MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Școala Doctorală de Inginerie Industrială și Robotică

LAZĂR M. Marius-Vali

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

Contribuții la modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere

***Conducător științific*,**
Prof.univ.dr.ing. Marian GHEORGHE

- 2026 -

Cuvânt înainte

Cercetarea și contribuția la modelarea și evaluarea preciziei unor matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere reprezintă *motivația* și *direcția* studiilor de doctorat, finalizate prin prezenta teză de doctorat. Aceasta reprezintă rezultatul unui parcurs profesional - științific provocator, plin de satisfacții.

Programul de doctorat a constat în pregătirea, prezentarea și susținerea examenelor și a rapoartelor științifice, determinarea și analiza unor funcții rugozitate și a unor funcții dimensiune, dezvoltarea de modele numerice privind simularea unor procese de fabricare, propunerea și dezvoltarea unor matrițe din materiale termoplastice, realizarea și publicarea de lucrări științifice, precum și elaborarea prezentei teze de doctorat privind modelarea și evaluarea preciziei unor matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere.

La realizarea acestei teze de doctorat, un rol important l-a avut conducătorul științific de doctorat, domnul Prof. univ. dr. ing. Marian GHEORGHE, căruia îi adresez mulțumiri sincere pentru îndrumare, încredere și tot sprijinul acordat pe parcursul studiilor de doctorat.

Adresez sincere mulțumiri domnilor Prof. univ. dr. ing. Cristian DOICIN, Prof. univ. dr. ing. Sergiu TONOIU, Conf. dr. ing. Cătălin GHEORGHIȚĂ, Conf. dr. ing. mat. Ovidiu BLĂJINĂ din Departamentul de Tehnologia Construcțiilor de Mașini, POLITEHNICA București, și Doamnei Prof. univ. dr. ing. Oana DODUN de la Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, pentru comentariile și recomandările constructive acordate pe parcursul studiilor de doctorat, precum și în cadrul Comisiei de îndrumare și integritate academică.

Adresez mulțumiri domnilor Prof. univ. dr. ing. Nicolae IONESCU de la Universitatea Națională de Știință şi Tehnologie POLITEHNICA București. Prof. univ. dr. ing. Laurențiu SLĂTINEANU și Prof. univ. dr. ing. Gheorghe NAGÎȚ de la Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iaşi, Prof. univ. dr. ing. Tom SAVU de la Universitatea Națională de Știință şi Tehnologie POLITEHNICA București pentru comentariile şi recomandările adresate în cadrul Comisiei de evaluare şi susținere publică a tezei de doctorat.

De asemenea, doresc să adresez mulțumiri tuturor colegilor din Departamentul TCM pentru sprijin și încurajare, în special Domnului Șef lucr. dr. ing. Bogdan JUGRAVU și Doamnei Conf. dr. ing. Manuela DIJMĂRESCU.

Aș dori să exprim mulțumiri Domnilor Șef lucr. dr. ing. Tudor George ALEXANDRU și Șef lucr. dr. ing. Constantin STOCHIOIU pentru tot sprijinul acordat.

Adresez mulțumiri speciale prietenei mele, Silvia, pentru sprijinul, răbdarea și înțelegerea de care a dat dovadă pe parcursul realizării acestei teze. Susținerea ei constantă a reprezentat pentru mine o sursă de încurajare și echilibru.
Doresc să mulțumesc familiei pentru tot sprijinul acordat, fără de care drumul meu în viață ar fi fost mult mai anevoios.

Marius-Vali LAZĂR

Introducere

Produsele din polilactidă, PLA, sau din tereftalat de polietilenă modificat cu glicol, PETG, precum și din alte categorii de materiale termoplastice pot fi fabricate prin printare 3D, turnare, injecție în matriță, extrudare, prelucrare mecanică etc., după caz. În condițiile producțiilor individuale sau de serie mică, materialele PLA și PETG se pot utiliza în industrie la fabricarea unor matrițe, prin printare 3D, pentru injecție în matriță, îndoire la rece etc.

Activitatea de cercetare – dezvoltare din cadrul programului de doctorat vizează modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere, cu aprofundare privind materialele polimerice termoplastice PLA și PETG.

* * *

În prima parte a tezei de doctorat, pe baza analizei stadiului actual al cercetărilor privind fabricarea și precizia unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere, se prezintă date relevante referitoare la: dezvoltarea unor matrițe din rășină, polyjet, polieteretercetonă, polilactidă și din alte materiale polimerice; dezvoltarea unor matrițe din materiale termoplastice pentru prelucrări prin îndoire; categorii principale de prelucrări prin așchiere; elemente privind mecanica procesului de așchiere; cercetări privind prelucrarea prin așchiere a unor elemente din materiale termoplastice; concluzii.

În partea a doua a tezei de doctorat, pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, se prezintă direcții de cercetare – dezvoltare și se determină ca obiectiv principal al activității doctorale avansate de cercetare – dezvoltare: modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere. De asemenea, se prezintă metodologia de cercetare – dezvoltare.

În continuare, se inițiază, se dezvoltă și se realizează cercetări teoretico – experimentale complexe, de volum ridicat, privind: rugozitatea și precizia dimensională la piese din PLA printate 3D și prelucrate prin frezare CNC; rugozitatea și precizia dimensională la piese din PETG printate 3D și prelucrate prin frezare CNC; dezvoltarea de modele tehnologice din PLA pentru fabricarea unor matrițe din silicon aplicate la turnarea de piese din rășină poliuretanică; analiza cu elemente finite, fabricarea și testarea unor matrițe de îndoire la rece din PLA și PETG.

În ultima parte a tezei de doctorat, se prezintă concluziile generale și contribuțiile principale aduse de teza de doctorat la modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere, importanța științifică a tezei de doctorat, importanța practică a tezei de doctorat, precum și perspective ale dezvoltării de elemente și matrițe din materiale termoplastice prin modelare, proiectare asistată, fabricare aditivă și prelucrare prin așchiere CNC, ca potențiale direcții de viitor, prin activitate de cercetare-dezvoltare continuă, complexă și profundă.

Legendă

01	A_0	Aria inițială a secțiunii transversale
02	ABS	Acrilonitril butadien stiren
03	a_p	Adâncimea de așchiere
04	B	Lățime
05	B_0	Lățime inițială
06	B_i	Lățime curentă
07	C	Dimensiune obiectiv
08	CAD	Computer Aided Design
09	CNC	Comandă numerică computerizată/ Computerized Numerical Control
10	DIC	Metoda corelării digitale a imaginilor
11	e	Avans de reglare radial
12	E	Modul de elasticitate
13	EE	Eroare experimentală
14	f	Avans
15	F	Viteză de avans
16	FC	Frezare cilindrică
17	FC-F	Frezare cilindro-frontală
18	FDM	Modelare prin depunere de material topit
19	FEA	Analiză cu elemente finite
20	FEM	Metoda elementelor finite
21	F_f	Forța de avans
22	FF	Frezare frontală
23	F_i	Forța de tracțiune curentă
24	f_z	Avans pe dinte
25	g	Grosime
26	IPA	Alcool izopropilic
27	L_0	Lungime inițială
28	L_i	Lungimea curentă
29	MIV	Matriță de îndoire în V
30	MS	Matriță din silicon
31	MSMIV	Model structural matriță de îndoire în V
32	MT	Model tehnologic
33	n_c	Turație
34	p	Avans de reglare axial
35	P	Produs

36	PA	Piesa A
37	PB	Piesa B
38	PDMS	Polidimetilsiloxan
39	PEEK	Polieter eter cetonă
40	PETG	Polietilen tereftalat glicolizat
41	Pg	Piesă cu grosimea g
42	PLA	Acid polilactic
43	PMEE	Pătratul mediu al erorilor experimentale
44	PMB	Pătratul mediu al SPB
45	PMI	Pătratul mediu de inadecvanță
46	PMMA	Polimetilmetacrilat
47	PMRZ	Pătratul mediu al rezidualelor
48	PMSA	Hidrogel
49	PVB	Polivinil butiral
50	R	Rază de racordare
51	R^2	Coeficient de determinare
52	SI	Suprafețe înclinate
53	SO	Suprafețe orizontale
54	SV	Suprafețe verticale
55	SLA	Stereolitografie
56	SPB	Suma pătratelor datorate coeficientului de regresie
57	SPEE	Suma pătratelor erorilor experimentale
58	SPI	Suma pătratelor de inadecvanță
59	SPRZ	Suma pătratelor rezidualelor
60	V_c	Viteză de așchiere
61	ΔL	Alungire curentă
62	ν	Coeficientul lui Poisson

Capitolul 1. Cercetări privind dezvoltarea de matrițe din materiale polimerice produse prin fabricare aditivă

În condiții de producție individuală sau de serie mică, componente ale unor matrițe de injecție sau de turnare se pot proiecta și produce prin fabricare aditivă din materiale polimerice de tip rășină, acid polilactic etc. [1 - 11].

1.1. Dezvoltarea unor matrițe din rășină, polyjet RGD515 și polieteretercetonă

Elemente privind printarea 3D a plăcilor active din construcția unei matrițe de injecție, în diferite variante tehnologice [24], sunt după cum se prezintă în Tabelul 1.1.

Tabelul 1.1. Elemente privind printarea 3D a plăcilor active din construcția unei matrițe de injecție (adaptare după [24])

Tehnologia de printare	Printer 3D	Material printat
Stereolitografie (SLA)	Formlabs Form 2	Rășină albă Formlabs
Polyjet	Stratasys Polyjet Object 350	Polyjet Object RGD515
Modelare prin depunere de material topit (FDM)	Intamsys Funmat HT	Polieter eter cetonă (PEEK)

1.2. Dezvoltarea unor matrițe din polilactidă și din alte materiale polimerice

Polilactida sau acidul polilactic, PLA, este un material polimeric termoplastic care se produce într-o gamă largă a caracteristicilor chimice și fizice, respectiv, cu densitatea de 1.21 – 1.43 kg/dm^3, temperatura de topire de 150 -160 °C, modulul de elasticitate de 2,7 – 16 GPa etc. [91].

Produsele din PLA pot fi fabricate prin printare 3D, turnare, injecție, extrudare, prelucrare mecanică etc. [91, 92, 93].

Datorită costului redus, polilactida (acid polilactic), PLA, este un material utilizat în industrie la fabricarea unor matrițe prin printare 3D - în cazul producțiilor de serie mică sau unicate, în domeniul injecției în matriță etc. [12 - 23].

PLA poate fi utilizat la matrițele în care se formează elemente din compozit natural. Această tehnologie se dezvoltă în condițiile economiei circulare. Trei matrițe hibride printate din PLA și, respectiv, silicon (Fig. 1.3) s-au utilizat la turnarea unor compozite naturale ”verzi” în combinația: rășină de brad, ceară, ace de brad, ace de brad măcinate, orez, orez măcinat, quisetum și quisetum măcinat, sub formă de epruvete specifice pentru teste mecanice la încoire, impact și compresiune [25].

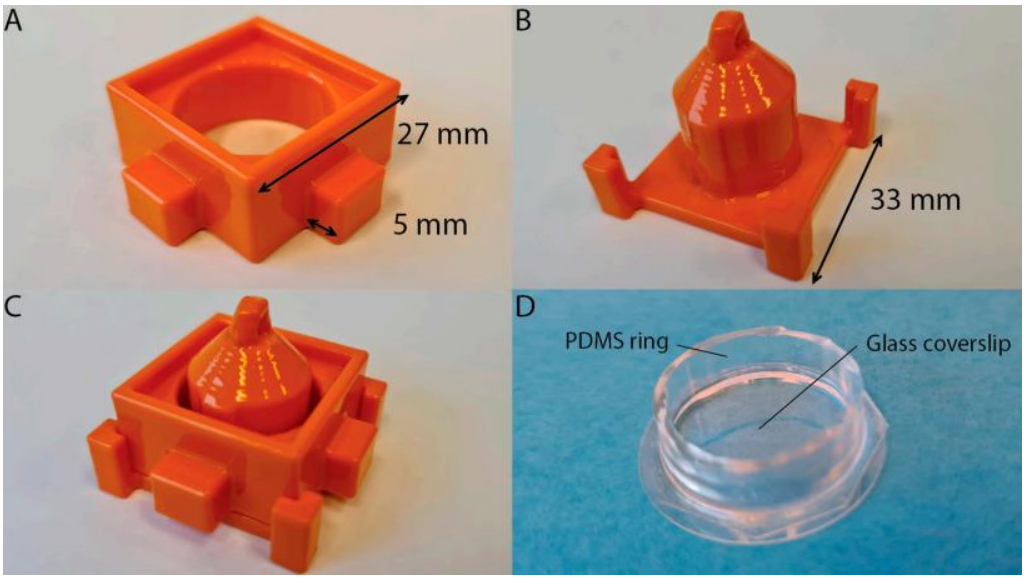


Fig. 1.4. Matrița printată 3D din PLA și piesa produsă din PDMS [26]

Tan E.T.W. et al. au utilizat elemente printate 3D din PLA pentru a obține un implant din ciment de os acrilic. Astfel, prin scanare, s-a realizat modelul 3D al unui craniu, s-a proiectat și s-a printat 3D din PLA matrița pe care se mulează cimentul în urma obținerii implantului cranian (Fig. 1.11) [32].

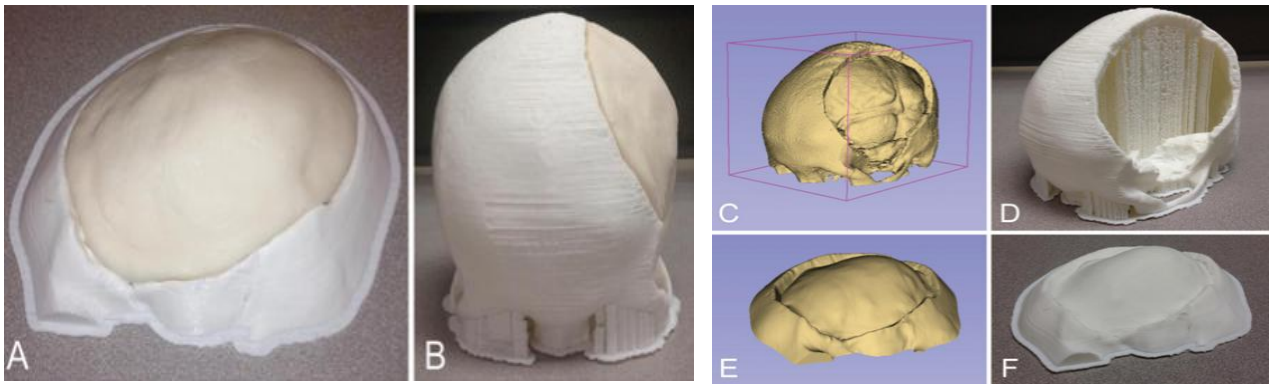


Fig. 1.11. Elemente printate 3D și cimentul de os: A) cimentul de os acrilic pe matriță; B) implantul montat pe craniul printat 3D; C) model 3D al craniului; D) craniu printat; E) model 3D al matriței; F) matrița printată [32]

Diferit la această metodă este modalitatea prin care se verifică simetria craniului. Pentru aceasta, s-a printat 3D din PLA craniul care prezintă locul unde se va monta implantul. După obținerea implantului, acesta este montat pe craniul printat, urmând să fie scanat 3D, iar determinarea gradului de simetrie să fie asistată de calculator [32].

1.3. Dezvoltarea unor matrițe din materiale termoplastice pentru prelucrări prin îndoire la rece

Nakamura et al. au evaluat deformațiile care apar la îndoirea în V utilizând metoda corelării digitale a imaginilor (DIC). Dimensiunile matrițelor sunt prezentate în Fig. 1.18 [105].

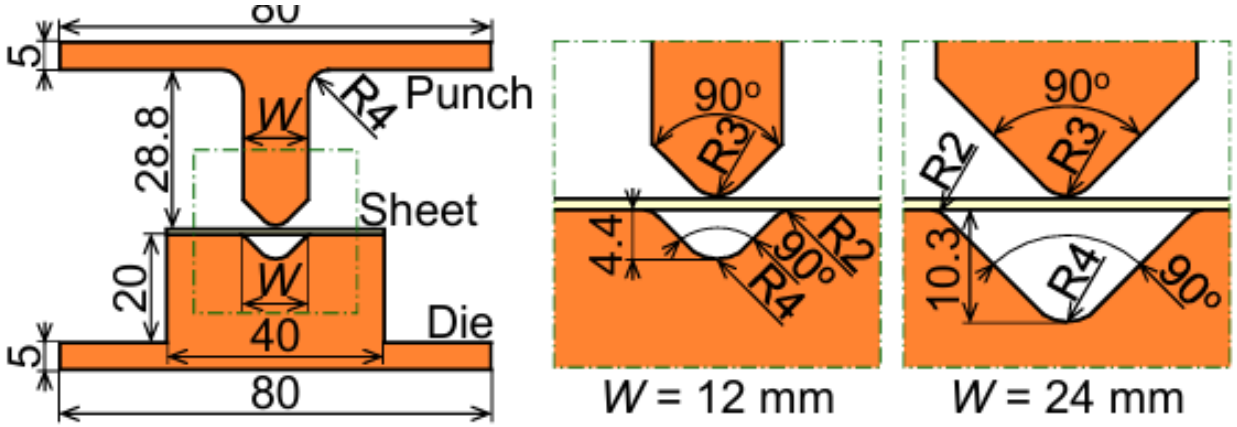


Fig. 1.18. Dimensiuni ale matrițelor pentru îndoire în V [105]

Matrițele au fost fabricate din PLA pe o imprimantă 3D FLASHFORGE INVENTOR, iar parametrii de printare utilizați au fost: temperatura duzei – 200 °C, temperatura mesei - 50 °C, grosimea stratului depus – 0,18 mm, grad de umplere de 80% . Modulul lui Young (2900 MPa) și coeficientul lui Poisson (0,33) au fost determinate aplicând metoda DIC [105].

Pentru a nu interveni probleme de frecare, elementele matrițelor au fost finisate manual cu o hârtie abrazivă. Cu ajutorul metodei DIC au fost observate unele hărți de deformații în timpul procesului de îndoire (Fig. 1.20.) [105].

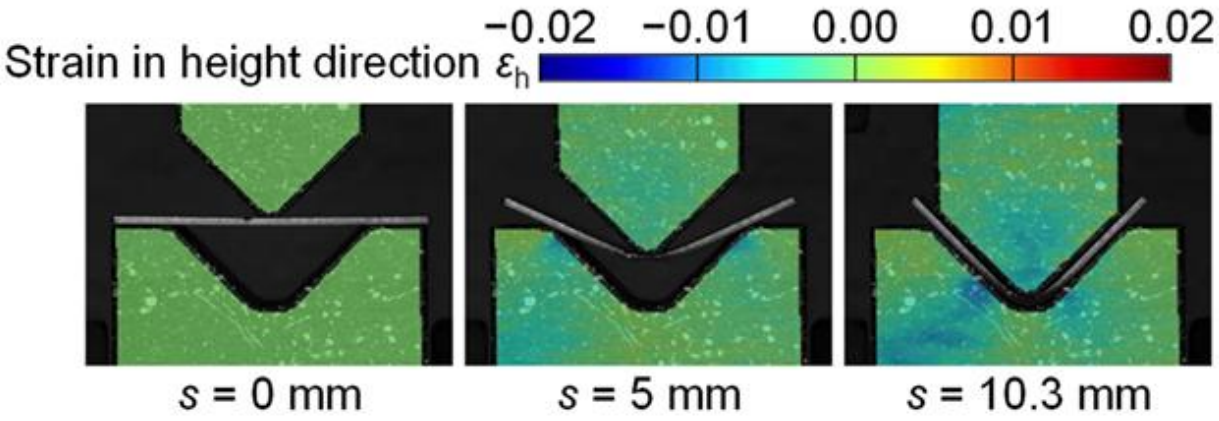


Fig. 1.20. Exemplu de hartă de deformații, la îndoire oțel cu rezistența la tracțiune de 980 MPa, lățime poanson W: 24 mm [105]

Forțele mai mari apar în cazul îndoirii cu lățimea poansonului mai mică (W=12 mm) (Fig. 1.21), iar deformațiile maxime apar în zona racordărilor [105].

Capitolul 2. Cercetări privind prelucrarea prin așchiere a unor produse din materiale termoplastice

Produsele din polilactidă, PLA, sau din tereftalat de polietilenă modificat cu glicol, PETG, precum și din alte categorii de materiale termoplastice pot fi fabricate prin printare 3D, turnare, injecție în matriță, extrudare, prelucrare mecanică etc., după caz [91- 93, 97 - 100].

2.1. Categorii principale de prelucrări prin așchiere

Există diverse categorii de prelucrări prin așchiere – prelucrarea prin strunjire, prelucrarea prin găurire, prelucrarea prin frezare etc., care se pot aplica la semifabricate/ piese termoplastice, fiecare dintre acestea cu o serie de caracteristici tehnico - economice specifice.

2.2. Elemente privind mecanica procesului de așchiere

Caracterizare geometrică și cinematică

În teoria așchierii metalelor, toate prelucrările executate cu scule sub formă de pană, din care rezultă metal îndepărtat sub formă de așchii, pot fi convențional împărțite în două cazuri generale, așchiere ortogonală și, respectiv, așchiere oblică [50], după cum se prezintă în Fig. 2.8.

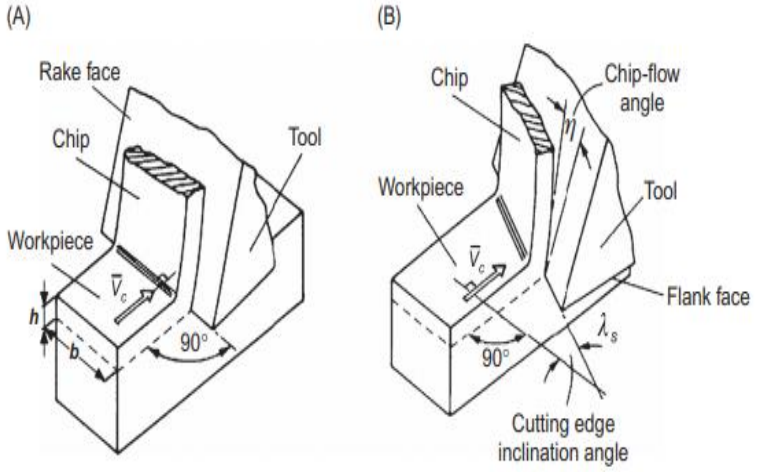


Fig. 2.8. A) Așchiere ortogonală, B) Așchiere oblică [51, 52]

Geometria sculei sub formă de pană conduce, în principiu, la intersecția a două suprafețe pentru a forma muchia de tăiere dreaptă. Funcțional, suprafața pe care așchia alunecă este denumită suprafață de degajare, iar suprafața care este în contact cu piesa este suprafața de așezare. Așchierea ortogonală reprezintă mai mult o problemă 2D, conducând la un proces de așchiere simplu care este utilizat des în cercetări [50]. Permite adoptarea unui model de proces care înglobează în zona de tăiere a materialului deformațiile plastice și tensiunile de așchiere. Vectorii mișcării sculei, alunecării materialului deformat și vitezei așchiei pentru așchierea ortogonală și oblică sunt reprezentați în Fig. 2.9 [50].

2.3. Cercetări privind prelucrarea prin așchiere a unor elemente din materiale termoplastice

Produsele din polilactidă (acid polilactic), PLA, pot fi fabricate prin printare 3D, turnare, injecție în matriță, extrudare, prelucrare mecanică etc. [91, 92, 93].

Fabricația aditivă este o metodă utilizată des în execuția prototipurilor, prin care se realizează geometrii complexe cu un consum de energie redus. În ciuda acestor avantaje, metoda încă nu a fost implementată în producția de masă, datorită repetabilității mici și a stabilității procesului [57 - 62].

În unele domenii din industrie sunt necesare piese din polilactidă, PLA, care necesită o rugozitate mică și o precizie dimensională ridicată. Este necesar un proces de finisare pentru a remedia aceste deficiențe [63 - 65]. Pentru îmbunătățirea rugozității există metode ce au la bază utilizarea unor

substanțe pe bază de acetonă [66] sau alcool izopropilic care, însă, nu conduc la precizie dimensională ridicată [28]. Este necesară dezvoltarea altor metode pentru a obține atât o rugozitate bună, cât și o precizie dimensională ridicată. Una dintre metode este așchierea pe mașini-unelte clasice sau pe mașini-unelte cu comandă numerică [67].

Mehtedi M.E. et al. investighează prelucrabilitatea prin frezare a pieselor printate 3D din PLA [68]. Astfel, au desfășurat un experiment privind influența vitezei de avans, adâncimii de așchiere și turației asupra rugozității și bavurii la frezare. Pentru printare 3D au ales ca tehnologie FDM, utilizând PLA (PLA LITE – 4043D) de la NatureWorks LLC. Proprietățile mecanice furnizate de producător sunt prezentate în Tabelul 2.1. Mașina de printat 3D utilizată a fost TRONXY 5SA FMD. A fost aplicat un spray de curățare pentru a nu avea probleme cu desprinderea pieselor de pe masa mașinii [68].

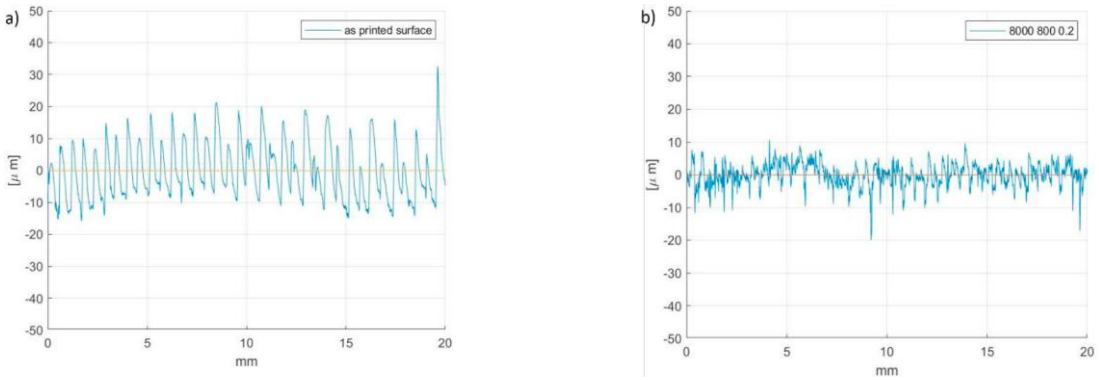


Fig. 2.12. Comparație dintre parametrii de rugozitate Ra rezultați prin: a) printare 3D; b) frezare [68]

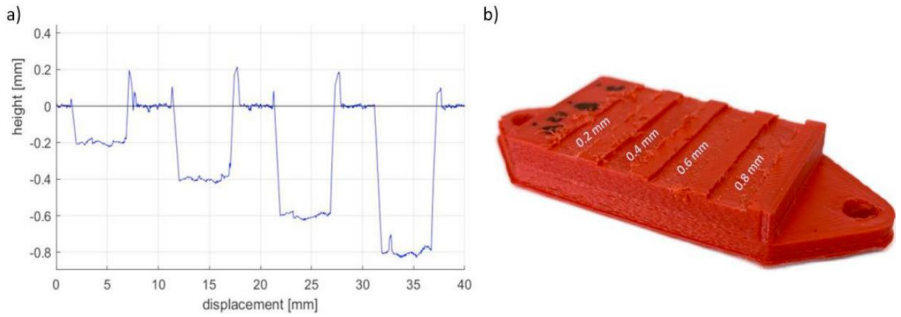
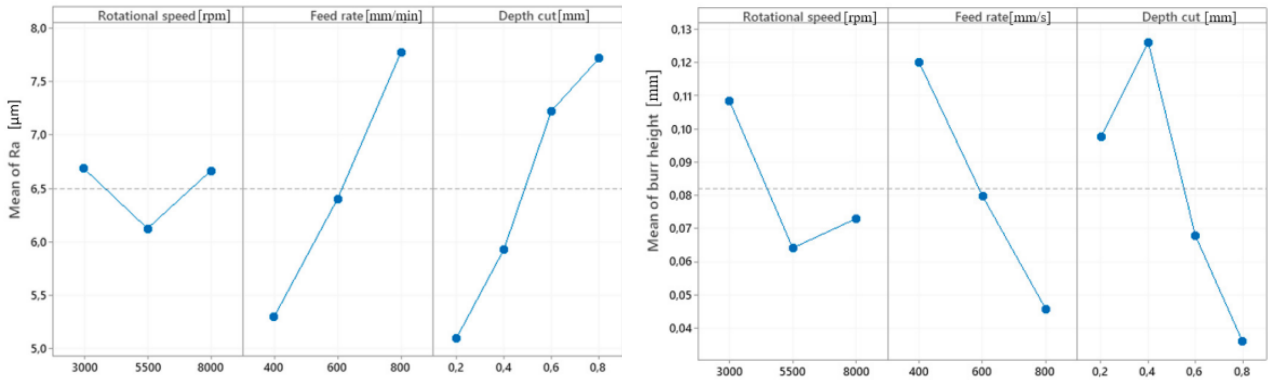


Fig. 2.13. a) Profil perpendicular pe direcția de prelucrare; b) piesă după prelucrare [68]

Se prezintă grafice de dependență dintre rugozitatea Ra și parametrii de așchiere (Fig. 2.14-a), precum și dintre înălțimea bavurii și parametrii de așchiere (Fig. 2.14-b) [68].



a) b)

Fig. 2.14. Grafice de dependență dintre: a) Ra și n_c, V_f, a_p; b) înălțimea bavurii și n_c, V_f, a_p [68]

Capitolul 3. Concluzii referitoare la stadiul actual al cercetărilor privind fabricarea și precizia unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere

Din analiza stadiului actual al cercetărilor privind fabricarea și precizia unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere, se desprind concluzii importante, după cum urmează.

• În condiții de producție individuală sau de serie mică, componente ale unor matrițe de injecție sau de turnare se pot proiecta și produce prin fabricare aditivă din materiale polimerice de tip rășină, acid polilactic etc.

Cercetarea experimentală a fabricării aditive a plăcilor active din construcția unei matrițe de injecție, în diferite variante tehnologice, respectiv, din diverse materiale - rășină albă, polietereterketonă, polyjet RGD515 -, a arătat că precizia dimensională a elementelor fabricate - de exemplu, peleți de acid polilactic (PLA) - este acceptabilă (v. § 1.1).

• Polilactida (PLA) este un material polimeric termoplastic care se produce într-o gamă largă a caracteristicilor chimice și fizice, respectiv, cu densitatea de 1.21 – 1.43 kg/dm^3, modulul de elasticitate de 2,7 – 16 GPa etc. (v. § 1.2).

• Produsele din PLA pot fi fabricate prin printare 3D, turnare, injecție, extrudare, prelucrare mecanică etc. Datorită costului redus, PLA este un material utilizat în industrie la fabricarea unor matrițe prin printare 3D - în cazul producțiilor de serie mică sau unicate, prin injecție în matriță etc. (v. § 1.2).

• Matrițele printate 3D sunt o opțiune acceptabilă datorită prețului redus al acestora, dar o problemă principală o reprezintă rugozitatea suprafețelor matrițelor.

Matrițele din PLA reprezintă o soluție mai economică și mai rapidă decât matrițele din rășină, care necesită mașini de printat speciale, pentru a fabrica piese din polidimetilsiloxan (PDMS) (v. § 1.2).

• Finisarea matrițelor cu vapori de cloroform asigură o rugozitate bună, dar o precizie dimensională scăzută. Finisarea matrițelor printate 3D se poate realiza prin sablare manuală în cazul componentelor cu geometrie simplă și toleranțe mari (v. § 1.2).

• În cadrul unei cercetări s-a dezvoltat o metodă de obținere a unor proteze din silicon-prin utilizarea de matrițe printate 3D finisate cu acetonă (v. § 1.2).

• O metodă de a obține implanturi din ciment de os acrilic este de a mula materialul de bază peste o matriță printată 3D (v. § 1.2).

• Pentru fabricarea implanturilor din PMMA se pot utiliza matrițe din silicon. Pentru a modela părțile active ale matrițelor, se utilizează frecvent modele tehnologice printate 3D din PLA. Această metodă poate fi aplicată la scară largă, fiind ieftină și cu rezultate bune (v. § 1.2).

O matriță de silicon necesită, în general, un volum redus de activități pentru pregătirea suprafeței, deoarece majoritatea materialelor nu aderă la silicon (v. § 1.2).

• Cercetarea privind îndoirea unor piese în V utilizând matrițe printate 3D din PLA vizează deformațiile elementelor active și forțele din timpul procesului. Se arată că valorile maxime ale deformațiilor au fost măsurate la îndoirea piesei din materialul cu rezistența la tracțiune de 980 MPa (aproximativ -0,02 mm) (v. § 1.3).

• Produsele din polilactidă, PLA, sau din tereftalat de polietilenă modificat cu glicol, PETG, precum și din alte categorii de materiale termoplastice pot fi fabricate prin printare 3D, turnare, prelucrare mecanică etc.

Există diverse categorii de prelucrări prin așchiere – prelucrarea prin strunjire, prelucrarea prin găurire, prelucrarea prin frezare etc., care se pot aplica la semifabricate/ piese termoplastice, fiecare dintre acestea cu o serie de caracteristici tehnico - economice specifice (v. § 2.1).

• Cercetarea prelucrabilității unor piese printate 3D din PLA, în cadrul unui program experimental, bazat pe un plan factorial cu trei factori, a vizat influența adâncimii de așchiere, avansului și vitezei de așchiere asupra rugozității și bavurii la prelucrarea prin frezare, cu lichid de răcire. Se arată că parametrul principal de influență asupra rugozității este avansul pe dinte (v. § 2.3).

• O cercetare privind prelucrarea pieselor prin metoda hibridă, respectiv, printare 3D și frezare CNC, în cadrul căreia se variază grosimea stratului de depunere, evidențiază faptul că cea mai uniformă suprafață a fost realizată cu grosimea de strat cea mai mică.

Unul dintre principalele avantaje ale utilizării acestei soluții hibride este reprezentat de eliminarea erorilor de orientare, deoarece în aceeași poziție, în spațiul de lucru al mașinii, se execută ambele procese (printare și frezare CNC). Prin frezare s-a obținut o îmbunătățirea a preciziei cu 80% (v. § 2.3).

• În cercetarea care se axează pe prelucrabilitatea prin frezare a pieselor printate 3D din PLA, PETG și CF-PETG, se proiectează un experiment în cadrul căruia s-au analizat influențele vitezei de avans, adâncimii de așchiere și ale turației asupra rugozității și a bavurii la frezare. Sunt prezentate grafice de dependență dintre parametrii de așchiere și rugozitate/ înălțimea bavurii (v. § 2.3).

• În cadrul unei cercetări experimentale privind prelucrabilitatea prin frezare a unor piese printate 3D din PETG și CF-PETG se studiază influența orientării semifabricatelor față de direcția de printare și grosimea stratului depus asupra rugozității și dimensiunilor efective.

În cazul frezării pieselor din PETG, valorile efective ale rugozității și preciziei dimensionale nu sunt influențate de modul în care piesele au fost fabricate anterior (orientarea față de direcția de printare sau de grosimea stratului depus). În cadrul prelucrării pieselor din CF-PETG este evidențiată influența obținerii semifabricatelor asupra valorilor efective (v. § 2.3).

• Cercetarea privind fabricarea hibridă (printare 3D+așchiere) a pieselor printate 3D din PETG vizează influența unor parametri de așchiere și a grosimii stratului depus asupra rugozității efective. În cadrul experimentelor, piesele sunt prelucrate prin strunjire un cuțit cu plăcuțe din carbură metalică cu rază la vârf. Se evidențiază modul în care avansul influențează rugozitatea efectivă (v. § 2.3)

Capitolul 4. Direcțiile, obiectivul principal şi metodologia de cercetare-dezvoltare privind modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere

4.1. Direcții de cercetare-dezvoltare

Pe baza celor desprinse din analiza stadiului actual, se apreciază a fi de perspectivă, pentru dezvoltarea de elemente și matrițe din materiale termoplastice, direcțiile de cercetare - dezvoltare privind:

• determinarea caracteristicilor de material și geometrice ale elementelor și matrițelor din materiale termoplastice;

• procesele de interacțiune dintre caracteristici ale matrițelor din materiale termoplastice și elemente ale sistemelor tehnologice;

• baze de date constructiv - funcționale privind elemente și matrițe din materiale termoplastice;

• procese și sisteme de fabricare a elementelor și matrițelor din materiale termoplastice;

• baze de date tehnologice privind elemente și matrițe din materiale termoplastice;

• studii de caz privind proiectarea și fabricarea elementelor și matrițelor din materiale termoplastice.

4.2. Obiectivul principal al activității de cercetare - dezvoltare

Având în vedere datele și concluziile desprinse din analiza stadiului actual, precum şi direcțiile de cercetare-dezvoltare referitoare la dezvoltarea de elemente și matrițe din materiale termoplastice, se determină ca obiectiv principal al activității doctorale avansate de cercetare-dezvoltare: **modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere**.

4.3. Metodologia de cercetare -dezvoltare

Metodologia de cercetare-dezvoltare este concepută ca un ansamblu de elemente de referință pentru realizarea obiectivului principal al tezei de doctorat și, corespunzător, a programului de cercetări teoretico-experimentale, respectiv, a capitolelor specifice din teza de doctorat, precum și a unor dezvoltări viitoare.

Programul de cercetări teoretico -experimentale se structurează după cum se prezintă în Fig. 4.1.

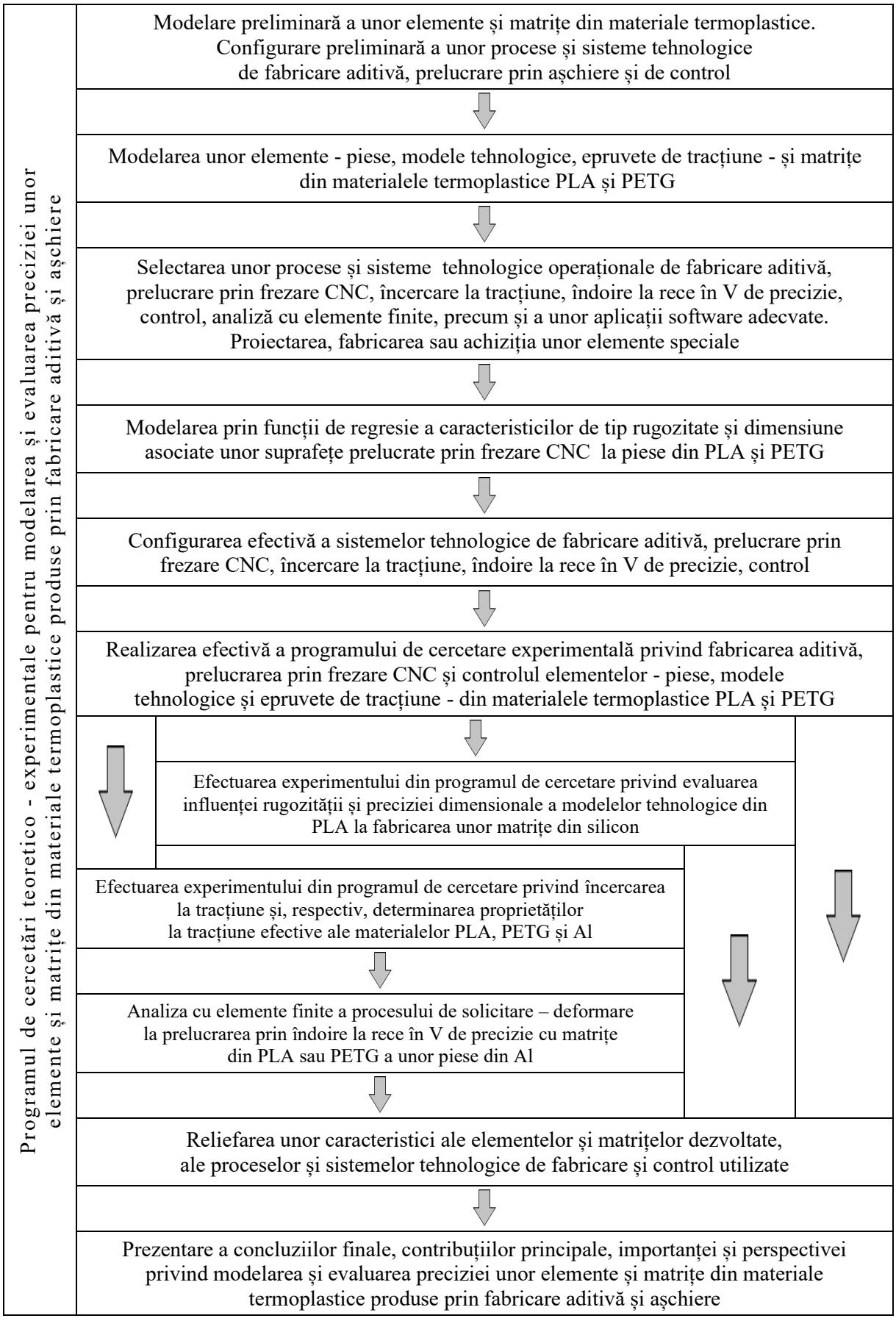


Fig. 4.1. Structura generală a programului de cercetări teoretico-experimentale

Capitolul 5. Cercetări privind rugozitatea și precizia dimensională la piese din PLA printate 3D și prelucrate prin frezare CNC

Cercetările privind rugozitatea și precizia dimensională la piese din PLA printate 3D și prelucrate prin frezare CNC, care includ și elemente publicate ale autorului [74], sunt după cum urmează.

5.1. Caracteristici ale proceselor și sistemelor de cercetare pentru determinarea rugozității și a preciziei dimensionale la piese printate 3D din PLA și prelucrate prin frezare CNC

5.1.1. Programe de cercetare, materialul PLA, tipuri de piese și suprafețe, scheme de prelucrare prin frezare, elemente ale proceselor și sistemelor tehnologice de printare 3D și de prelucrare CNC

a. Elemente generale privind programele de cercetare PLA - Frezare frontală, PLA - Frezare cilindrică și PLA - Frezare cilindro-frontală

Având în vedere forma și poziția relativă a suprafețelor din structura unor componente de matrițe printate 3D din PLA (v. și § 1.2, 2.3), precum și diferitele scheme de prelucrare prin frezare (v. și § 2.1, 2.2), s-au dezvoltat programele de cercetare PLA - Frezare frontală, PLA - Frezare cilindrică și PLA - Frezare cilindro-frontală prin care, în condiții definite:

• se printează 3D din PLA o serie de piese;

• la piesele printate, se prelucrează prin frezare CNC suprafețe plane de poziții diferite, și anume, suprafețe plane *orizontale* - prin frezare frontală, suprafețe plane *verticale* - prin frezare cilindrică, respectiv, suprafețe plane *înclinate* - prin frezare cilindro-frontală, după caz;

• se modelează și se analizează parametrii de rugozitate Ra și Rz, precum și precizia dimensională aferente unor suprafețe plane ale pieselor printate și, corespunzător, aferente suprafețelor plane *orizontale*, *verticale*, *înclinate* prelucrate prin frezare CNC.

h. Suprafețele obiectiv și schemele de prelucrare prin frezare

În vederea evaluării rugozității și preciziei dimensionale a unor suprafețe prelucrate prin frezare CNC la piese din PLA printate 3D, de tip PA și PB (v. Fig. 5.1), s-au selectat suprafețele plane obiectiv și dimensiunea obiectiv, precum și schemele de prelucrare prin frezare, după cum se prezintă în Fig. 5.9, respectiv: o suprafață plană *orizontală* - prin frezare frontală (PA/ SO - FF); două suprafețe plane *verticale* și dimensiunea C de tip distanță dintre cele două suprafețe plane verticale – prin frezare cilindrică (PA/ SV1, 2; C – FC); o suprafață plană *înclinată* – prin frezare cilindro-frontală (PB/ SI – FC-F).

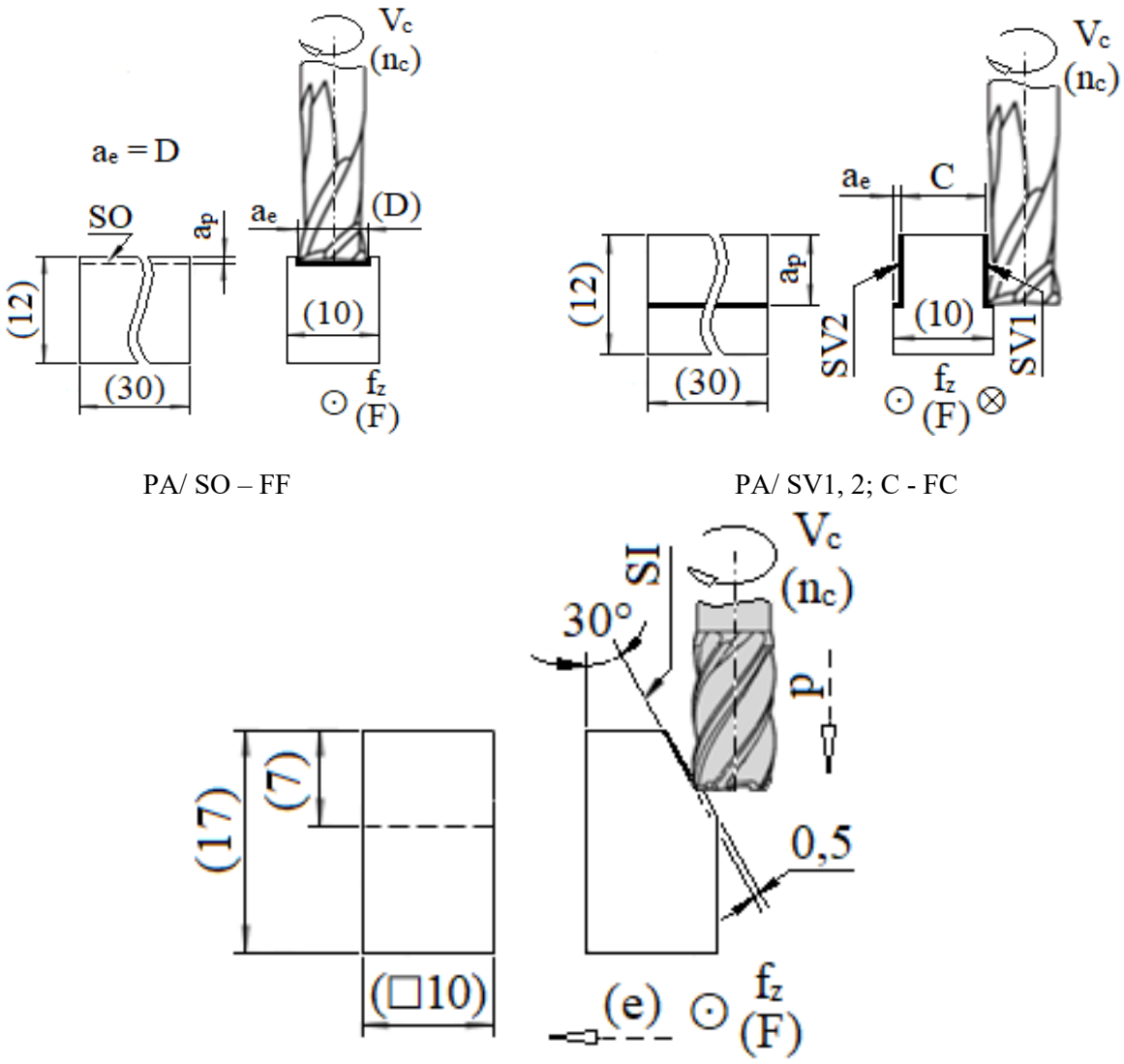


Fig. 5.9. Suprafețele plane obiectiv, dimensiunea obiectiv și schemele de prelucrare: suprafață *orizontală* - frezare frontală (PA/ SO - FF); suprafețe *verticale* și distanța dintre acestea - frezare cilindrică (PA/ SV1, 2; C - FC); suprafață *înclinată* - frezare cilindro-frontală (PB/ SI – FCF)

5.1.2. Evaluare a rugozității și a preciziei dimensionale la piese printate 3D din PLA

La o serie de piese printate 3D din materialul PLA, s-au determinat parametrii efectivi de rugozitate, Ra* și Rz* ai unor suprafețe orizontale (frontale), verticale (laterale) și înclinate, precum și distanța efectivă, C*, dintre două suprafețe (plane, paralele) verticale (v. și Fig. 5.1 - PA, PB și § 5.1.1 - g, j, k). Rezultatele se prezintă în Anexa nr. 1.1, iar valorile efective medii - în Tabelele 5.5 și 5.6.

Se remarcă următoarele (v. și Tabelele 5.5, 5.6, Anexa nr. 1.1):

• la suprafețele *orizontale*, parametrul de rugozitate Ra* are valori efective în clasele de rugozitate N 8 - 9 (Ra 3.2 – 6.3), iar la suprafețele *verticale* și *înclinate*, parametrul Ra* are valori efective în clasele de rugozitate N10 - 11 (Ra 12.5 - 25) [94];

• dimensiunea C* are valori efective în clasa de toleranță (tolerance class) IT12 [95].

5.1.3. Elemente de modelare a rugozității și dimensiunii asociate suprafețelor prelucrate prin frezare frontală, cilindrică și cilindro-frontală, la piese printate 3D din materialul PLA

a. Variabilele de proces

În cadrul modelării rugozității și dimensiunii asociate suprafețelor prelucrate prin frezare frontală, cilindrică și cilindro-frontală, la piese printate 3D din PLA, s-au selectat variabilele dependente și variabilele independente, respectiv,

• variabilele dependente: parametrii de rugozitate Ra și Rz, în μm, în programele PLA - Frezare frontală/ cilindrică/ cilindro-frontală, precum și distanța C, în mm, dintre două suprafețe paralele prelucrate în programul PLA - Frezare cilindrică;

• variabilele independente: avansul pe dinte, f_z, și viteza de așchiere, V_c, în programul PLA - Frezare cilindrică sau turația, n_c, și viteza de avans, F, în programul PLA - Frezare frontală, precum și avansul axial de reglare, p, în programul PLA - Frezare cilindro-frontală.

Tabelul 5.7. Elemente privind parametrii regimurilor de așchiere
(v. și Tabele 5.2 – 5.4, Fig. 5.4, 5,5, 5.9)

<table>
<tr><td rowspan="2">Prelucrare</td><td colspan="4">Freze cilindro-frontale T01, T02 de: diametru activ d (D - la T01, D1 - la T02) și rază la vârf r (la T02), mm; număr de dinți z</td><td colspan="3">Adâncimi de așchiere - axială (principală), a_p, și radială (secundară), a_e, mm; Adaos de prelucrare, A, mm</td><td colspan="4">Avans de așchiere, f_z, mm/dinte; Viteză de așchiere, V_c, m/min; Turație, n_c, rot/min; Viteză de avans, F, mm/min; Avansuri de reglare - axial, p, și radial, e, mm/trecere</td><td>Număr de treceri</td></tr>
<tr><td>Cod</td><td>d</td><td>r</td><td>z</td><td>a_p</td><td>a_e</td><td>A</td><td>f_z</td><td>V_c</td><td>n_c</td><td>F</td><td>p, e</td><td>i</td></tr>
<tr><td>Frezare frontală</td><td rowspan="2">T01</td><td rowspan="2">8</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">2</td><td>0,3</td><td>8</td><td></td><td colspan="4" rowspan="3">$f_z \in (0{,}012; 0{,}24)$, $V_c \in (55; 102)$, $n_c = 1000V_c/\pi d$, $F = zf_z n_c$, $n_c \in (2188; 4058)$, $F \in (52; 1210)$</td><td>-</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Frezare cilindrică</td><td>7</td><td>0,3</td><td></td><td>-</td><td>1</td></tr>
<tr><td>Frezare cilindro - frontală</td><td>T02</td><td>8</td><td>0,5</td><td>5</td><td>p</td><td>A/cos 30°, $a_e = 0{,}58$</td><td>0,5</td><td colspan="2">p ∈ (0,008; 0,11), e = p*tg30°; i = (7 + r)/p, i = 7,5/p</td></tr>
</table>

În continuare, variabilele independente și fiecare variabilă dependentă se notează prin X_j, j = 1, 2, și, respectiv, Y,

$$X_1 = f_z,\ X_2 = V_c \text{ sau } X_1 = F,\ X_2 = n \text{ sau } X_1 = p,\ Y = Ra, Rz \text{ sau } C, \text{ după caz} \qquad (5.1)$$

b. Modelele analitice pentru funcțiile de regresie rugozitate și dimensiune suprafețe prelucrate

Pe baza rezultatelor unor cercetări teoretico – experimentale [74, 83] s-au ales modelele analitice pentru funcțiile de regresie rugozitate și dimensiune suprafețe prelucrate, după cum urmează.

(b1) În cadrul programelor PLA - Frezare frontală/ Frezare cilindrică, pentru funcțiile de regresie rugozitate, respectiv, dimensiune suprafețe prelucrate se alege modelul analitic (multivariabil):

$$Y = A_0 X_1^{A_1} X_2^{A_2},\ X_1 = f_z,\ X_2 = V_c \text{ sau } X_1 = F,\ X_2 = n_c,\ Y = Ra, Rz \text{ sau } C, \text{ după caz} \qquad (5.2)$$

unde A_0, A_1 și A_2 sunt coeficienții de regresie care urmează a fi determinați.

În vederea determinării coeficienților de regresie, se logaritmează funcția $Y = A_0 X_1^{A_1} X_2^{A_2}$, astfel încât aceasta devine liniară în raport cu coeficienții de regresie, respectiv,

$$\ln Y = \ln A_0 + A_1 \ln X_1 + A_2 \ln X_2,\ X_1 = f_z,\ X_2 = V_c \text{ sau } X_1 = F,\ X_2 = n_c \text{ și } Y = Ra, Rz, C \qquad (5.3)$$

sau, echivalent,

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^{2} a_j z_j,\ y = \ln Y,\ z_j = \ln X_J,\ a_0 = \ln A_0 \text{ și } a_J = A_J, j = 1, 2 \qquad (5.4)$$

Pentru omogenizare dimensională, se introduc variabilele independente adimensionale de calcul x_j, prin substituțiile:

$$z_j = p_j x_j + q_j,\ j = 1, 2 \qquad (5.5)$$

unde constantele p_j și q_j se determină pentru niveluri corespondente ale variabilelor z_j (X_j) și x_j.

Astfel, funcția (5.4) devine:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^{2} b_j x_j,\ y = \ln Y,\ Y = Ra, Rz \text{ sau } C, \text{ după caz} \qquad (5.6)$$

unde b_0 și b_j, j = 1, 2, sunt coeficienții de regresie care pot fi supuși analizei de regresie în vederea evaluării semnificației lor și a adecvanței modelului.

(b2) În cadrul programului PLA - Frezare cilindro-frontală, pentru funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată se alege modelul analitic (monovariabil):

$$Y = A_0 X_1^{A_1},\ X_1 = p,\ Y = Ra \text{ sau } Rz \qquad (5.7)$$

unde A_0 și A_1 sunt coeficienții de regresie care urmează a fi determinați.

În etapa de prelucrare a datelor experimentale, prin intermediul aplicației Microsoft Excel [80], se determină coeficienții de regresie și un model (5.7) adecvat pentru care coeficientul de determinare R^2 [81] și rezidualele sunt de valori acceptabile.

Se subliniază faptul că nivelul semnificației coeficienților de regresie ilustrează și nivelul influenței variabilelor independente corespondente asupra variabilei dependente, respectiv, în condițiile tehnologice considerate, influența avansului pe dinte, vitezei de așchiere sau avansului de reglare, precum și a altor elemente – caracteristici ale materialului prelucrat, parametri geometrici ai părții active a sculei așchietoare etc., după caz.

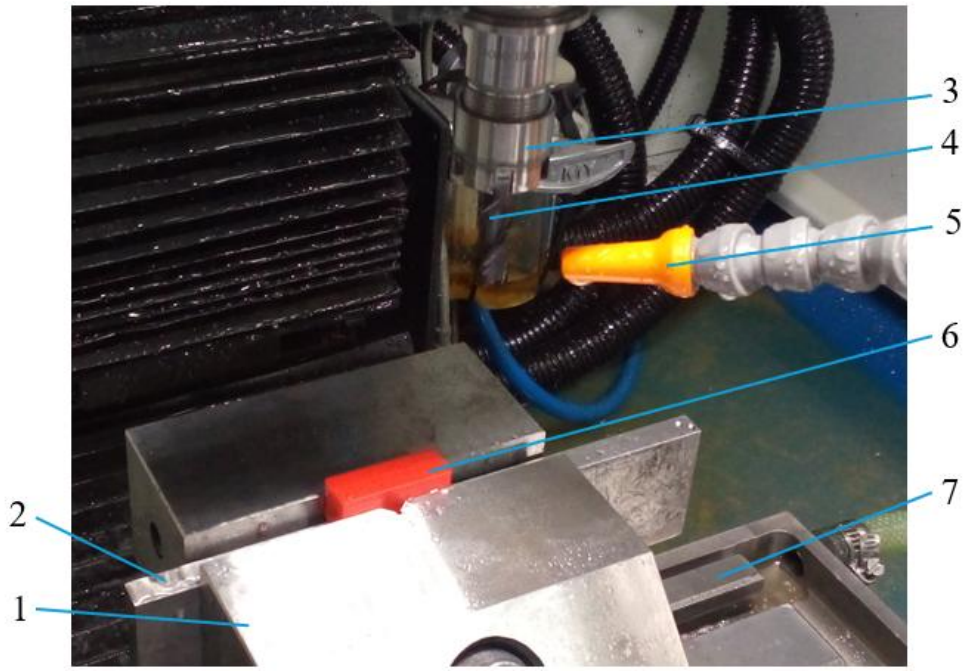
Se menționează că analiza de regresie a unei funcții (5.7), respectiv, verificarea adecvanței modelului și a semnificației coeficienților de regresie, se realizează în etapa de determinare a coeficienților de regresie.

5.2. Date experimentale și funcții de regresie rugozitate suprafață prelucrată în cadrul programului PLA - Frezare frontală

5.2.1. Reglarea și programarea sistemului tehnologic CNC, nivelurile variabilelor independente, prelucrări și rezultatele experimentale în programul PLA - Frezare frontală

Pentru realizarea prelucrării prin frezare frontală necesare (v. Fig. 5.9, PA/ SO – FF), s-a constituit sistemul tehnologic de prelucrare CNC, din elementele specifice: Centrul de prelucrare CNC, dispozitivele de orientare - fixare, freza cilindro-frontală T01 etc. (v. și § 5.1.1 e – g, Fig. 5.13).

În continuare, s-a efectuat reglarea la dimensiune a sistemului tehnologic, în plan (X, Y) și pe direcția Z (v. și § 5.1.1-i), astfel încât sistemul de coordonate de lucru este asociat piesei de prelucrat, după cum se prezintă în Fig. 5.14.



1 - Menghină de precizie

2 - Placă (cală) de orientare

3 - Mandrină cu bucșă elastică

4 - Freză cilindro-frontală T01

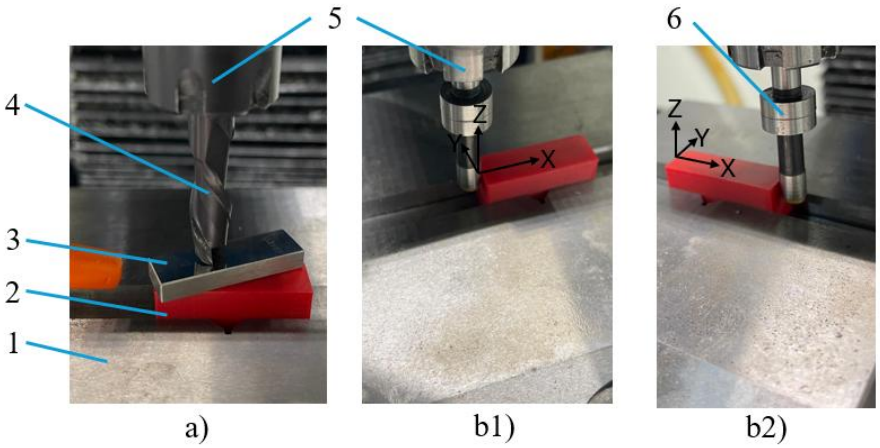
5 - Duză lichid de răcire-ungere

6 - Piesă de tip PA

7 - Masă centru CNC

Fig. 5.13. Elemente ale sistemului tehnologic de prelucrare prin frezare CNC

În continuare, s-a efectuat reglarea la dimensiune a sistemului tehnologic, în plan (X, Y) și pe direcția Z (v. și § 5.1.1-i), astfel încât sistemul de coordonate de lucru este asociat piesei de prelucrat, după cum se prezintă în Fig. 5.14.



1 - Menghină de precizie

2 - Piesă de tip PA

3 - Placă (cală) de reglare

4 - Freză cilindro-frontală T01

5 - Mandrină cu bucșă elastică

6 - Palpator magnetic

Fig. 5.14. Reglarea la zero a sistemului tehnologic pentru prelucrarea prin frezare frontală: a) pe direcția Z; b1) și b2) în plan (X, Y)

Nivelurile variabilelor independente și conținutul experiențelor s-au determinat în raport cu elementele metodologice din § 5.1.3 - a, c, după cum se prezintă în Tabelele 5.8 și 5.9.

5.2.2. Analiză asupra rezultatelor experimentale și funcții de regresie privind rugozitatea suprafeței prelucrate în cadrul programului PLA - Frezare frontală

(1) Analiză asupra rezultatelor experimentale

În cadrul programului PLA – Frezare frontală efectuat (v. § 5.2.1), experiențele cu nr. de ordine i = 1, 2, …, 23 se grupează astfel încât, în fiecare grup, viteza de așchiere, V_c, este constantă, iar avansul pe dinte, f_z, este variabil crescător (v. și Anexă), și anume:
V_c = 56,55 m/min și f_z = 0,0222 - 0,2275 mm/dinte (i = 1, 5, 10, 15, 20),
V_c = 65,29 m/min și f_z = 0,0192 - 0,1970 mm/dinte (i = 2, 6, 11, 16, 21),
V_c = 75,40 m/min și f_z = 0,0298 - 0,0953 mm/dinte (i = 7, 12, 17),
V_c = 87,06 m/min și f_z = 0,0144 - 0,1478 mm/dinte (i = 3, 8, 13, 18, 22),
V_c = 105,5 m/min și f_z = 0,0125 - 0,1280 mm/dinte (i = 4, 9, 14, 19, 23).

La fiecare dintre grupurile de experiențe considerate, se consideră dependențele experimentale Ra(f_z) și Rz(f_z) după cum se prezintă în Fig. 5.16 - 5.20 (v. și Anexă).

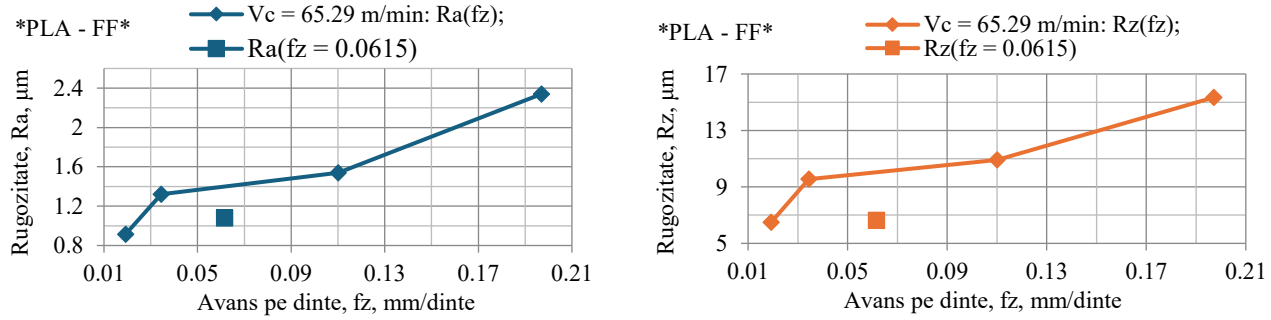


Fig. 5.17. Dependențe experimentale: Ra(f_z) și Rz(f_z) la prelucrări cu V_c = 65.29 m/min

Se constată că, în cadrul grupurilor de experiențe de mai sus, parametrii de rugozitate Ra și Rz variază similar avansului f_z, cu excepția unor cazuri [V_c; Y(f_z)]: [56.55; Ra(0.1271)], [65.29; Rz(0.0615)], [87.06; Rz(0.0258) și Rz(0.0825)], [100.5; Ra(0.04), Rz(0.04) și Rz(0.128)].

O analiză comparativă a rugozității unor suprafețe orizontale printate și rugozității suprafețelor orizontale prelucrate prin frezare frontală, pe baza valorilor efective medii ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, evidențiază influența pozitivă a prelucrării prin așchiere, cu excepția cazului [V_c; Y(f_z)]: [75,4; Ra(0.0953) și Rz(0.0953)], unde Ra(0.0953) = 4.6603 µm și Rz(0.0953) = 34.326 µm, după cum se prezintă și în Fig. 5.21, respectiv, 5.22 (v. Tabelele 5.5, 5.9 și Anexă).

Se apreciază că, în cazul [V_c; Y(f_z)]: [75,4; Ra(0.0953) și Rz(0.0953)], parametrii Ra și Rz ai suprafeței prelucrate prin frezare frontală sunt de valori mai mari decât valorile corespunzătoare celorlalte suprafețe prelucrate cu V_c = 75,4 m/min și diferite avansuri pe dinte, precum și decât valorile corespunzătoare suprafețelor printate, urmare a influenței semnificative a variației unor caracteristici ale materialului prelucrat.

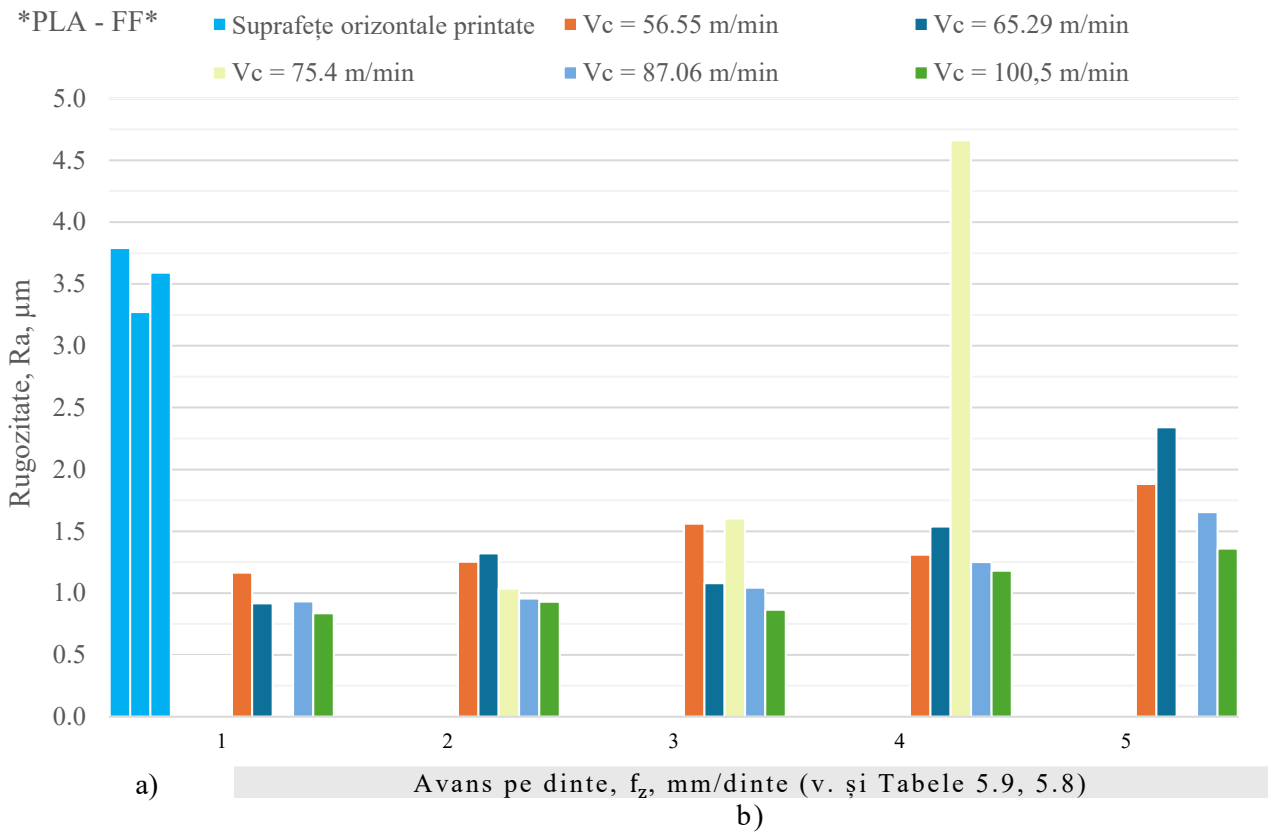


Fig. 5.21. Valori medii comparative ale rugozității Ra a unor suprafețe orizontale: a) printate (v. și Tabel 5.5), b) prelucrate prin frezare frontală (v. și Tabel 5.9, Fig. 5.16 – 5.20)

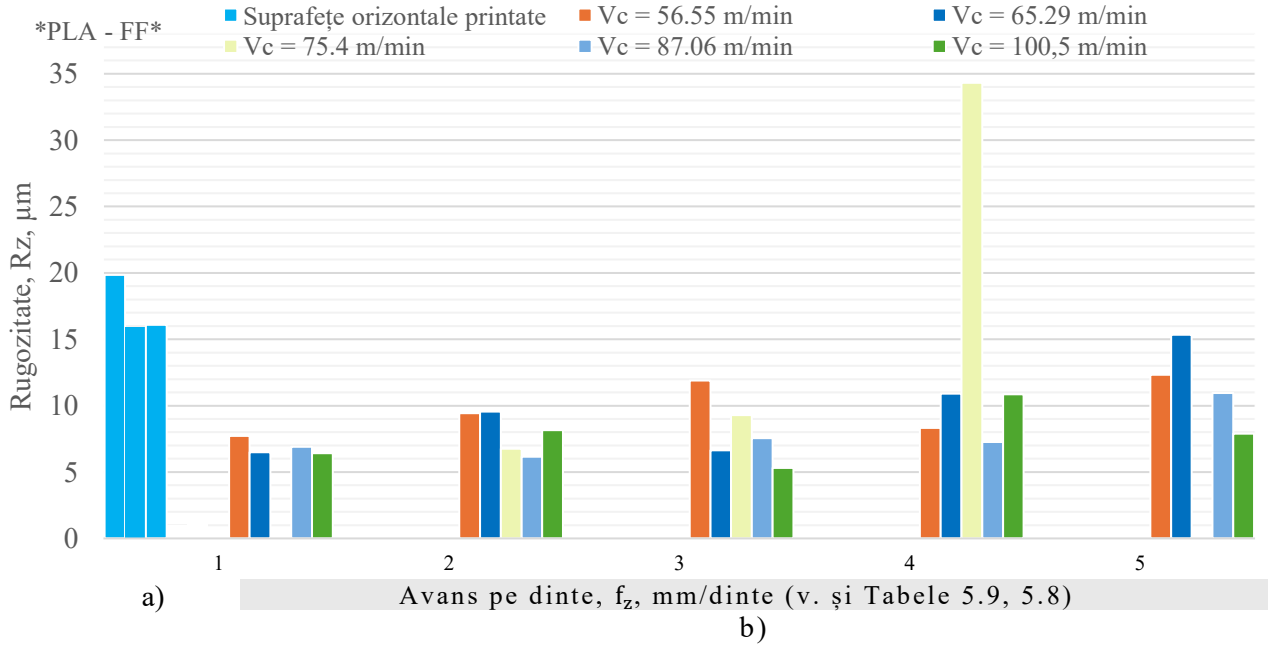


Fig. 5.22. Valori medii comparative ale rugozității Rz a unor suprafețe orizontale: a) printate (v. și Tabel 5.5), b) prelucrate prin frezare frontală (v. și Tabel 5.9, Fig. 5.16 – 5.20)

(2) Funcții de regresie rugozitate suprafață prelucrată

Într-o primă etapă, s-au determinat [80] funcții de regresie rugozitate suprafață prelucrată monovariabile, $Ra = Ra(f_z)$ și $Rz = Rz(f_z)$ de tip *liniar*, *putere* etc. Acestea s-au analizat pe baza valorii coeficientului de determinare R^2 [81], precum și în raport cu tendința evoluției valorilor experimentale ale parametrilor Ra și Rz în funcție de avansul pe dinte.

Funcțiile de regresie Ra = Ra(f_z) și Rz = Rz(f_z) de tip *liniar* și *putere* determinate se prezintă în Anexa nr. 1.6, iar o serie de exemple în Fig. 5.23 - 5.27.

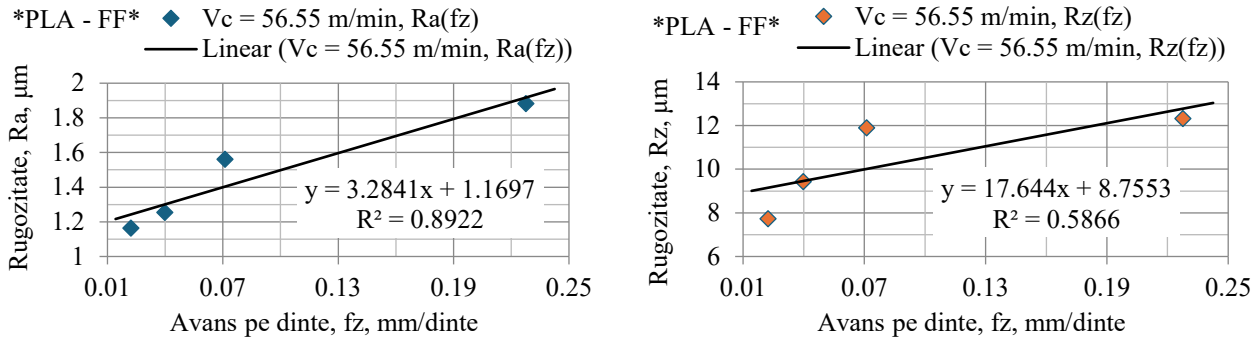


Fig. 5.24. Funcții de regresie rugozitate monovariabile Ra(f_z) și Rz(f_z), de tip *liniar* și *putere,* la prelucrări cu V_c = 56,55 m/min

Se apreciază că rezultatele analizei prezentate susțin alegerea modelului analitic (5.2).

Calculul coeficienților de regresie și analiza de regresie privind funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată obiectiv (5.2) s-au efectuat în raport cu elementele metodologice din § 5.1.3 - e, f. Datele principale se prezintă în anexe.

O sinteză privind coeficienții de regresie b_j și A_j, funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată, Ra (f_z, V_c)și Rz (f_z, V_c), indicatorii R^* de estimare a adecvanței modelului funcției de regresie și indicatorii R_j de estimare a semnificației coeficienților de regresie b_j se prezintă în cele ce urmează.

Programul PLA - Frezare frontală

Rugozitate Ra suprafață prelucrată		Rugozitate Rz suprafață prelucrată	
b_0 = 0.311947		b_0 = 2.221847	
b_1 = 0.1707	(5.19)	b_1 = 0.144828	(5.24)
b_2 = -0.08377		b_2 = -0.072611	
A_0 = 26.694434		A_0 = 125.141954	
A_1 = 0.293191	(5.20)	A_1 = 0.248753	(5.25)
A_2 = -0.582502		A_2 = -0.504909	
$Ra = 26.6944F^{0.2931}n_c{}^{-0.5825}$ <=> $Ra = 11.2681f_z{}^{0.2931}V_c{}^{-0.2893}$	(5.21)	$Rz = 125.1419F^{0.2487}n_c{}^{-0.5049}$ <=> $Rz = 57.8758f_z{}^{0.2487}V_c{}^{-0.2561}$	(5.26)
R^* = 0.5768	(5.22)	R^* = 0.4193	(5.27)
R_0 = 7.7031		R_0 = 320.2991	
R_1 = 3.4599	(5.23)	R_1 = 2.0413	(5.28)
R_2 = 0.9919		R_2 = 0.6108	

5.3. Date experimentale, funcții de regresie rugozitate și dimensiune suprafețe prelucrate în cadrul programului PLA - Frezare cilindrică

5.3.1. Reglarea și programarea sistemului tehnologic CNC, nivelurile variabilelor independente, prelucrări și rezultate experimentale în programul PLA - Frezare cilindrică

Pentru realizarea prelucrărilor prin frezare cilindrică necesare (v. Fig. 5.9, PA/ SV1, 2; C – FC), s-a constituit și s-a reglat la dimensiune sistemul tehnologic, similar modului de lucru prezentat în § 5.2.1 (v. și 5.1.1-i).

Nivelurile variabilelor independente și conținutul experiențelor s-au determinat în raport cu elementele metodologice din § 5.1.3 - a, c, după cum se prezintă în Tabelele 6.10 și 5.11.

Prin interfața de editare a Centrului de prelucrare CNC, a fost activat Programul CNC Frezare cilindrică, după cum se prezintă în Fig. 5.29. Se menționează că instrucțiunile de adrese S și F, S... și, respectiv, F... , sunt programate în etapa de pregătire a fiecărei experiențe i. Astfel, de exemplu, înainte de execuția experienței i = 2, la care valorile turației și vitezei de avans sunt de 2248 rot/min și, respectiv, 171 mm/min (v. Tabele 5.10, 5.11), se programează, prin editare directă, S2248 și F171.

În condițiile de mai sus, la fiecare experiență/ piesă printată i, i = 1, 2, ..., 30, s-au prelucrat, prin frezare cilindrică, succesiv, suprafețele *verticale* obiectiv SV1, SV2 și s-a realizat, în mod implicit, și dimensiunea obiectiv C (v. Fig. 5.9, PA/ SV1, 2; C – FC; Fig. 5.30).



Fig. 5.30. O piesă prelucrată, PA/ SV1, 2; C – FC

În continuare, la fiecare piesă prelucrată i, i = 1, 2, ..., 30: s-au măsurat rugozitatea suprafeței SV1 și distanța C dintre suprafețele SV1, SV2, respectiv, s-au determinat valorile efective medii ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz ai suprafeței SV1, precum și valorile efective medii ale dimensiunii C (v. și § 5.1.1-g, h, j, k și 5.1.3-d).

Astfel, valorile efective determinate ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, precum și ale dimensiunii C din cadrul programului PLA - Frezare cilindrică sunt după cum se prezintă în Tabelul 5.11.

5.3.2. Analize asupra rezultatelor experimentale, funcții de regresie rugozitate și dimensiune privind suprafețe prelucrate în cadrul programului PLA - Frezare cilindrică

(1) Analiză asupra rezultatelor experimentale

În cadrul programului PLA - Frezare cilindrică efectuat (v. § 5.3.1), similar analizei prezentate în § 5.2.2-(1), experiențele cu nr. de ordine i = 1, 2, …, 25 s-au structurat în cinci grupuri, astfel încât, în fiecare grup: viteza de așchiere, V_c, este constantă, și anume, de valoare 56.5, 65.26, 75.4, 87.06 sau 100.5 – în m/min; avansul pe dinte, f_z, este variabil, succesiv, și anume de valori 0.02, 0.0331, 0.0547, 0.0906 și 0.15 - în mm/dinte.

O analiză comparativă a rugozității unor suprafețe verticale printate și rugozității suprafețelor verticale prelucrate prin frezare cilindrică, prin intermediul valorilor efective medii ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, evidențiază influența pozitivă a prelucrării prin așchiere, după cum se prezintă și în Fig. 5.34, respectiv, 5.35.

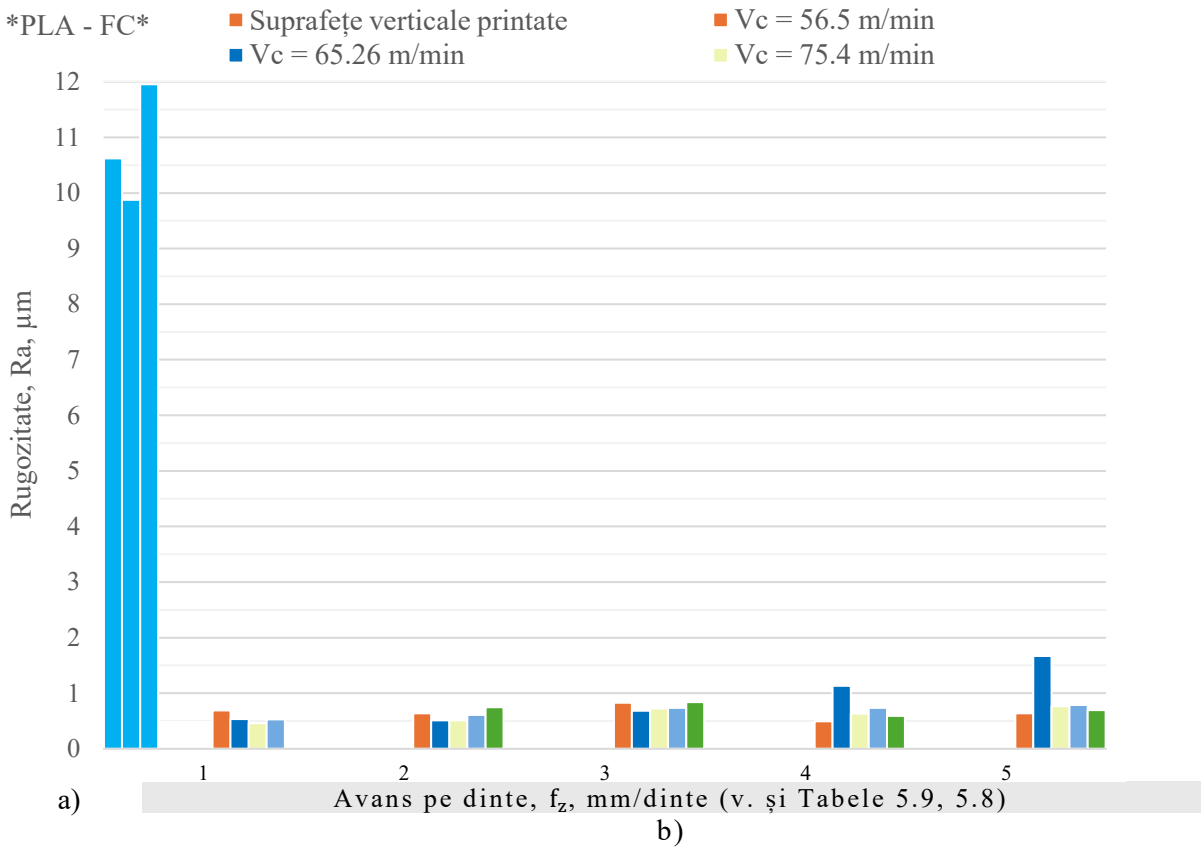


Fig. 5.34. Valori comparative ale rugozității Ra a unor suprafețe verticale: a) printate (v. și Tabel 5.5), b) prelucrate prin frezare cilindrică (v. și Tabel 5.11)

(2.1) Funcții de regresie rugozitate multivariabile

Calculul coeficienților de regresie și analiza de regresie privind funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată obiectiv (5.2) s-au efectuat în raport cu elementele metodologice din § 5.1.3 - e, f. Datele principale se prezintă în Anexă.

O sinteză privind coeficienții de regresie b_j și A_j, funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată (SV1), Ra (f_z, V_c)și Rz (f_z, V_c), indicatorii R^* de estimare a adecvanței modelului funcției de regresie și indicatorii R_j de estimare a semnificației coeficienților de regresie b_j se prezintă în continuare.

Programul PLA - Frezare cilindrică

Rugozitate Ra suprafață prelucrată		Rugozitate Rz suprafață prelucrată	
$b_0 =$ -0.42228065 $b_1 =$ 0.115964972 $b_2 =$ 0.014942892	(5.29)	$b_0 =$ 1.3920374 $b_1 =$ 0.06516512 $b_2 =$ 0.005063467	(5.34)
$A_0 =$ 0.817120701 $A_1 =$ 0.230180111 $A_2 =$ 0.103697822	(5.30)	$A_0 =$ 5.03206958 $A_1 =$ 0.12934694 $A_2 =$ 0.035138477	(5.35)
$Ra = 0.8171 f_z^{0.2301} V_c^{0.1036}$	(5.31)	$Rz = 5.032 f_z^{0.1293} V_c^{0.0351}$	(5.36)
$R^* =$ 0.5437	(5.32)	$R^* =$ 0.8905	(5.37)
$R_0 =$ 17.6468 $R_1 =$ 2.6616 $R_2 =$ 0.0441	(5.33)	$R_0 =$ 332.0268 $R_1 =$ 1.4552 $R_2 =$ 0.0087	(5.38)

(3) Analiză comparativă a unor valori experimentale ale rugozității suprafețelor prelucrate în cadrul programului PLA - Frezare cilindrică

În cadrul programului PLA - Frezare cilindrică, la experiențele i = 1, 2, 3 s-au determinat și parametrii de rugozitate Ra și Rz ai suprafeței plane prelucrate SV2 (v. Fig. 5.9, PA/ SV1, 2; C - FC). Valorile parametrilor Ra și Rz ai celor două suprafețe plane paralele prelucrate SV1 și SV2 se prezintă în Tabelul 5.12.

Se consideră, ca indicator de analiză comparativă, eroarea procentuală (percent error) [83, 84, 85], ΔY%, a valorii experimentale, Y, în raport cu valoarea calculată, Y_{calc}, respectiv,

$$\Delta Y\ \% = 100\ (Y - Y_{calc})/Y_{calc} \text{ în } \%,\ Y = Ra,\ Rz \qquad (5.44)$$

unde, Ra_{calc} și Rz_{calc} se determină prin utilizarea funcției de regresie corespondente (5.31) și, respectiv, (5.36), iar mărimile considerate se determină pentru fiecare i = 1, 2, 3.

Calculul erorilor ΔRa % și ΔRz %, prin aplicarea rel. (5.44) asupra datelor experimentale Ra, Rz analizate (Tabel 5.12) și valorilor corespunzătoare Ra_{calc}, respectiv, Rz_{calc} – determinate prin utilizarea funcției (5.31), respectiv, (5.36), se prezintă în Anexele 1.7 și 1.8, precum și, sintetic, în Tabelul 5.13.

Pe baza analizei comparative a datelor asociate suprafețelor plane SV1 și, respectiv, suprafețelor plane SV2, se constată următoarele:

• la experiențele/ piesele experimentale i = 1, 2, valorile absolute ale erorilor procentuale Δ Ra % și Δ Rz %, asociate corespunzător suprafețelor plane SV1 și, respectiv, suprafețelor plane SV2, diferă până la două ordine de mărime;

• la experiența/ piesa experimentală i = 3, valorile absolute ale erorilor procentuale Δ Ra % și Δ Rz %, asociate corespunzător suprafeței plane SV1 și, respectiv, suprafeței plane SV2, sunt de același ordin de mărime;

• la nivelul grupului de experiențe/ piese experimentale, i = 1, 2 și 3, valorile absolute ale erorilor procentuale Δ Ra % și, respectiv, Δ Rz % asociate corespunzător suprafețelor plane SV1 și, respectiv, suprafețelor plane SV2, sunt variabile în diferite intervale de valori.

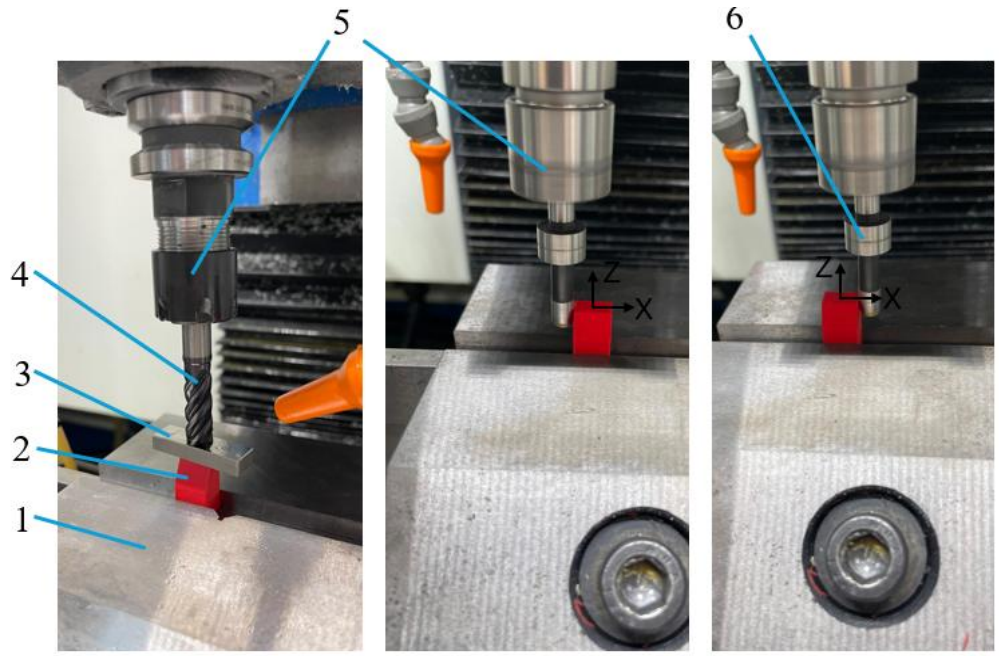
Se apreciază că o cauză posibilă a diferențelor dintre valorile rugozităților comparate o reprezintă, în majoritatea cazurilor, variația structurală a materialului pieselor experimentale.

5.4. Date experimentale, funcții de regresie rugozitate suprafață prelucrată în cadrul programului PLA - Frezare cilindro-frontală

5.4.1. Reglarea și programarea sistemului tehnologic CNC, nivelurile variabilelor independente, prelucrări și rezultate experimentale în programul PLA - Frezare cilindro-frontală

Pentru realizarea prelucrării prin frezare cilindro-frontală necesare (v. Fig. 5.9, PB/ SI – FCF), s-a constituit sistemul tehnologic de prelucrare prin frezare CNC, similar modului de lucru prezentat în § 5.2.1, cu mențiunea că freza cilindro-frontală este T02 – cu raza la vârf de 0,5 mm (v. și § 5.1.1 e – g).

S-a efectuat reglarea la dimensiune a sistemului tehnologic, în plan (X, Y) și pe direcția Z (v. și § 5.2.1, 5.1.1-i,), astfel încât sistemul de coordonate de lucru este asociat piesei de prelucrat, cu originea în punctul de intersecție dintre axa de simetrie a celor patru suprafețe verticale și suprafața orizontală superioară, după cum se prezintă în Fig. 5.39.



1 - Menghină de precizie

2 - Piesă de tip PB

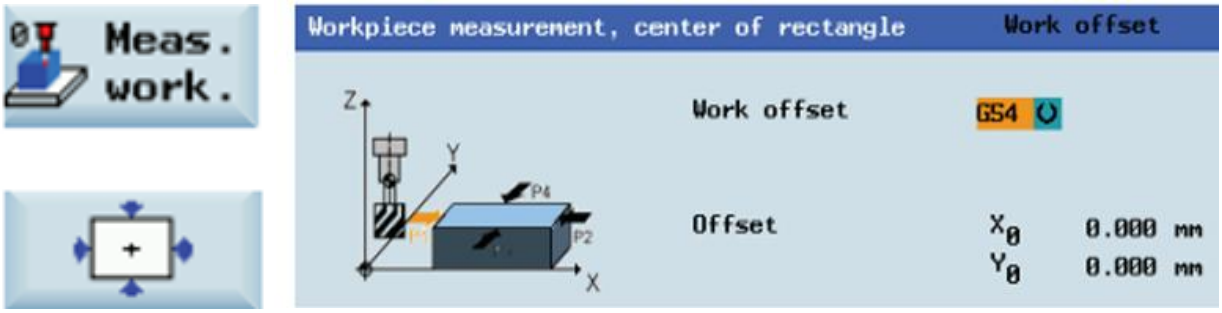
3 - Placă (cală) de reglare

4 - Freză cilindro-frontală T02

5 - Mandrină cu bucșă elastică

6 - Palpator magnetic

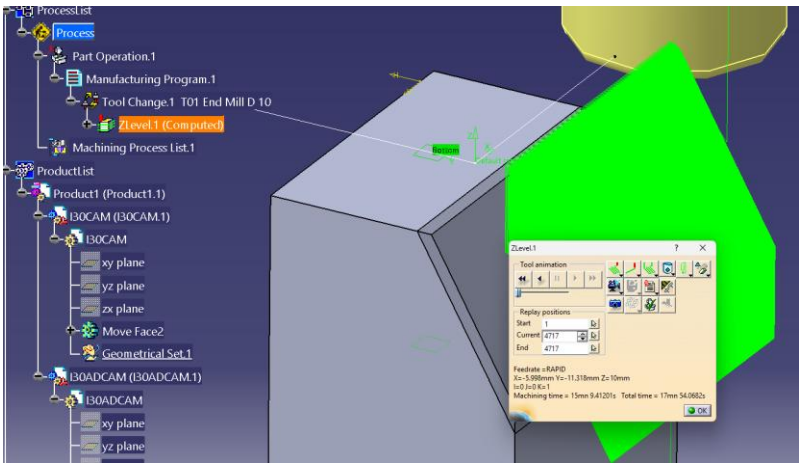
a) b1) b2)



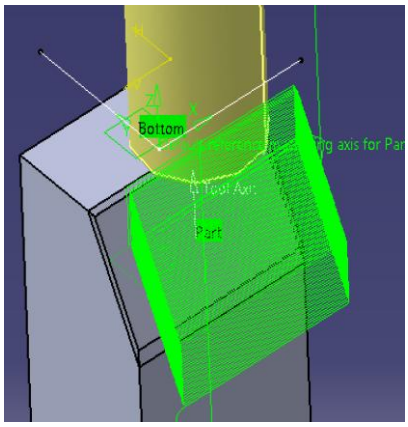
c)

Fig. 5.39. Reglarea la zero a sistemului tehnologic pentru prelucrarea prin frezare cilindro-frontală: a) pe direcția Z; b1) și b2) în plan (X, Y); c) elemente privind setarea originii

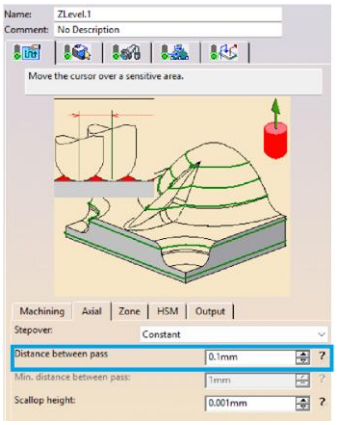
Programul CNC Frezare cilindro-frontală a fost generat în cadrul aplicației Catia V5R21 (Fig. 5.40).



a)



b)



c)

Fig. 5.44-2. Generarea Programului CNC Frezare cilindro-frontală în aplicaţia Catia V5R21:
a) elemente privind interfaţa de programare, b) Simulare traiectorie de prelucrare, c) Comanda ZLevel

Nivelurile constante ale avansului pe dinte, f_z, şi vitezei de aşchiere, V_c, respectiv, valorile corespondente ale turaţiei, n_c, şi vitezei de avans, F, nivelurile variabilei independente - avansul axial de reglare, p, precum şi conţinutul experienţelor s-au determinat în raport cu elementele metodologice din § 5.1.3 - a, c, după cum se prezintă în Tabelele 5.14 şi 5.15. Se menţionează că valorile avansului pe dinte, f_z, şi vitezei de aşchiere, V_c, s-au ales dintre nivelurile de la frezarea cilindrică care au condus la valori relativ reduse ale rugozităţii suprafeţei prelucrate şi timpului de bază.

În condiţiile de mai sus, la fiecare experienţă/ piesă printată i, i = 1, 2, ..., 5, în funcţie de nivelul corespunzător al variabilei independente - avansul axial de reglare p (v. Tabel 5.14), s-a activat Programul CNC Frezare cilindro-frontală, prin interfaţa Centrului de prelucrare CNC şi s-a prelucrat, prin frezare cilindro-frontală, suprafaţa plană înclinată obiectiv (v. şi Fig. 5.9, PB/ SI – FCF; Fig. 5.41).
În continuare, la fiecare suprafaţă prelucrată i, i = 1, 2, ..., 5, s-a măsurat rugozitatea, respectiv, s-au determinat valorile efective ale parametrilor de rugozitate Ra şi Rz (v. şi § 5.1.1-j, 5.1.3-d).

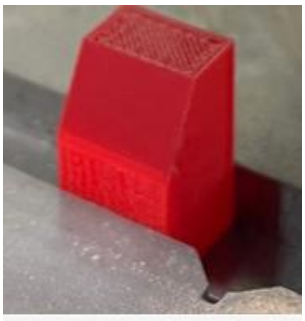
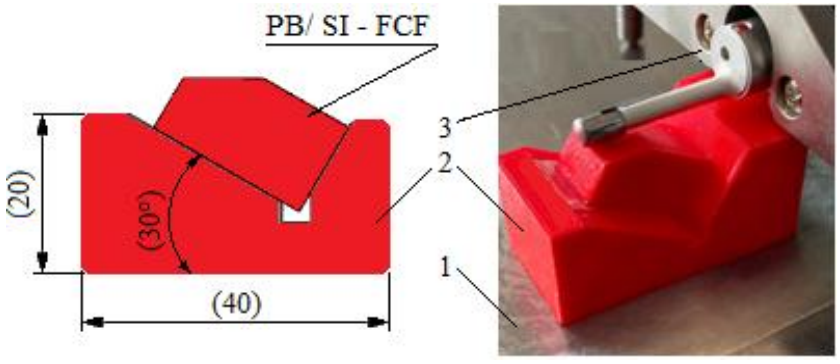


Fig. 5.41. O piesă prelucrată, PB/ SI; FCF

Se menţionează următoarele: prisma de orientare (Fig. 5.46) s-a proiectat şi produs prin printare 3D din PLA şi frezare de finisare; pentru fixarea prismei de orientare pe placa de control şi a piesei de măsurat pe prisma de orientare s-a utilizat bandă dublu adezivă – interpusă între elementele în cauză.



1 - Placă de control

2 - Prismă de orientare

3 - Rugozimetru digital

Fig. 5.42. Elemente ale sistemului de măsurare a rugozităţii suprafeţei înclinate a pieselor PB/ SI - FCF

5.4.2. Analiză asupra rezultatelor experimentale și funcții de regresie privind rugozitatea suprafeței prelucrate în cadrul programului PLA - Frezare cilindro-frontală

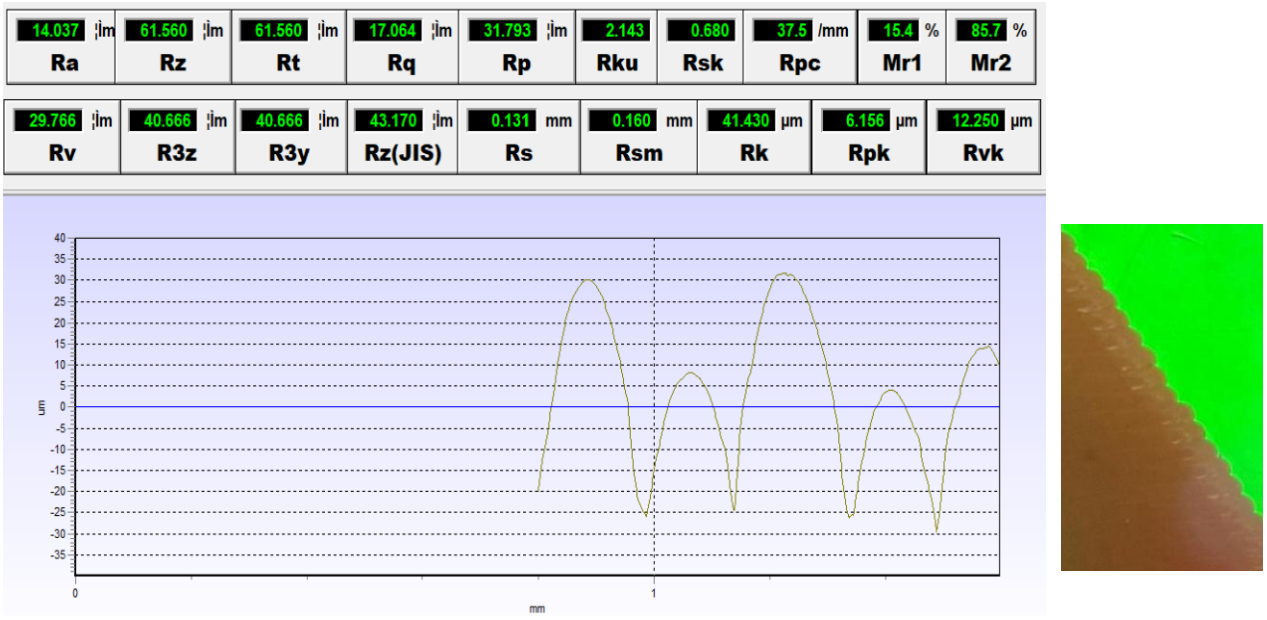
(1) Analiză asupra rezultatelor experimentale

În cadrul programului PLA - Frezare cilindro-frontală efectuat (v. § 5.4.1), similar celor prezentate în § 5.2.2 - (1) și 5.3.2 - (1), s-au determinat dependențele experimentale Ra(p) și Rz(p) (v. Anexa nr. 1.10).

Se constată că parametrii de rugozitate Ra și Rz variază similar avansului axial p, cu excepția cazurilor (p; Ra): (0.01; 1.297), (p; Rz): (0.01; 10.399) și (p; Rz): (0.1; 7.8626) (v. și Tabele 5.15 – 5.19).

Astfel, se apreciază că factorii de influență asupra rugozității suprafețelor plane *înclinate* prelucrate în programul PLA - Frezare cilindro-frontală, care se pot evidenția, în raport cu cele de mai sus, sunt: variația avansului axial p, deoarece, în majoritatea cazurilor, parametrii de rugozitate Ra și Rz variază monoton crescător cu avansul axial p; variația unor caracteristici ale materialului prelucrat - în cazurile în care nu se constată corelația dintre Ra, Rz și p, deoarece alte elemente - parametri geometrici ai sculei așchietoare, caracteristici ale lichidului de răcire-ungere etc. - se consideră de variație nesemnificativă.

O analiză comparativă a rugozității suprafețelor înclinate printate și rugozității suprafețelor înclinate prelucrate prin frezare cilindro-frontală, pe baza valorilor efective medii ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, evidențiază influența pozitivă a prelucrării prin așchiere, după cum se prezintă și în Fig. 5.47 - 5.50 (v. Tabele 5.5, 5.15 și Anexă).



a) b)

Fig. 5.43. Elemente privind rugozitatea unei suprafețe înclinate printate: a) profil de rugozitate și valori ale parametrilor de rugozitate/ Ra = 14.037 µm, Rz = 61.65 µm etc. (v. și Tabel 5.5); b) vizualizare la microscop (v. și Fig. 5.6)

Capitolul 6. Cercetări privind rugozitatea și precizia dimensională la piese din PETG printate 3D și prelucrate prin frezare CNC

Pentru a determina caracteristici propriu-zise de tip rugozitate și precizie dimensională la piese din PETG care să fie analizate comparativ cu rugozitatea și precizia dimensională realizate la piese din PLA, s-au derulat cercetări privind rugozitatea și precizia dimensională la piese din PETG printate 3D și prelucrate prin frezare CNC în condiții similare celor în care s-au realizat cercetările privind prelucrările prin frezare la piese din PLA (prezentate în capitolul 5).

Astfel, în continuare, se vor prezenta unele mențiuni privind elementele de referință din capitolul 5 și, în principal, rezultatele specifice ale cercetărilor efectuate privind rugozitatea și precizia dimensională la piese din PETG printate 3D și prelucrate prin frezare CNC.

6.1. Caracteristici ale proceselor și sistemelor de cercetare pentru determinarea rugozității și a preciziei dimensionale la piese printate 3D din PETG și prelucrate prin frezare CNC

6.1.1. Programe de cercetare, materialul PETG, tipuri de piese, elemente ale proceselor și sistemelor tehnologice de cercetare experimentală

(1) Programe de cercetare

S-au dezvoltat programele de cercetare PETG - Frezare frontală, PETG - Frezare cilindrică și PETG - Frezare cilindro-frontală prin care, în condiții definite:

• se printează 3D din PETG o serie de piese;

• la piesele printate, se prelucrează prin frezare CNC suprafețe plane de *poziții* diferite, și anume, suprafețe plane *orizontale* - prin frezare frontală și suprafețe plane *verticale* - prin frezare cilindrică, respectiv, suprafețe plane *înclinate* - prin frezare cilindro-frontală, după caz;

• se modelează și se analizează parametrii de rugozitate Ra și Rz, precum și precizia dimensională aferente unor suprafețe plane ale pieselor printate și, corespunzător, aferente suprafețelor plane *orizontale*, *verticale*, *înclinate* prelucrate prin frezare CNC.

6.1.2. Evaluare a rugozității și a preciziei dimensionale la piese printate 3D din materialul PETG

La o serie de piese printate 3D din materialul PETG, s-au determinat parametrii efectivi de rugozitate, Ra*, Rz*, ai unor suprafețe orizontale (frontale), verticale (laterale) și înclinate, precum și distanța efectivă, C*, dintre două suprafețe (plane, paralele) verticale [v. și § 6.1.1 – (4)]. Rezultatele se prezintă în Anexă. Parametrii efectivi de rugozitate Ra* și Rz*, precum și valorile efective medii ale dimensiunii C* se prezintă și în Tabelele 6.2 și 6.3.

Se remarcă următoarele (v. Tabelele 6.2, 6.3 și Anexă.):

• la suprafețele *orizontale*, parametrul de rugozitate Ra* are valori efective în clasele de rugozitate N 9 - 10 (Ra 6.3 – 12.5), iar la suprafețele *verticale* și *înclinate*, parametrul Ra* are valori efective în clasele de rugozitate N10 - 11 (Ra 12.5 - 25) [94];

• dimensiunea C* are valori efective în clasa de toleranță (tolerance class) IT12 [95].

6.1.3. Elemente de modelare a rugozității și dimensiunii asociate suprafețelor prelucrate prin frezare frontală, cilindrică și cilindro-frontală la piese printate 3D din materialul PETG

Elementele de modelare a rugozității și dimensiunii asociate suprafețelor prelucrate prin frezare la piese printate 3D din PETG, respectiv,

a) variabilele de proces, dependente și independente, inclusiv elemente privind parametrii regimurilor de așchiere,

b) modelele analitice pentru funcțiile de regresie rugozitate și dimensiune suprafețe prelucrate,

c) nivelurile variabilelor independente și elementele structurale specifice ale experimentelor,

d) valorile efective ale variabilei dependente,

e) calculul coeficienților de regresie,

f) analiza de regresie

sunt după cum se prezintă în § 5.1.3.

6.2. Date experimentale, funcții de regresie rugozitate și dimensiune suprafețe prelucrate în programele de cercetare PETG - Frezare frontală și PETG - Frezare cilindrică

6.2.1. Reglarea și programarea sistemului tehnologic CNC, nivelurile variabilelor independente, prelucrări și rezultatele experimentale în programele de cercetare PETG - Frezare frontală și PETG - Frezare cilindrică

Pentru realizarea prelucrărilor prin frezare frontală și, respectiv, prin frezare cilindrică necesare (v. Fig. 6.1, PA/ SO – FF, SV1, 2; C - FC), s-a constituit și s-a reglat la dimensiune sistemul tehnologic de prelucrare CNC, similar modului de lucru prezentat în § 5.2.1 (v. și 5.1.1-i).

În condițiile de mai sus, la fiecare experiență/ piesă printată i, i = 1, 2, ..., 30, s-au prelucrat, succesiv, suprafețele plane obiectiv *orizontală* SO și *verticale* SV1, SV2, SO - prin frezare frontală, SV1 și SV2 - în raport cu dimensiunea obiectiv C - prin frezare cilindrică (v. Fig. 6.1, PA/ SO – FF, SV1, 2; C – FC; Fig. 6.3).

În continuare, la fiecare piesă prelucrată i, i = 1, 2, ..., 30: s-au măsurat rugozitatea suprafeței SV1 și distanța C dintre suprafețele SV1, SV2, respectiv, s-au determinat valorile efective medii ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz ai suprafeței SV1, precum și valorile efective medii ale dimensiunii C [v. și § 6.1.1 - (4), 6.1.3 - d)].

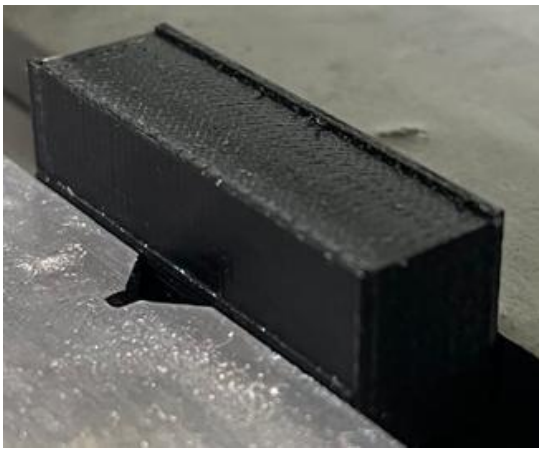


Fig. 6.3. O piesă prelucrată, PA/ SO - FF, SV1, 2; C - FC

Astfel, valorile efective ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, precum și ale dimensiunii C din cadrul programelor PETG - Frezare frontală și PETG - Frezare cilindrică sunt după cum se prezintă în Tabelul 6.5.

6.2.2. Analiză asupra rezultatelor experimentale și funcții de regresie privind rugozitatea suprafeței prelucrate în cadrul programului PETG - Frezare frontală

(2) Funcții de regresie rugozitate suprafață prelucrată multivariabile

Datele principale referitoare la calculul coeficienților de regresie și analiza de regresie (v. și § 6.1.3, 5.1.3 – e, f) privind funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată obiectiv, programul PETG - Frezare frontală, se prezintă în Anexele 2.2 și 2.3.

O sinteză privind coeficienții de regresie b_j și A_j, funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată, Ra (f_z, V_c)și Rz (f_z, V_c), indicatorii R^*de estimare a adecvanței modelului funcției de regresie și indicatorii R_j de estimare a semnificației coeficienților de regresie b_j se prezintă în continuare.

Programul PETG - Frezare frontală

Rugozitate Ra suprafață prelucrată		Rugozitate Rz suprafață prelucrată	
$b_0 =$ 0.893405305		$b_0 =$ 2.7610969	
$b_1 =$ 0.129072259	(6.1)	$b_1 =$ 0.105808318	(6.6)
$b_2 =$ -0.028418347		$b_2 =$ -0.009821479	
$A_0 =$ 12.06063883		$A_0 =$ 39.08306138	
$A_1 =$ 0.256196904	(6.2)	$A_1 =$ 0.210020061	(6.7)
$A_2 =$ -0.197212207		$A_2 =$ -0.068157221	
$Ra = 12.0606 f_z^{0.2561} V_c^{-0.1972}$	(6.3)	$Rz = 39.083 f_z^{0.21} V_c^{-0.0681}$	(6.8)
$R^* =$ 0.19	(6.4)	$R^* =$ 0.1736	(6.9)
$R_0 =$ 53.0818		$R_0 =$ 488.4161	
$R_1 =$ 2.2158	(6.5)	$R_1 =$ 1.4344	(6.10)
$R_2 =$ 0.1074		$R_2 =$ 0.0123	

Deoarece $R^* < 1$ [v. rel. (6.4) și (6.9)] și $R_j > 1$, j = 0, 1, $R_2 < 1$ [v. rel. 6.5) și (6.10)], rezultă că modelul funcțiilor de regresie (6.3) și (6.8) este adecvat ($R^* < 1$) și că, în condițiile tehnologice considerate, avansul pe dinte, precum și alte elemente – caracteristici ale materialului prelucrat, parametri geometrici ai părții active a sculei așchietoare etc. – sunt factori cu influență semnificativă asupra rugozității suprafeței prelucrate ($R_2 > 1$, $R_0 > 1$), iar viteza de așchiere este un factor cu influență mai redusă asupra rugozității suprafeței prelucrate ($R_2 < 1$).

6.2.3. Analize asupra rezultatelor experimentale, funcții de regresie rugozitate și funcție de regresie dimensiune privind suprafețe prelucrate în cadrul programului PETG - Frezare cilindrică

(2.1) Funcții de regresie rugozitate multivariabile

Datele principale referitoare la calculul coeficienților de regresie și analiza de regresie (v. și § 6.1.3, 5.1.3 – e, f) privind funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată obiectiv, programul PETG - Frezare cilindrică, se prezintă în Anexele 2.4 și 2.5.

O sinteză privind coeficienții de regresie b_j și A_j, funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată (SV1), Ra (f_z, V_c)și Rz (f_z, V_c), indicatorii R^*de estimare a adecvanței modelului funcției de regresie și indicatorii R_j de estimare a semnificației coeficienților de regresie b_j se prezintă în continuare.

Programul PETG - Frezare cilindrică

Rugozitate Ra suprafață prelucrată		Rugozitate Rz suprafață prelucrată	
b_0 = -0.473496515		b_0 = 1.214950039	
b_1 = 0.09062813	(6.11)	b_1 = 0.035405115	(6.16)
b_2 = 0.023658248		b_2 = 6.98378E-05	
A_0 = 0.516501079		A_0 = 4.124588437	
A_1 = 0.17988874	(6.12)	A_1 = 0.07027599	(6.17)
A_2 = 0.164178981		A_2 = 0.000484647	
$Ra = 0.5165 f_z^{0.1798} V_c^{0.1641}$	(6.13)	$Ra = 4.1245 f_z^{0.0702} V_c^{0.0004}$	(6.18)
R^* = 3.6490	(6.14)	R^* = 14.721	(6.19)
R_0 = 20.4374		R_0 = 204.8358	
R_1 = 1.4974	(6.15)	R_1 = 0.3478	(6.20)
R_2 = 0.102		R_2 = 1.35363E-06	

Se constată că $R^* > 1$ [v. rel. (6.14) și (6.19], $R_0 > 1$, $R_1 > 1$ sau $R_1 < 1$, $R_2 < 1$ [v. rel. (6.15) și (6.20], respectiv, în condițiile tehnologice considerate: avansul pe dinte este un factor cu influență semnificativă asupra parametrului de rugozitate Ra, dar cu o influență mai redusă asupra parametrului de rugozitate Rz; viteza de așchiere este un factor cu influență mai redusă asupra rugozității suprafeței prelucrate ($R_2 < 1$); alte elemente – caracteristici ale materialului prelucrat, parametri geometrici ai părții active a sculei așchietoare etc. – au influență semnificativă asupra rugozității suprafeței prelucrate ($R_0 > 1$), astfel încât, dintre acestea se pot selecta și alte variabile independente pentru a extinde modelul analitic al funcției de regresie.

6.3. Date experimentale, funcții de regresie rugozitate suprafață prelucrată în cadrul programului PETG - Frezare cilindro-frontală

6.3.1. Reglarea și programarea sistemului tehnologic CNC, nivelurile variabilelor independente, prelucrări și rezultate experimentale în programul PETG - Frezare cilindro-frontală

Pentru realizarea prelucrării prin frezare cilindro-frontală necesare (v. Fig. 6.1, PB/ SI – FCF), s-a constituit și s-a reglat la dimensiune sistemul tehnologic de prelucrare prin frezare CNC, similar modului de lucru prezentat în § 5.4.1, cu mențiunea că freza cilindro-frontală este T02 – cu raza la vârf de 0,5 mm (v. și § 5.2.1, 5.1.1 e – i).

Programul CNC Frezare cilindro-frontală a fost generat în cadrul aplicației Catia V5R21 (Fig. 5.45, Anexă).

Nivelurile constante ale avansului pe dinte, f_z, și vitezei de așchiere, V_c, respectiv, valorile corespondente ale turației, n_c, și vitezei de avans, F, nivelurile variabilei independente - avansul axial de reglare, p, și conținutul experiențelor s-au determinat pe baza elementelor din § 6.1.3 - a, c (§ 5.1.3 - a, c), precum și din § 5.4.1, după cum se prezintă în Tabelul 6.8.

În condițiile de mai sus, la fiecare experiență/ piesă printată i, i = 1, 2, ..., 5, în funcție de nivelul corespunzător al variabilei independente - avansul axial de reglare p (v. Tabelul 6.8), s-a activat Programul CNC Frezare cilindro-frontală, prin interfața Centrului de prelucrare CNC și s-a prelucrat, prin frezare cilindro-frontală, suprafața plană *înclinată* obiectiv (v. și Fig. 6.1, PB/ SI - FCF; Fig. 6.4).

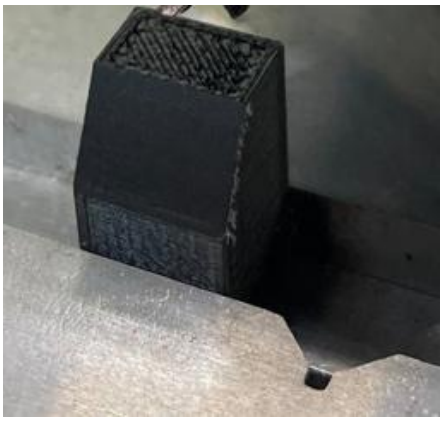


Fig. 6.4. O piesă prelucrată, PB/ SI – FCF

În continuare, la fiecare suprafață prelucrată i, i = 1, 2, ..., 5, s-a măsurat rugozitatea, respectiv, s-au determinat valorile efective ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, similar modului de lucru prezentat în § 5.4.1.

Astfel, valorile efective ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz din cadrul programului PETG - Frezare cilindro-frontală sunt după cum se prezintă în Tabelul 6.8.

Tabelul 6.8. Programul PETG - Frezare cilindro-frontală: nivelurile variabilelor independente și de reglare, conținutul experiențelor și valorile efective ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz

Nr. exp., i	f_z, mm/dinte; V_c, m/min (n_c, rot/min; F, mm/min)	p, mm	Suprafață plană *înclinată*							
			Valorile efective ale parametrilor de rugozitate determinate pe baza măsurării rugozității, µm						Valorile efective medii, µm	
			Ra 1	Rz 1	Ra 2	Rz 2	Ra 3	Rz 3	Ra	Rz
1	0.0331; 87.0551 (3463; 573)	0.01	0.879	6.082	0.928	8.014	0.851	6.082	0.886	6.726
2		0.0177	0.937	5.366	0.977	6.44	1.045	7.346	0.9863	6.384
3		0.0316	1.495	9.063	1.114	5.533	1.518	6.726	1.3756	7.1073
4		0.0562	1.098	7.298	0.95	6.654	0.984	6.13	1.0106	6.694
5		0.10	1.188	6.583	1.437	7.942	1.238	6.535	1.2876	7.02

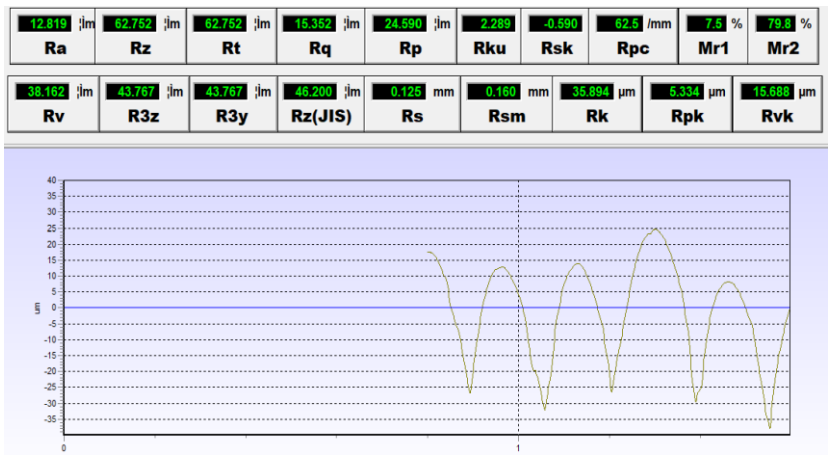
6.3.2. Analiză asupra rezultatelor experimentale și funcții de regresie privind rugozitatea suprafeței prelucrate în cadrul programului PETG - Frezare cilindro-frontală

(1) Analiză asupra rezultatelor experimentale

În cadrul programului PETG - Frezare cilindro-frontală efectuat (v. § 6.3.1), similar celor prezentate în § 5.2.2 - (1) și 5.3.2 - (1), s-au determinat dependențele experimentale Ra(p) și Rz(p) (v. Anexa nr. nr. 2.7). Se constată că parametrii de rugozitate Ra și Rz variază similar avansului axial p, cu excepția cazurilor (p; Ra): (0.0316; 1.3756), (p; Rz): (0.01; 6.726) și (p; Rz): (0.0316; 7.1073) (v. și Tabele 6.8 - 6.12).

Se apreciază că, în majoritatea cazurilor, parametrii de rugozitate Ra și Rz variază monoton crescător cu avansul axial p, iar în cazurile în care nu se constată această relație, cauza principală este variația unor caracteristici ale materialului PETG prelucrat.

O analiză comparativă a rugozității suprafețelor înclinate printate și rugozității suprafețelor înclinate prelucrate prin frezare cilindro-frontală, pe baza valorilor efective medii ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, evidențiază influența pozitivă a prelucrării prin așchiere, după cum se prezintă și în Fig. 6.4 – 6.11 (v. și Tabele 6.2, 6.8, Anexă).

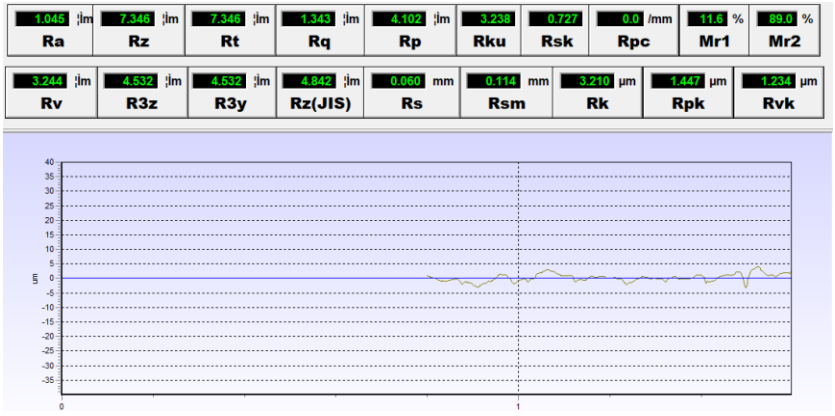


a)

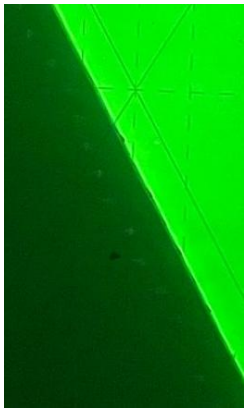


b)

Fig. 6.4. Elemente privind rugozitatea unei suprafeţe înclinate printate: a) profil de rugozitate și valori ale parametrilor de rugozitate/ Ra = 12.819 µm, Rz = 62.752 µm etc. (v. și Tabel 6.2); b) vizualizare la microscop (v. și Fig. 5.6)



a)



b)

Fig. 6.5. Elemente privind rugozitatea unei suprafeţe înclinate prelucrate prin frezare cilindro-frontală: a) profil de rugozitate și valori ale parametrilor de rugozitate/ Ra = 1.045 µm, Rz = 7.345 µm etc. (v. și Tabel 6.8); b) vizualizare la microscop (v. și Fig. 5.6)

(2) Funcții de regresie rugozitate suprafață prelucrată

În raport cu tendința evoluției valorilor experimentale ale parametrilor Ra și Rz ai suprafețelor prelucrate prin frezare cilindro-frontală în funcție de avansul axial de reglare (v. § 6.3.2 – (1)), se analizează și se determină funcțiile rugozitate suprafață (plană înclinată) Ra și Rz ca funcții de regresie (5.7) pentru care coeficientul de determinare $\mathbf{R^2}$ și rezidualele sunt de valori acceptabile [v. și § 6.1.3 -b), 5.1.3 - (b2)].

În acest scop, se determină variante ale funcțiilor de regresie $\mathrm{Ra}(\mathrm{p})$ și $\mathrm{Rz}(\mathrm{p})$, de forma (5.7), pe baza unor perechi de valori/ coordonate $(\mathrm{p}, \mathrm{Ra})_i$ și, respectiv, $(\mathrm{p}, \mathrm{Rz})_i$ dintre cele experimentale și se analizează, în fiecare caz, valoarea coeficientului de determinare R^2 și valorile erorii relative $\Delta\mathrm{Y}\%$ (rel. 5.45). Dintre variantele de funcții de regresie $\mathrm{Ra}(\mathrm{p})$ și, respectiv, $\mathrm{Rz}(\mathrm{p})$ astfel determinate, se selectează varianta $\mathrm{Ra}(\mathrm{p})$ și, respectiv, varianta $\mathrm{Rz}(\mathrm{p})$ pentru care coeficientul de determinare R^2 și erorile relative asociate corespunzător sunt de valori acceptabile.

Analiza considerată evidențiază faptul că, în grupul celor cinci experiențe/ piese experimentale, $\mathrm{i} = \overline{1,5}$ (v. Tabele 6.9, 6.11), precum și în alte grupuri de experiențe (v. Anexă), unele valori ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, respectiv, valorile coeficientului de determinare R^2 și ale unor erori relative sunt necorespunzătoare. Se apreciază că o cauză posibilă o reprezintă, în majoritatea cazurilor, variația structurală a materialului pieselor experimentale.

Astfel, în raport cu cele de mai sus, se apreciază că funcțiile de regresie rugozitate suprafață prelucrată (plană înclinată) Ra și Rz adecvate (v. Tabele 6.10 și 6.12) sunt:

$$\mathrm{Ra} = 1.6417\mathrm{p}^{0.1341} \tag{6.26}$$

$$\mathrm{Rz} = 7.8776\mathrm{p}^{0.053} \tag{6.27}$$

Capitolul 7. Cercetări privind dezvoltarea de modele tehnologice din PLA pentru fabricarea unor matrițe din silicon aplicate la turnarea de produse din rășină poliuretanică

Matrițele din silicon sunt dezvoltate pentru a produce garnituri din cauciuc, implanturi medicale din PMMA (polimetilmetacrilat), obiecte decorative din rășini, dulciuri etc. (v. și § 1.2, 101]).

Cercetările privind dezvoltarea de modele tehnologice din PLA pentru fabricarea unor matrițe din silicon aplicate la turnarea de piese din rășină poliuretanică s-au desfășurat după cum urmează.

7.1. Elemente definitorii și etape - cadru ale cercetărilor

Se definesc două modele tehnologice MT1 și MT2 care participă la fabricarea, prin turnare, a unor matrițe din silicon, MS1 și, respectiv, MS2; matrițele MS1 și MS2 se utilizează pentru fabricarea din rășină poliuretanică, prin turnare, a produselor P1 și, respectiv, P2.

Relațiile care decurg din determinările de mai sus se pot exprima sub forma:

$$MT1 \Rightarrow MS1,\ MS1 \Rightarrow P1;\ MT2 \Rightarrow MS2,\ MS2 \Rightarrow P2 \qquad (7.1)$$

Cercetările de față vizează, în principal, dezvoltarea unor modele tehnologice din PLA, MT1 și MT2, evaluarea influenței rugozității și preciziei dimensionale ale modelelor MT1 și MT2 la fabricarea matrițelor din silicon MS1 și, respectiv, MS2, pe baza analizei caracteristicilor produselor P1 și, respectiv, P2 realizate din rășină poliuretanică, prin turnare, în matrițele de silicon considerate (Fig. 7.1).

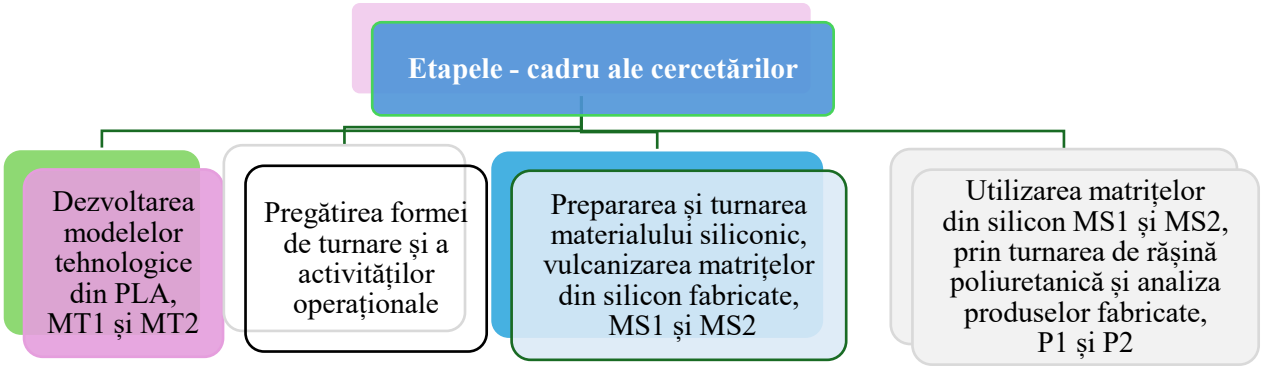


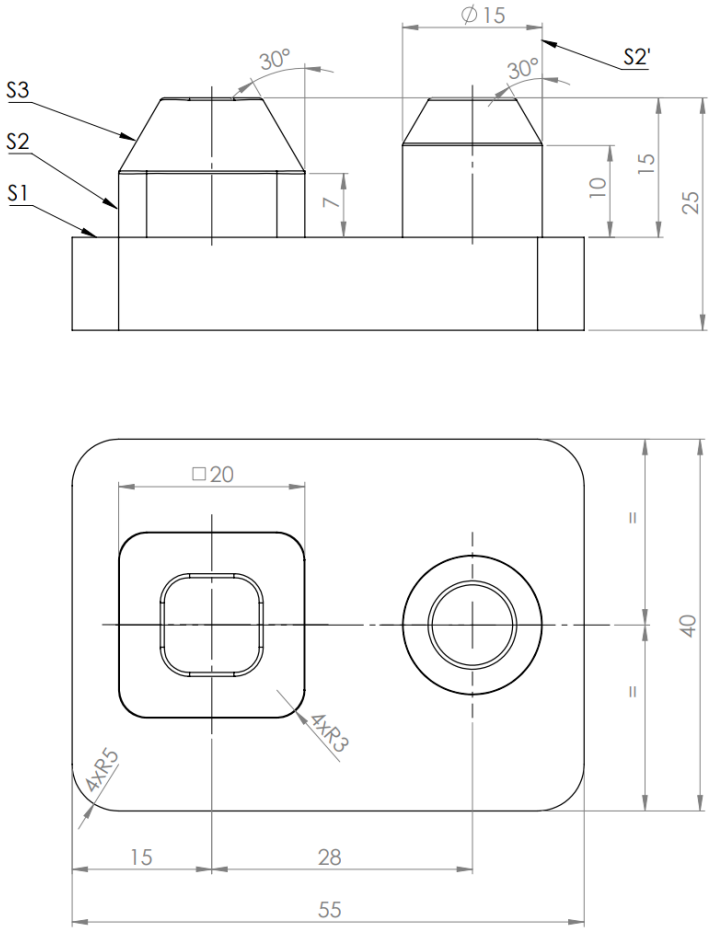
Fig. 7.1. Etapele - cadru ale cercetărilor

7.2. Dezvoltarea unor modele tehnologice din PLA

(a) Proiectarea modelelor tehnologice

Modelele tehnologice MT1 și MT2 s-au proiectat prin intermediul aplicației SolidWorks, astfel încât:

- materialul constitutiv este PLA - prezentat în § 5.1.1 - b, cu particularitatea că acesta este de culoare roșie pentru MT1, respectiv, de culoare verde pentru MT2;
- suprafețele componente sunt de forme, dimensiuni și poziții nominale - prezentate în Fig. 7.2;
- modelul tehnologic MT1 se fabrică prin printare 3D;
- modelul tehnologic MT2 se fabrică prin printare 3D și frezare CNC a suprafețelor principale.



MT1: fabricare prin printare 3D; MT2: fabricare prin printare 3D și prin frezare CNC a suprafețelor S1, S2, S2′, S3 – corespunzător unui adaos total de prelucrare de 0,5 mm

Fig. 7.2. Caracteristici geometrice prescrise modelelor tehnologice MT1 și MT2

(c) Prelucrarea prin frezare CNC a suprafețelor principale ale modelului tehnologic MT2

Centrul de prelucrare CNC, frezele cilindro-frontale, lichidul de răcire – ungere, dispozitivele de orientare și fixare, precum și constituirea sistemului tehnologic de prelucrare prin frezare CNC sunt după cum se prezintă în § 5.1.1 d – g și 5.2.1.

Programul CNC Frezare a fost generat în cadrul aplicației Catia V5R21 (Fig. 7.3 – 7.5), cu următoarele mențiuni:

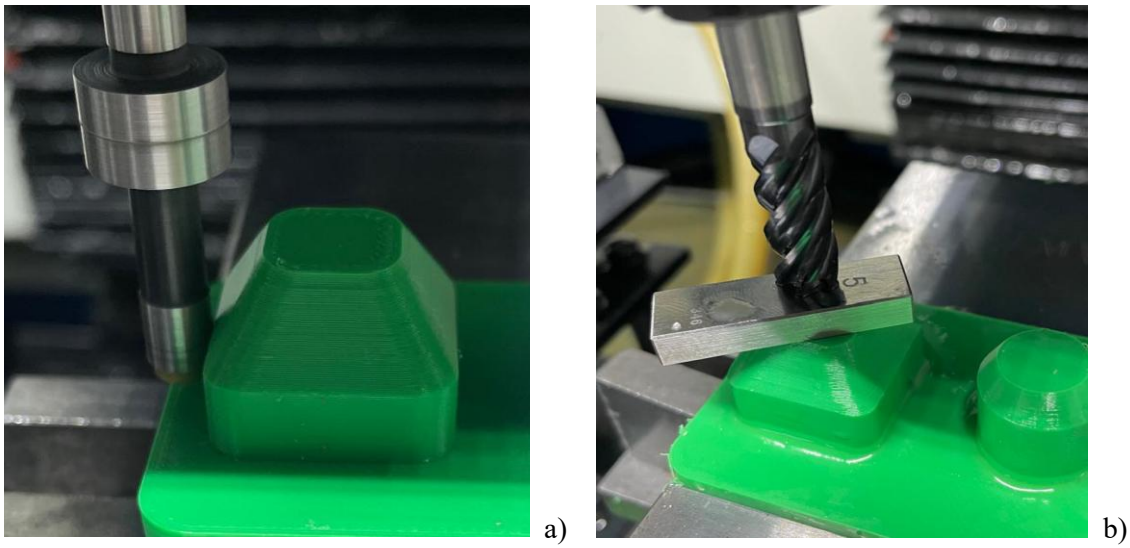
• au fost utilizate două origini ale sistemelor de coordonate, simetrice față de cele patru suprafețe plane S2 (Fig. 7.3);

• corespunzător fiecărei suprafețe elementare, adaosul total de prelucrare, cu valoarea de 0.5 mm, a fost repartizat: 0.3 mm - fazei de degroșare/ o trecere, respectiv, 0.2 mm – fazei de finisare/ o trecere;

• în fazele din *Part Operation.3* a fost utilizată freza cilindro-frontală T01, iar în fazele din *Part Operation.2* - freza cilindro-frontală T02, cu intrare-ieșire în arc de cerc (interpolare circulară).

S-a efectuat reglarea la dimensiune a sistemului tehnologic (v. și § 5.1.1 - i, 5.2.1, 5.4.1/ Fig. 5.44), astfel încât sistemul de coordonate de lucru OXYZ este asociat piesei de prelucrat, cu originea O în punctul de intersecție dintre axa de simetrie a celor patru suprafețe plane verticale S2 și suprafața

plană orizontală S4, practic: reglare în plan orizontal (X, Y) - prin utilizarea unui palpator magnetic și centrare în patru puncte (Fig 7.5 – a); reglare pe direcție Z - prin utilizarea unei cale de contact între suprafața frontală a sculei și suprafața orizontală S4 printată (prima origine), respectiv, prelucrată prin frezare (a doua origine) (Fig 7.5 – b).



a) b)

Fig. 7.5. Reglarea la zero a sistemului tehnologic: a) în plan (X, Y), b) pe direcția Z

(d) Caracteristici geometrice efective ale modelelor tehnologice fabricate MT1 și MT2

Modelul tehnologic MT1, fabricat din PLA prin printare 3D, și modelul tehnologic MT2, fabricat din PLA prin printare 3D și prin frezare CNC a suprafețelor principale (v. cele de mai sus), au fost supuse unor operații de măsurare a rugozității și a unor dimensiuni principale (v. și § 5.1.1 - g, j, k, 5.1.3 - d; Fig. 5.4.6; Fig. 7.6).

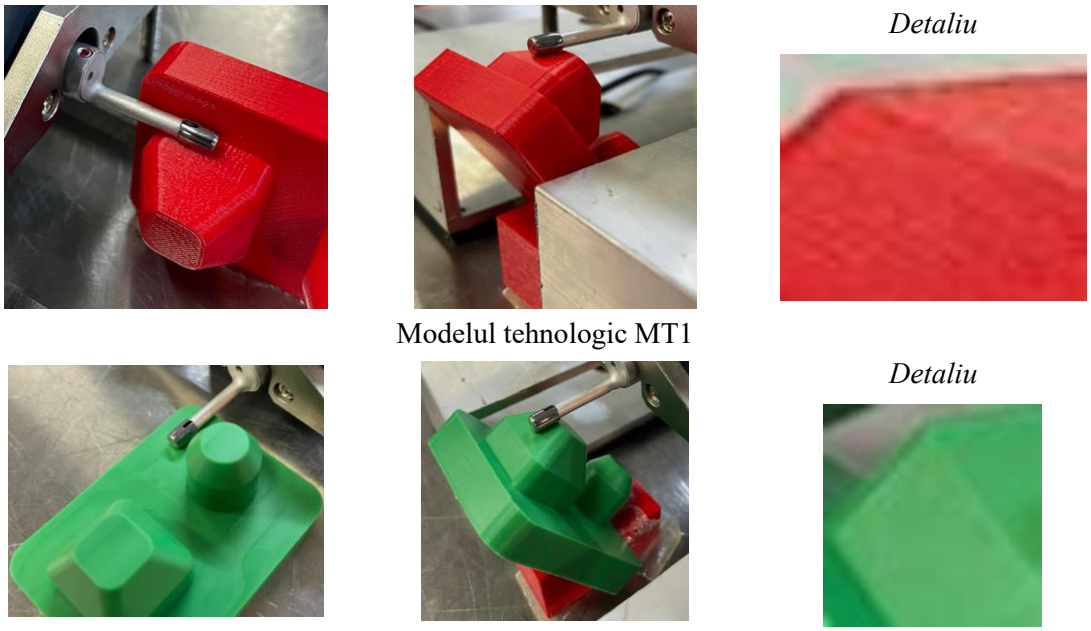


Fig. 7.6 Măsurarea rugozităţii la: modelele tehnologice MT1 (după printare), MT2 (după frezare)

Valorile efective determinate ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, precum și ale dimensiunilor măsurate sunt după cum se prezintă în Tabelele7.1 și 7.2.

Se evidențiază următoarele (v. Tabelele 7.1, 7.2):

• la modelul tehnologic MT1, parametrul de rugozitate Ra are valori efective la suprafețele S1, S2 și S3, în clasele de rugozitate N9 (Ra 6.3), N10 (Ra 12.5) și, respectiv, N11 (Ra 25) [94], iar dimensiunile l și d au valori efective în clasele de toleranță (tolerance classes) IT 15 și, respectiv, IT 16 [95];

• la modelul tehnologic MT2, parametrul de rugozitate Ra are valori efective la suprafețe S1 și S2, S3, în clasele de rugozitate N7 (Ra 1.6), respectiv, N8 (Ra 3,2) [94], iar dimensiunile l și d au valori efective în clasele de toleranță IT 7 și, respectiv, IT 8 [95].

Se constată că toate caracteristicile geometrice Ra, Rz, l și d evaluate ale modelului tehnologic MT2 sunt de precizie superioară preciziei caracteristicilor corespondente ale modelului tehnologic MT1.

7.3. Fabricarea unor matrițe din silicon

a. Componente și caracteristici principale ale materialului siliconic

Materialul siliconic, utilizat pentru fabricarea matrițelor din silicon MS1 și MS2, este un amestec bicomponent, dintre Silicon de adiție RTV ZA-22 și un Catalizator ZA-22 (agent de întărire), cu principalele caracteristici, indicate de producător [88], după cum se prezintă în Tabelul 7.3.

Tabelul 7.3. Caracteristici ale materialului siliconic [88]

(1) Tip silicon (culoare), (2) Agent de întărire, (3) Raport de mixare mase componente, (4) Vâscozitate mixtură (5) Densitate, (6) Timp de mixare componente; Timp de lucru/ turnare (la 23°); Timp de vulcanizare - demulare (la 23°)					(7) Duritate Shore A (după 24 ore), (8) Variație dimensională (după 24 ore), (9) Reproducere detalii, (10) Alungirea la rupere, (11) Tensiunea de rupere, (12) Rezistența la rupere (tear strength)					
(1); (2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Silicon de adiție RTV ZA-22 (albastru); Catalizator ZA-22	1:1	cP	g/cm^3	min	Sh A	%	µm	%	N/mm^2	N/mm
		4000 ± 300	1,15	2; 14 - 17; 90 - 120	21 ± 2	- 0,05	2	380 ± 20	4 ± 0.2	20 ± 1

b. Pregătirea formelor de turnare, prepararea și turnarea materialului siliconic, vulcanizarea și demularea matrițelor fabricate MS1 și MS2

Se pregătesc formele de turnare, prin poziționarea și fixarea cu bandă dublu adezivă a modelelor tehnologice MT1 și MT2, fiecare într-un pahar gradat (Fig. 7.7 - a); se produce materialul siliconic necesar, prin mixarea a 200 ml de silicon și 200 ml de catalizator (Fig. 7.7 - b), într-un pahar gradat; se toarnă materialul siliconic în forme (Fig. 7.7 - c).


a)


b)


c)

Fig. 7.7. Elemente privind fabricarea matrițelor din silicon: a) una dintre formele de turnare, b) silicon și catalizator, c) turnarea materialului siliconic în forme și vulcanizarea matrițelor produse

Timpul de vulcanizare (întărire) a matrițelor a fost de aprox. 2,5 ore, la temperatura ambientală. În final, s-a efectuat (manual) demularea matrițelor din formele de turnare (Fig. 7.8).

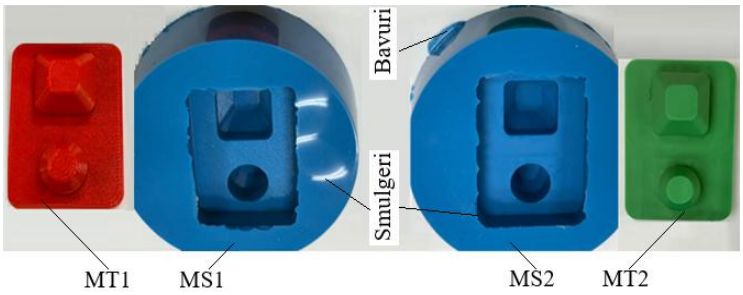


Fig. 7:8. Matrițele fabricate și modelele, după demulare: MS1, MT1; MS2, MT2

Se menționează următoarele:

• în zone de contact neuniform dintre material siliconic și elemente ale formei de turnare - perete pahar și model -, s-au format bavuri în cadrul fiecărei matrițe, iar îndepărtarea manuală a unor bavuri a condus la smulgeri de material (v. Fig. 7.8);

• pentru a se asigura încheierea procesului de întărire/ vulcanizare, respectiv, stabilizarea caracteristicilor, matrițele din silicon fabricate, MS1 și MS2, au fost utilizate după 12 ore de la demulare.

7.4. Fabricarea unor piese din rășină poliuretanică prin utilizarea matrițelor din silicon produse și analize asupra rezultatelor experimentale

a) Componente și caracteristici principale ale rășinii poliuretanice

În general, rășina poliuretanică este un material polimeric constituit din mai multe componente.

Pentru cercetarea de față, s-a selectat și utilizat o rășină poliuretanică de tip Multicast 1, bicomponentă, cu principalele caracteristici, indicate de producător [89], după cum se prezintă în Tabelul 7.4.

Tabelul 7.4. Caracteristici ale rășinii poliuretanice Multicast 1 [89]

(1) Tip rășină (culoare), (2) Agent de întărire, (3) Raport de mixare mase componente, (4) Vâscozitate mixtură, (5) Timp de lucru/ turnare; Timp de întărire- demulare (6) Duritate Shore D				
(1); (2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Multicast 1 (alb - gălbuie); Catalizator ISO 2	1:1	mPa.s	min	Sh D
		55 - [35/75]	3 - 6; 75	75

b) Prepararea și turnarea rășinii poliuretanice, întărirea și demularea pieselor fabricate P1, P2

Se mixează rășina Multicast 1 cu agentul de întărire Catalizator ISO 2, în părți masice egale, care este un proces chimic exoterm; se toarnă rășina poliuretanică realizată în matrițele de silicon MS1 și MS2 (Fig. 7.9-1).



Fig. 7.9-1. Turnarea pieselor din rășină poliuretanică P1 și P2

Piesele turnate, P1 și, respectiv, P2 au atins temperatura ambientală cu 10 - 15 min înainte de finalizarea procesului de întărire; timpul de întărire a fost de 80 min. În final, piesele turnate P1 și P2 au fost demulate, manual, din matrițe (Fig. 7.9).

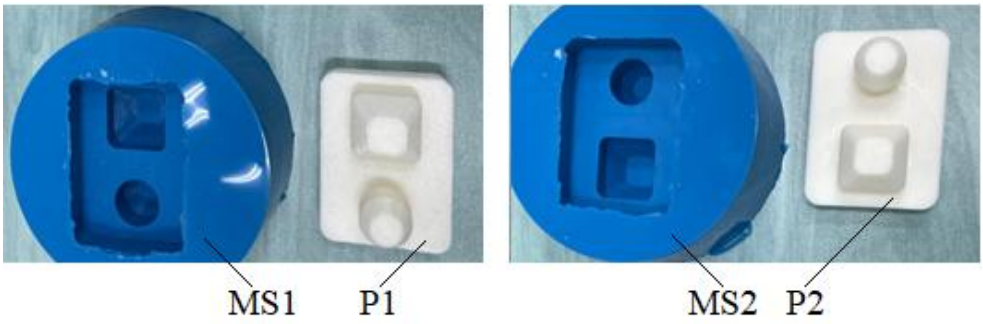


Fig. 7.9-2. Matrițele din silicon și piesele produse, după demulare: MS1, P1; MS2, P2

c) Caracteristici geometrice efective ale pieselor fabricate P1 și P2

Piesele fabricate, P1 și P2, au fost supuse unor operații de măsurare a rugozității suprafețelor S1, S2, S3 și a dimensiunilor l și d (v. și § 5.1.1 - g, j, k, 5.1.3 - d; Fig. 5.4.6; Fig. 7.10).

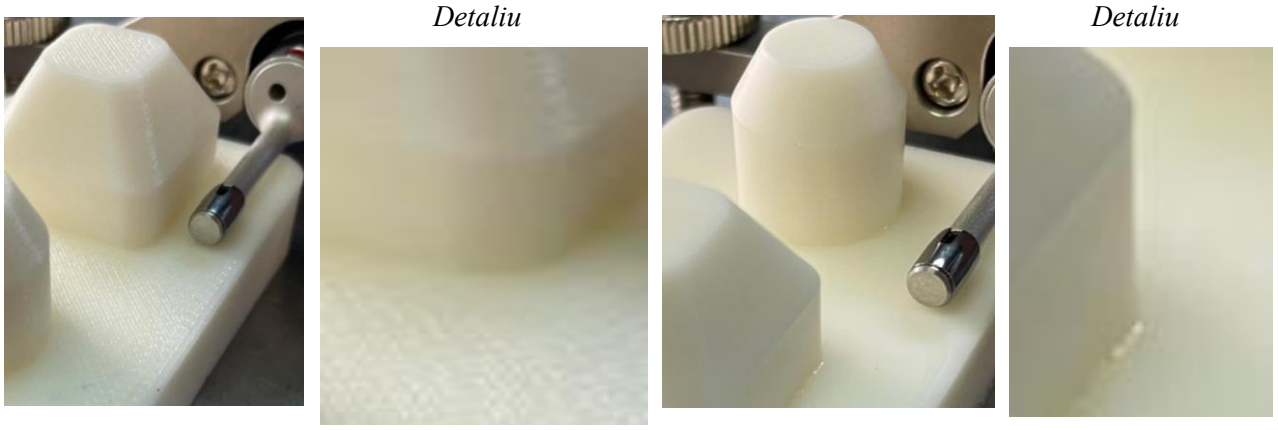


Fig. 7.10. Măsurarea rugozității suprafețelor principale ale pieselor fabricate P1 și P2

Valorile efective determinate ale parametrilor de rugozitate Ra și Rz, precum și ale dimensiunilor l și d sunt după cum se prezintă în Tabelele7.5 și 7.6.

Capitolul 8. Cercetări privind analiza cu elemente finite, fabricarea și testarea unor matrițe de îndoire la rece de precizie din PLA și PETG

Cercetările privind analiza cu elemente finite, fabricarea și testarea unor matrițe de îndoire la rece din PLA și PETG, care includ și elemente publicate ale autorului [90], sunt după cum urmează.

8.1. Elemente definitorii și etape - cadru ale cercetărilor

Schema și matrița de îndoire la rece în V de precizie/ calibrare

Schema de îndoire la rece se consideră în V de precizie/ calibrare, astfel încât, caracteristicile geometrice definitorii corespondente ale poansonului, plăcii active și piesei obiectiv, Pg, sunt egale, și anume unghiurile la vârf, de 90°, razele de racordare interioare, R, și razele de racordare exterioare, R + g, iar grosimea și lățimea semifabricatului sunt egale cu grosimea, g, și, respectiv, lățimea, B, ale piesei Pg, după cum se prezintă în Fig. 8.1 (v. și fig.8.2).

Matrița de îndoire la rece în V de precizie/ calibrare, MIV, este constituită din elementele active, respectiv, poansonul și placa activă.

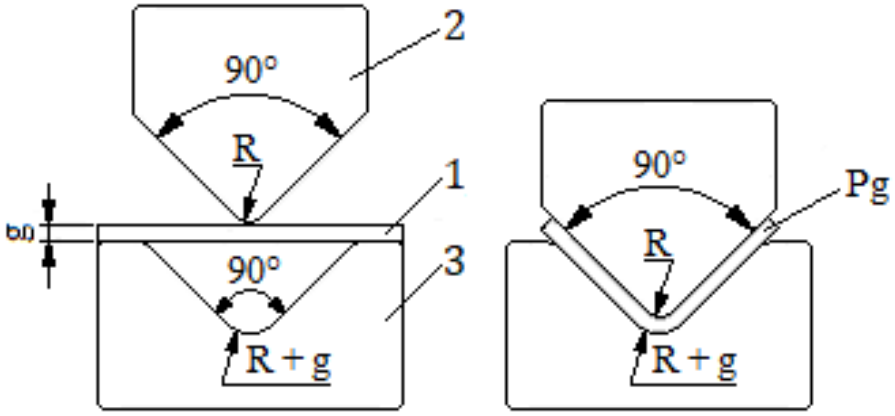


Fig. 8.1. Schema de îndoire la rece în V de precizie/ calibrare:
1/ Pg - Semifabricat/ Piesă obiectiv, 2 – Poanson, 3 – Placă activă

Variabile de proces și modelul structural de analiză

Se consideră drept variabile de proces independente:

• grosimea, g, a semifabricatului/ piesei Pg, g: 0.5, 1, 2, 3 mm;

• lățimea, B, a semifabricatului/ piesei Pg, B: 15, 20 mm;

• raza interioară, R, a piesei Pg, R: 2.5 mm, pentru g: 0.5, 1 mm; R: 3 mm, pentru g: 2 mm; R: 4 mm, pentru g: 3 mm;

• materialul poansonului și plăcii active, același la ambele elemente, respectiv, PLA și PETG;

• cursa de lucru, h, a poansonului, h: 12.75, 12.55, 11.93, 11.1 mm, corespunzător pentru g: 0.5, 1, 2, respectiv, 3 mm;

Drept variabilă(e) de proces dependentă(e) se consideră, după caz: forța de îndoire/ deformare plastică, F, în N, sau tensiunea σ, în MPa, sau deformația specifică, ε, în % etc.

8.2. Determinarea proprietăților la tracțiune efective ale materialelor PLA, PETG și Al

Proprietățile la tracțiune efective ale materialelor PLA, PETG și Al s-au determinat în condițiile reglementate prin ISO 527, după cum urmează.

Epruvetele Epruv-PLA și Epruv-PETG, cu dimensiunile din Fig. 8.4, au fost fabricate prin printare 3D. Imprimanta 3D, parametrii de printare și celelalte condiții de lucru au fost după cum se prezintă în § 5.1.1 - d și, respectiv, § 6.1.1 - (4). Epruvetele Epruv-Al, cu dimensiunile de 250 x 15 x 2 mm, au fost produse prin debitare și debavurare din platbandă.

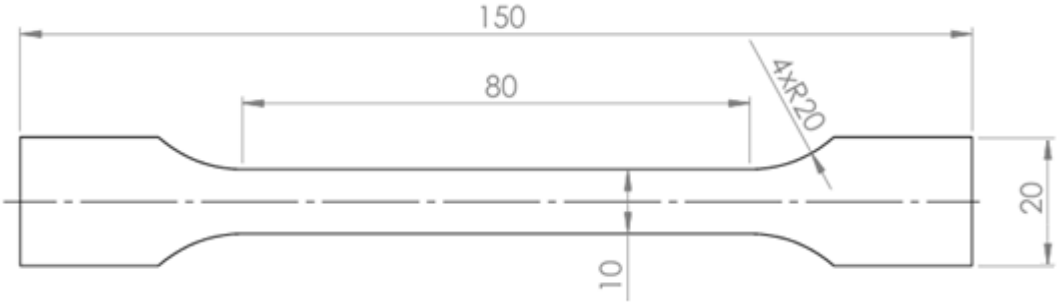
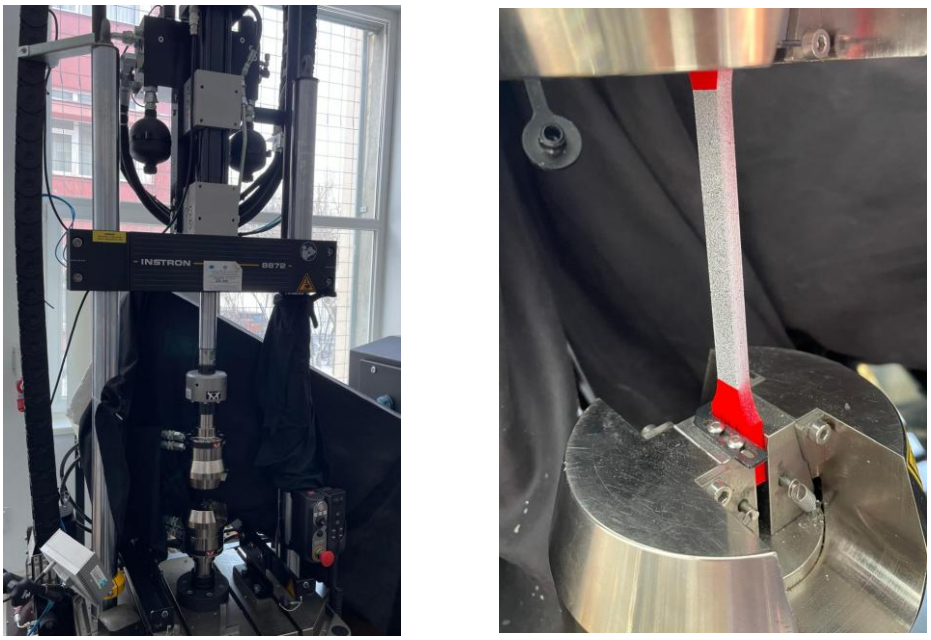


Fig. 8.4. Dimensiunile epruvetelor Epruv-PLA și Epruv-PETG [8ISO 527]

Toate epruvetele au fost pregătite prin aplicarea pe suprafețele active a unui strat de vopsea albă cu puncte negre (v. Fig. 8.5-b), în vederea înregistrării câmpului de deformații prin metoda corelării digitale a imaginilor (DIC).

Încercările au fost realizate pe o mașină de încercare universală electrohidraulică INSTRON 8872 (Fig. 8.5), echipată cu un dispozitiv Dantec Dynamics Q400 (EduDIC System) de înregistrare a deformațiilor specifice, prin metoda corelării digitale a imaginilor (DIC).



a) b)

Fig. 8.5. Elemente privind încercarea la tracțiune a epruvetelor din PLA, PETG și Al pe mașina de încercare universală electrohidraulică INSTRON 8872:
a) vedere a zonei de lucru, b) detalii privind orientarea și fixarea epruvetei

8.3. Analiza cu elemente finite

Analiza cu elemente finite (Finite Element Analysis), FEA, de predicție și interpretare a datelor, bazată pe calcule cu metoda elementelor finite (Finite Element Method), FEM, privind procesul de solicitare - deformare la prelucrarea prin îndoire la rece în V de precizie cu matrițe din PLA sau PETG a unor piese din Al s-a desfășurat după cum urmează.

În vederea simulării procesului de îndoire la rece în V de precizie, pentru cele două materiale – PLA și PETG – ale matriței MIV și patru variante ale grosimii piesei Pg - Pg0.5, Pg1, Pg2, Pg3 (v. rel, 8.1) - au fost concepute opt simulări statice.

Se prezintă simplificările de geometrie, modelele de material, contactele dintre elementele care interacționează, discretizarea, condițiile la limită și parametrii de rulare a simulării.

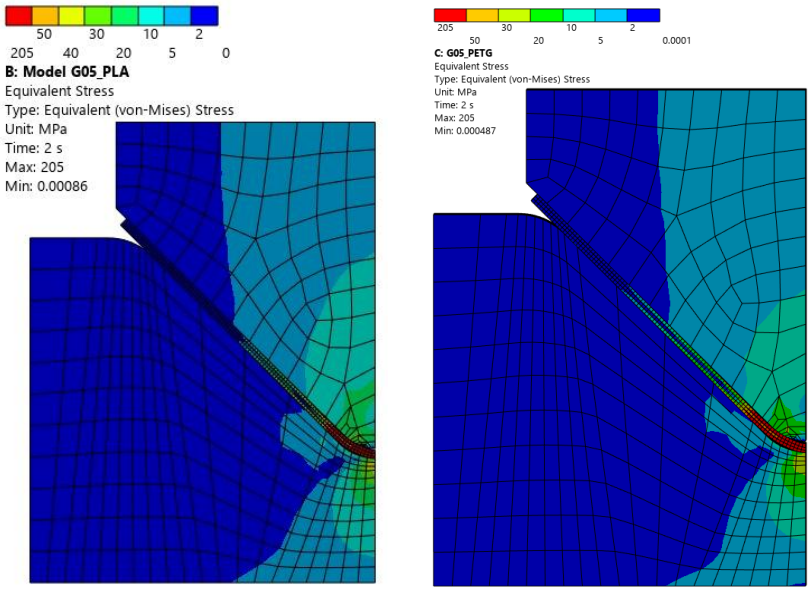
Simularea celor opt cazuri de geometrie/ material a generat, pentru fiecare, o hartă de distribuție a tensiunilor și a deformațiilor specifice pentru elementele implicate, ce evoluează în timp, pe durata procesului de îndoire.

O hartă a tensiunilor echivalente von Mises reprezentativă, în cazurile elementelor active din PLA sau PETG și piesa Pg0.5 la sfârșitul cursei se prezintă în Fig. 8.17, cu mențiunea că în zonele cu tensiuni mici a fost aleasă o reprezentare la scară logaritmică a valorilor.

Se remarcă următoarele:

• tensiunile cele mai mari sunt la nivelul piesei, respectiv, de 205 MPa - în cazul elementelor active atât din PLA, cât și din PETG;

• tensiunile din elementele active ale matriței (PLA sau PETG) sunt semnificativ mai mici decât cele din piesă (de Al);



Elementele active din PLA — Elementele active din PETG

Fig. 8.17. O hartă a tensiunilor echivalente von Mises, în cazurile elementelor active din PLA, PETG și piesă Pg0.5; σ_{max}: 205 MPa

• valori maxime ale tensiunilor în elementele active ale matriței se ating în zonele racordate ale suprafețelor active ale poansonului și plăcii active, respectiv, de 41 MPa la elementele active din PLA și de 33.3 MPa la elementele active din PETG (v. și Fig. 8.18).

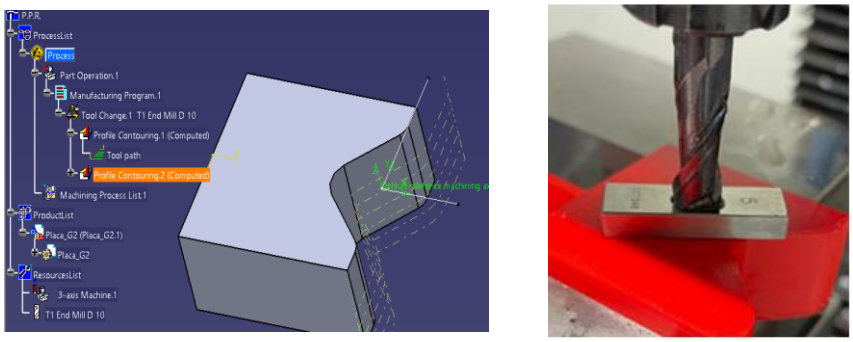
8.4. Testarea unei matrițe MIV din PLA

Pentru cercetarea experimentală a unei matrițe MIV din PLA, s-a selectat modelul structural dezvoltat pentru prelucrarea prin îndoire în V la rece a unor piese Pg2 (v. Fig. 8.2 – c).

Elemente privind fabricarea poansonului și plăcii active ale matriței MIV din PLA

Poansonul și placa activă ale matriței MIV din PLA, cu dimensiunile din Fig. 8.2 - c, au fost fabricate prin printare 3D și frezare a suprafețelor active, în condiții de lucru specifice similare celor prezentate în § 5.1.1 d - g, 5.4.1, 6.3.1, 7.2, cu următoarele mențiuni:

elemente privind generarea Programului CNC Frezare placă activă și reglarea la zero a sistemului tehnologic de prelucrare se prezintă în Fig. 8.22; adaosul total prescris suprafețelor active, cu valoarea de 0.9 mm, a fost prelucrat prin frezare CNC de degroșare și de finisare (0.2 mm), cu freza cilindro-frontală T01, adâncimea de așchiere principală a_p de 4 mm, avansul pe dinte de f_z 0.0331 mm/dinte și viteza de așchiere V_c de 87.03 m/min (turația n_c de 3463 rot/min, viteza de avans F de 229 mm/ min).



a) b)

Fig. 8.22. Generarea Programului CNC Frezare placă activă în aplicația Catia V5R21: a) simulare CNC; b) reglarea la zero a sistemului tehnologic pe direcția Z

Determinarea experimentală a forței de îndoire la rece în V a unor piese Pg2

Forța de îndoire la rece în V a unor piese Pg2, cu lățimea B de 15 și 20 mm, s-a determinat experimental pe mașina de încercare INSTRON 8872 (v. § 8.2). Forța de îndoire a fost măsurată, în perioada procesului de prelucrare, la o viteză de încărcare de 5 mm/ min.

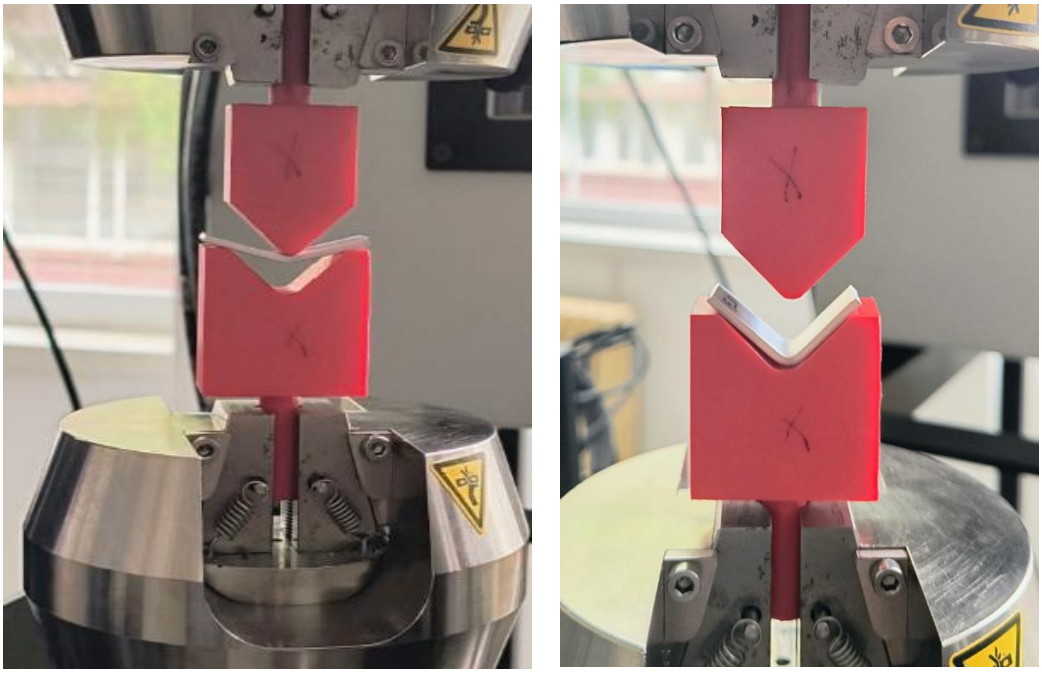


Fig. 8.23. Determinarea experimentală a forței de îndoire la rece în V a unor piese Pg2

Rezultatele pentru piese Pg2 cu lățimea B de 15 mm și de 20 mm se prezintă în Fig. 8.24. Se menționează că, pentru a evita solicitări critice asupra poansonului și plăcii active, a fost realizată încărcarea până la aproximativ 90% din cursa completă, poziție în care forța de îndoire crește semnificativ.

Capitolul 9. Concluzii finale şi contribuții principale la modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere

(1) Din analiza stadiului actual privind fabricarea și precizia unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere, s-au desprins concluzii importante, care sunt prezentate în capitolul 3.

(2) În raport cu datele și concluziile desprinse din analiza stadiului actual privind fabricarea și precizia unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere, s-au considerat a fi de perspectivă direcțiile de cercetare-dezvoltare după cum se prezintă în § 4.1.

(3) Având în vedere datele și concluziile desprinse din analiza stadiului actual, precum şi direcțiile de cercetare-dezvoltare referitoare la dezvoltarea de elemente și matrițe din materiale termoplastice, s-a determinat ca obiectiv principal al activității doctorale avansate de cercetare-dezvoltare (v. şi § 4.2): **modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere**.

(4) Concluziile relevante privind activitatea de cercetare și dezvoltare de doctorat pentru atingerea obiectivului principal, în raport și cu elementele de referință metodologice (v. § 4.3), sunt după cum urmează.

○ În raport cu forma și poziția relativă a suprafețelor din structura unor componente de matrițe printate 3D din PLA sau PETG, precum și diferitele scheme de prelucrare prin frezare, s-au structurat programele de cercetare PLA/ PETG - Frezare frontală, PLA/ PETG - Frezare cilindrică și PLA/ PETG - Frezare cilindro-frontală: printare 3D din PLA/ PETG o serie de piese; la piesele printate, prelucrare prin frezare CNC suprafețe plane de poziții diferite, și anume, *orizontale* - prin frezare frontală, *verticale* - prin frezare cilindrică, *înclinate* - prin frezare cilindro-frontală; modelare și analiză parametrii de rugozitate Ra, Rz, precum și precizia dimensională aferente unor suprafețe plane ale pieselor printate și, corespunzător, suprafețelor plane *orizontale*, *verticale*, *înclinate* prelucrate prin frezare CNC. (v. § 5.1.1. 6.1.1).

○ S-au determinat tipurile de materiale PLA și PETG, piese și suprafețe, scheme de prelucrare prin frezare CNC, elemente ale proceselor și sistemelor tehnologice de printare 3D și de prelucrare CNC.

○ Evaluarea rugozității și a preciziei dimensionale la piese printate 3D din PLA/ PETG arată că la suprafețele *orizontale*, parametrul de rugozitate Ra* are valori efective în clasele de rugozitate N 8 – 9/ N 9 - 10, iar la suprafețele *verticale* și *înclinate* - în clasele de rugozitate N10 – 11; dimensiunea C* are valori efective în clasa de toleranță IT12.

○ În cadrul programelor de cercetare PLA/ PETG - Frezare frontală/ cilindrică/ cilindro-frontală, s-au configurat funcții de regresie rugozitate și dimensiune suprafețe prelucrate la care, după caz: *variabilele dependente* sunt parametrii de rugozitate Ra și Rz, precum și distanța C dintre două suprafețe paralele prelucrate; *variabilele independente* sunt avansul pe dinte și viteza de așchiere sau turația și viteza de avans sau avansul de reglare; intervalele de variație ale variabilelor independente s-au determinat pe baza unor teste preliminare; *modelele analitice* sunt de tip putere (v. § 5.1.3, 6.1.3).

○ În cadrul cercetărilor privind dezvoltarea de modele tehnologice din PLA pentru fabricarea unor matrițe din silicon aplicate la turnarea de piese din rășină poliuretanică: s-au definit două modele tehnologice MT1 și MT2 care participă la fabricarea, prin turnare, a unor matrițe din silicon, MS1 și, respectiv, MS2; matrițele MS1 și MS2 s-au utilizat la fabricarea, prin turnare, a produselor P1 și, respectiv, P2. Cercetările vizează evaluarea influenței rugozității și preciziei dimensionale ale modelelor MT1 și MT2 la fabricarea matrițelor din silicon MS1 și, respectiv, MS2, pe baza analizei caracteristicilor produselor P1 și, respectiv, P2 realizate prin turnare în matrițele de silicon considerate (v. § 7.1).

○ În vederea aplicării analizei cu elemente finite, s-au determinat proprietățile la tracțiune efective ale materialelor PLA, PETG și Al ale elementelor componente ale modelului structural, în condițiile reglementate prin ISO 527.

(5) La realizarea obiectivului principal al activității doctorale de cercetare-dezvoltare, prezenta teză de doctorat aduce o serie de contribuții, dintre care cele mai importante sunt după cum urmează.

• Studiul structurat al stadiului actual al cercetării - dezvoltării și aplicațiilor privind fabricarea și precizia unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și așchiere.

• Dezvoltarea și desfășurarea științifică de cercetări teoretico – experimentale complexe privind modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din PLA și PETG produse prin fabricare aditivă și frezare CNC, respectiv, inițierea, configurarea și pregătirea detaliată a programelor operaționale de cercetare, constituirea și reglarea elementelor și sistemelor tehnologice de printare 3D, prelucrare prin frezare CNC, solicitare la tracțiune asistată, control, precum și efectuarea experiențelor, analiza și interpretarea rezultatelor.

• Modelarea și determinarea unor funcții rugozitate și dimensiune, ca funcții de regresie multivariabile, asociate anumitor suprafețe din componența unor elemente din PLA și PETG, prelucrate prin frezare frontală, cilindrică și cilindro-frontală CNC.

• Dezvoltarea și fabricarea prin printare 3D și prelucrare prin frezare de modele tehnologice din PLA, utilizarea lor la fabricarea unor matrițe din silicon, cu evaluarea influenței preciziei geometrice a modelelor tehnologice asupra caracteristicilor unor piese din rășină poliuretanică realizate prin turnare în matrițele considerate.

• Inițierea și realizarea de cercetări privind analiza cu elemente finite, fabricarea și testarea unor matrițe din PLA și PETG pentru îndoire la rece de precizie/ calibrare.

* * *

Prezenta teză de doctorat, prin problematică, modul de abordare şi rezultate, dezvoltă studiul, modelarea și evaluarea preciziei unor elemente și matrițe din materiale termoplastice produse prin fabricare aditivă și frezare CNC.

Importanța științifică a prezentei teze de doctorat este susținută de contribuțiile aduse la studiul structurat al stadiului actual al cercetării – dezvoltării, modelarea și determinarea unor funcții rugozitate și dimensiune ca funcții de regresie multivariabile, dezvoltarea și fabricarea de modele tehnologice din PLA și utilizarea lor la fabricarea unor matrițe din silicon, inițierea și realizarea de cercetări privind analiza cu elemente finite, fabricarea și testarea unor matrițe din PLA și PETG pentru îndoire la rece de precizie/ calibrare.

Importanța practică a prezentei teze de doctorat rezidă în aceea că elementele metodologice, modelele și celelalte rezultate ale cercetărilor teoretico – experimentale realizate reprezintă un sistem - suport util studenților, cadrelor didactice, organizațiilor, specialiștilor şi companiilor industriale.

Problematica dezvoltării de elemente și matrițe din materiale termoplastice prin modelare, proiectare asistată, fabricare aditivă și prelucrare prin așchiere CNC, ca potențiale direcții de viitor, necesită o activitate de cercetare-dezvoltare continuă, complexă și profundă.