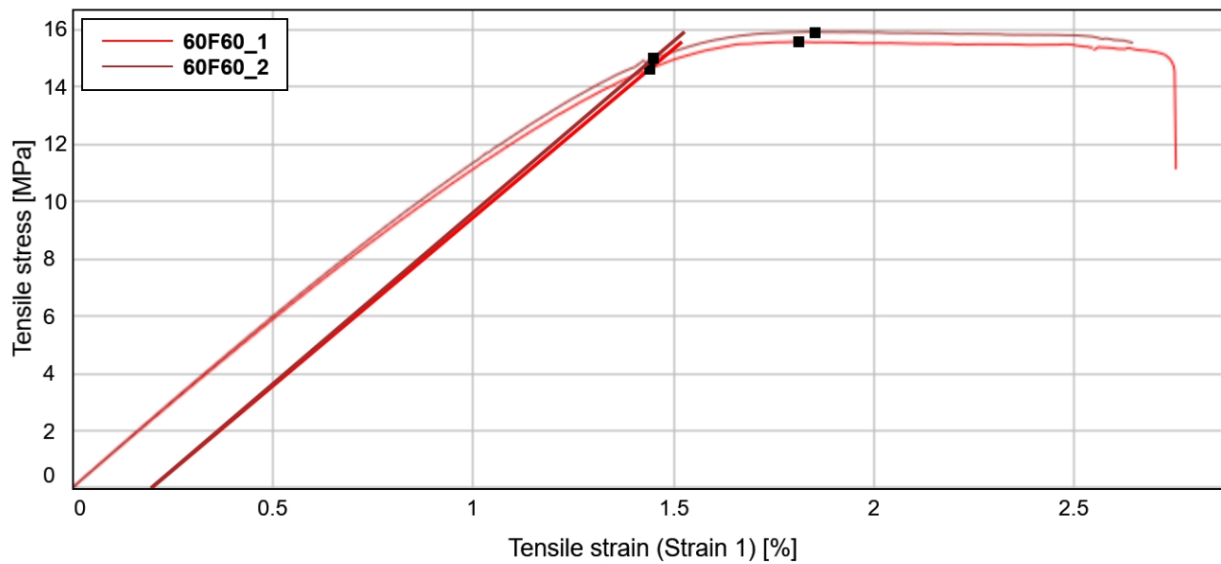


Fig. 26 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală(60%, 60mm/s)

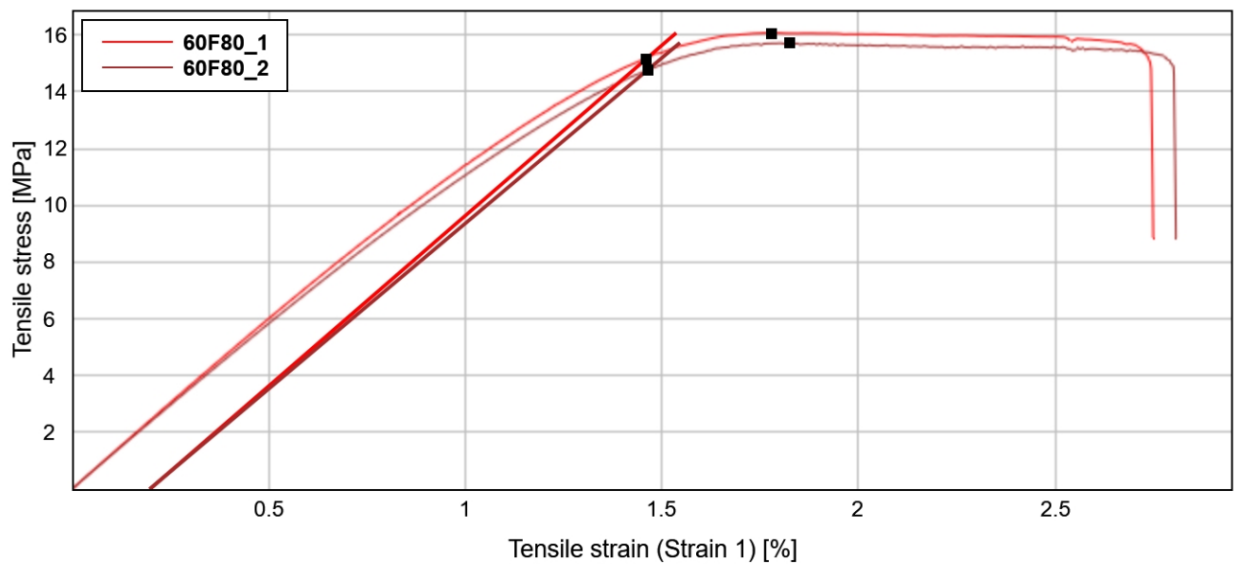


Fig. 27 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală(60%, 80mm/s)

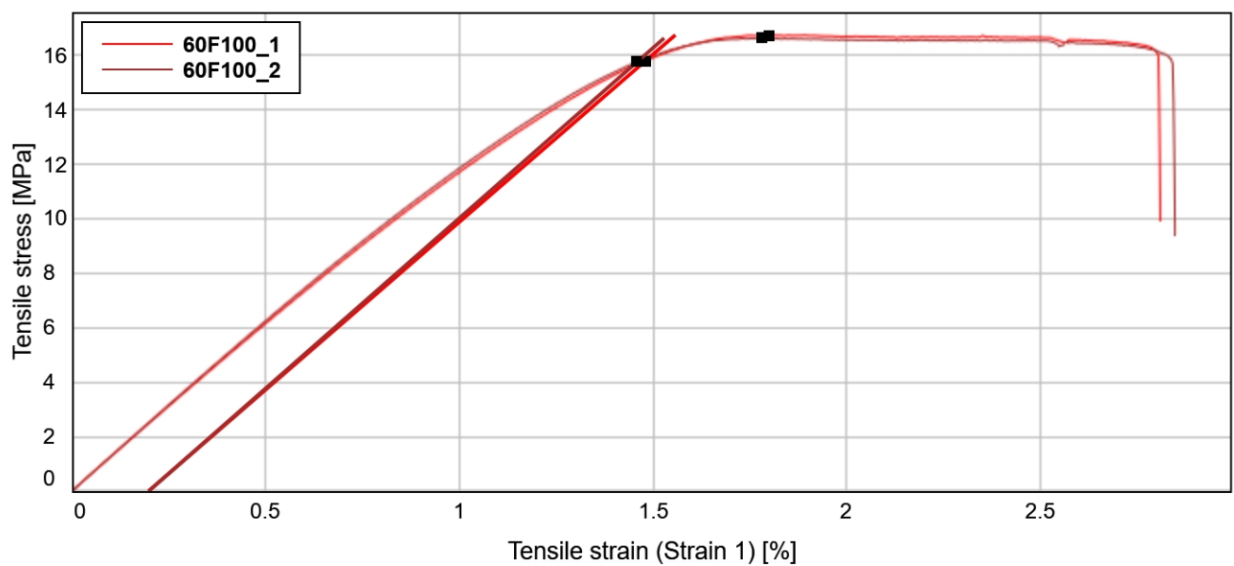


Fig. 28 Curba caracteristică a epruvetelor cu umplere hexagonală(60%, 100mm/s)

3.2 Proprietățile mecanice ale epruvetelor testate

În urma testelor realizate s-a determinat proprietățile mecanice și anume modulul de elasticitate longitudinal, limita de curgere și rupere al acestora.

În tabelul 2 sunt prezentate valorile pentru fiecare epruvetă în parte și valoarea medie a modulului de elasticitate longitudinal.

Tabel 2. Valorile modulului de elasticitate longitudinal

Probă	Modulul de elasticitate longitudinal [MPa]	Media modulului de elasticitate longitudinal [MPa]
100G40_1	2031,37	2044,465
100G40_2	2057,56	
100G60_1	2123,45	2130,245
100G60_2	2137,04	
100G80_1	2094,00	2105,385
100G80_2	2116,77	
100G100_1	2076,8	2046,425
100G100_2	2016,05	
80G40_1	1522,94	1540,27
80G40_2	1557,60	
80G60_1	1522,68	1533,025
80G60_2	1543,37	
80G80_1	1608,51	1580,83
80G80_2	1553,15	
80G100_1	1599,18	1592,015
80G100_2	1584,85	
60G40_1	1280,77	1270,75
60G40_2	1260,73	
60G60_1	1283,24	1278,34
60G60_2	1273,44	
60G80_1	1240,71	1236,29
60G80_2	1231,87	
60G100_1	1303,56	1278,835
60G100_2	1254,11	
80F40_1	1385,47	1421,435
80F40_2	1457,40	
80F60_1	1449,87	1428,12
80F60_2	1406,37	
80F80_1	1396,35	1401,77
80F80_2	1407,19	
80F100_1	1408,43	1407,545
80F100_2	1406,66	
60F40_1	1258,73	1228,63
60F40_2	1198,53	

Florin BACIU, Anton HADĂR

60F60_1	1177,11	1186,82
60F60_2	1196,53	
60F80_1	1200,87	1183,605
60F80_2	1166,34	
60F100_1	1232,06	1241,14
60F100_2	1250,22	

În tabelul 3 sunt prezentate valorile pentru fiecare epruvetă în parte și valoarea medie a limitei de curgere.

Tabel 3. Valorile limitei de curgere

Probă	Limită de curgere [MPa]	Media limitei de curgere [MPa]
100G40_1	25,47	25,865
100G40_2	26,26	
100G60_1	27,28	27,71
100G60_2	28,14	
100G80_1	27,06	27,55
100G80_2	28,04	
100G100_1	26,42	26,155
100G100_2	25,89	
80G40_1	18,07	18,015
80G40_2	17,96	
80G60_1	18,12	18,355
80G60_2	18,59	
80G80_1	19,20	18,875
80G80_2	18,55	
80G100_1	19,37	19,41
80G100_2	19,45	
60G40_1	15,81	15,78
60G40_2	15,75	
60G60_1	15,88	15,865
60G60_2	15,85	
60G80_1	15,72	15,63
60G80_2	15,54	
60G100_1	16,00	15,78
60G100_2	15,56	
80F40_1	16,99	17,26
80F40_2	17,53	
80F60_1	17,67	17,375
80F60_2	17,08	
80F80_1	17,21	17,36
80F80_2	17,51	
80F100_1	17,63	17,605
80F100_2	17,58	
60F40_1	15,68	15,33
60F40_2	14,98	

60F60_1	14,64	14,825
60F60_2	15,01	
60F80_1	15,17	14,97
60F80_2	14,77	
60F100_1	15,79	15,77
60F100_2	15,75	

În tabelul 4 sunt prezentate valorile pentru fiecare epruvetă în parte și valoarea medie a limitei de rupere.

Tabel 4. Valorile limitei de rupere

Probă	Limită de rupere [MPa]	Media limitei de rupere [MPa]
100G40_1	27,11	27,505
100G40_2	27,90	
100G60_1	28,71	29,045
100G60_2	29,38	
100G80_1	28,60	28,905
100G80_2	29,21	
100G100_1	28,01	27,78
100G100_2	27,55	
80G40_1	20,21	20,03
80G40_2	19,85	
80G60_1	19,98	20,28
80G60_2	20,58	
80G80_1	21,31	21
80G80_2	20,69	
80G100_1	21,55	21,69
80G100_2	21,83	
60G40_1	17,31	17,2
60G40_2	17,09	
60G60_1	17,27	17,275
60G60_2	17,28	
60G80_1	17,11	17,00
60G80_2	16,89	
60G100_1	17,50	17,30
60G100_2	17,10	
80F40_1	17,98	18,195
80F40_2	18,41	
80F60_1	18,53	18,19
80F60_2	17,85	
80F80_1	18,11	18,25
80F80_2	18,39	
80F100_1	18,57	18,54
80F100_2	18,51	
60F40_1	16,48	16,16
60F40_2	15,84	

60F60_1	15,58	15,755
60F60_2	15,93	
60F80_1	16,08	15,905
60F80_2	15,73	
60F100_1	16,75	16,695
60F100_2	16,64	

3.3 Concluzi

În figura 29 este arătat modul de variație al modului de elasticitate mediu pentru fiecare set în parte. Din aceasta se poate observa că scăderea gradului de umplere duce la scăderea modului de elasticitate longitudinal.

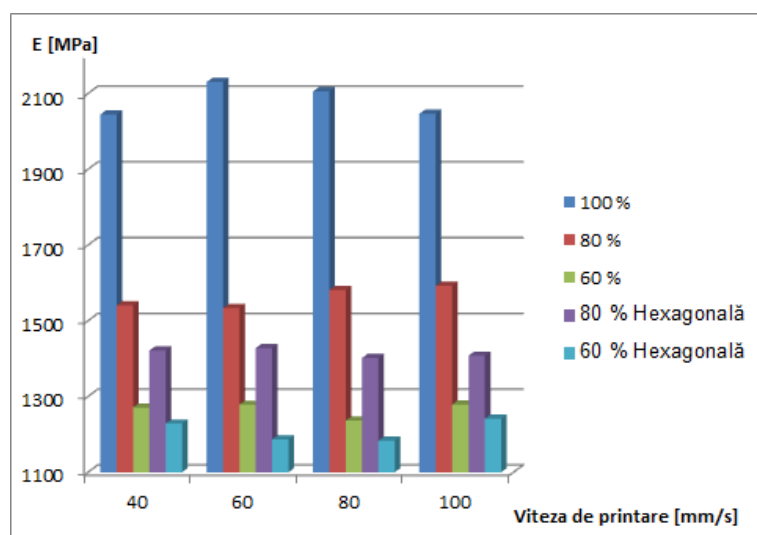


Fig. 29 Variația valorii medii a modului de elasticitate longitudinal

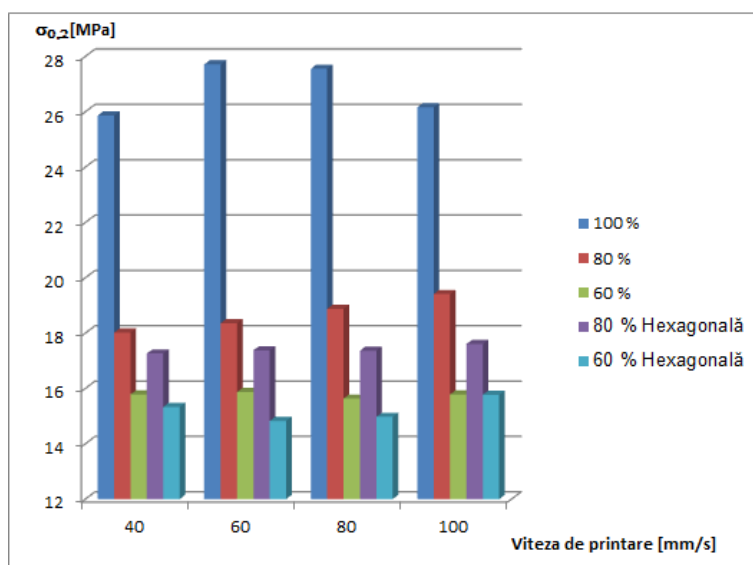


Fig. 30 Variația valorii medii a limitei de curgere

Figurile 30 și 31 prezintă modul de variație al limitei de curgere și respectiv rupere pentru fiecare set în parte. Din aceasta se poate observa că scăderea gradului de umplere duce la scăderea limitei de curgere respectiv rupere.

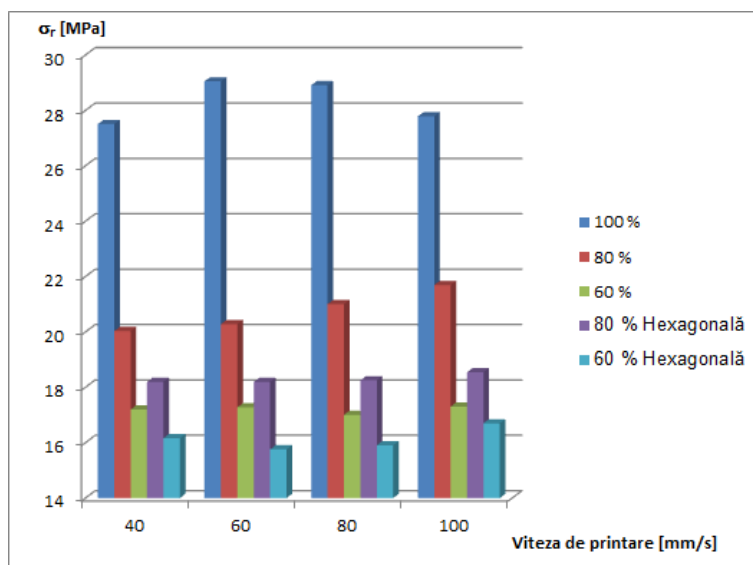


Fig. 31 Variația valorii medii a limitei de rupere

Prin analiza figurilor de mai sus se pot trage următoarele concluzii:

1. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 100% valoarea maximă a modulului de elasticitate longitudinală, limitei de curgere și a celei de rupere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s.
2. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 100% valoarea minimă a modulului de elasticitate longitudinală, limitei de curgere și a celei de rupere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 40 mm/s.
3. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80% valoarea maximă a modulului de elasticitate longitudinală, limitei de curgere și a celei de rupere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 100 mm/s.
4. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80% valoarea minimă a modulului de elasticitate longitudinală este atinsă atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s și valoarea minimă a limitei de curgere și a celei de rupere se obține la o viteză de 40 mm/s.

5. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 60% valoarea maximă a modulului de elasticitate longitudinală, limitei de curgere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s și a celei de rupere când se printează cu 100 mm/s.
6. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 60% valoarea minimă a modulului de elasticitate longitudinală, limitei de curgere și a celei de rupere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 80 mm/s
7. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80% hexagonală, valoarea maximă a modulului de elasticitate longitudinală este atinsă atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s și valoarea minimă a limitei de curgere și a celei de rupere se obține la o viteză de 100 mm/s
8. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80% hexagonală, valoarea minimă a modulului de elasticitate longitudinală este atinsă atunci când se printează cu viteza de 80 mm/s
9. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80% hexagonală, valoarea minimă a limitei de curgere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 40 mm/s
10. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 80% hexagonală, valoarea minimă a limitei de rupere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s
11. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 60% hexagonală, valoarea maximă a modulului de elasticitate longitudinală, limitei de curgere și a celei de rupere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 100 mm/s
12. Pentru epruvetele cu gradul de umplere de 60% hexagonală, valoarea minimă a modulului de elasticitate longitudinală, limitei de curgere și a celei de rupere este atinsă atunci când se printează cu viteza de 60 mm/s

În funcție de ce se dorește a se face din piesa printată se pot alege parametri de printare(gradul și forma de umplere, viteza) optimimi în vederea utilizării cât mai eficiente a materialului.

BIBLIOGRAFIE

1. www.prusa3d.cz
2. M. Rades, Rezistenta materialelor I, Ed. Printech, 2000