



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**CARACTERITZACIÓ DE LA RUGOSITAT I LES TOLERÀNCIES
GEOMÈTRIQUES EN SUPERFÍCIES FABRICADES PER
DEPOSICIÓ DE FILAMENT FOS**



Memòria i Annexos

Autor: Isaac Cisa Bofarull
Director: Jose Antonio Travieso Rodríguez
Convocatòria: Juny 2021

Resum

Aquest TFG estudia els efectes que quatre paràmetres dels processos de fabricació additiva per deposició de filament fos (FFF) -temperatura d'extrusió del polímer, alçada de capa, nombre de cordons de material que conformen la paret, i percentatge d'*infill*- tenen sobre la rugositat superficial (Ra, Rq, Rz) i sis tipus de toleràncies geomètriques -circularitat, concentricitat, regularitat d'un polígon, planitud, paral·lelisme, perpendicularitat i angularitat- d'una proveta.

S'han trobat resultats significatius que relacionen la rugositat amb l'alçada de capa, el nombre de cordons i inclinació de la paret, i l'anisotropia XY. Diverses toleràncies geomètriques mostren relació amb l'alçada de capa, el nombre de cordons de les parets i el percentatge d'*infill*. No s'ha observat que cap dels paràmetres analitzats es veiés afectat per la temperatura, tot i fer servir un polímer mai abans utilitzat per a aquest tipus d'estudis: CPE (PETG).

Paraules clau: Impressió 3D, FFF, rugositat superficial, toleràncies geomètriques, CPE, PETG

Resumen

Este TFG estudia los efectos que cuatro parámetros de los procesos de fabricación aditiva por deposición de filamento fundido (FFF) -temperatura de extrusión del polímero, altura de capa, número de cordones de material que conforman la pared, y porcentaje de *infill*- tienen sobre la rugosidad superficial (Ra, Rq, Rz) y seis tipos de tolerancias geométricas -circularidad, concentricidad, regularidad de un polígono, planitud, paralelismo, perpendicularidad y angularidad- de una probeta.

Se han encontrado resultados significativos que relacionan la rugosidad con la altura de capa, el número de cordones e inclinación de la pared, y la anisotropía XY. Varias tolerancias geométricas muestran relación con la altura de capa, el número de cordones de las paredes y el porcentaje de *infill*. No se ha observado que ningún de los parámetros analizados se viera afectado por la temperatura, aun habiendo usado un material inédito para este tipo de estudios: CPE (PETG).

Palabras clave: impresión 3D, FFF, rugosidad superficial, tolerancias geométricas, CPE, PETG

Abstract

This TFG studies the effects that four parameters of the additive manufacturing process fused filament fabrication (FFF) -polymer extrusion temperature, layer height, number of contour lines that make up the wall, and infill percentage- have on the surface roughness (Ra, Rq, Rz) and six kinds of geometric tolerances -circularity, concentricity, regularity of a polygon, flatness, parallelism, perpendicularity and angularity- of a test piece.

Significative results have been found relating roughness with layer height, wall contour number and steepness, and XY anisotropy. Various geometric tolerances show correlation with layer height, wall contour number and infill percentage. No effect has been observed due to temperature, even when having used a polymer that has never been analysed in roughness experiments before: CPE (PETG).

Keywords: 3D printing, FFF, surface roughness, geometric tolerances, CPE, PETG

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
1. INTRODUCCIÓ	1
2. ESTAT DE LA QÜESTIÓ	3
3. PLANTEJAMENT D'HIPÒTESIS	5
4. EXPERIMENTACIÓ	7
4.1. Disseny de la proveta patró.....	7
4.2. Característiques de les màquines i materials.....	9
4.3. Disseny estadístic de l'experiment.....	9
4.4. Mètode experimental.....	11
4.4.1. Preparació i impressió de les provetes.....	11
4.4.2. Rugosímetre.....	12
4.4.3. Màquina de mesura de coordenades (MMC).....	13
4.4.4. Processament de les dades.....	13
5. SIGNIFICACIÓ ESTADÍSTICA DELS RESULTATS	14
5.1. Resultats de la rugositat (Ra, Rq, Rz).....	14
5.2. Resultats de la circularitat, concentricitat i regularitat.....	16
5.3. Resultats de la planitud, paral·lelisme i perpendicularitat.....	17
5.4. Resultats de l'angularitat.....	18
5.5. Resultats de les anàlisis addicionals.....	19
5.6. Resum de la significació estadística.....	21
6. ANÀLISI DELS RESULTATS SIGNIFICATIUS	22
6.1. Rugositat (Ra, Rq, Rz) amb h, n.....	22
6.2. Circularitat interior amb n.....	23
6.3. Concentricitat amb n, i.....	24
6.4. Paral·lelisme amb i.....	25
6.5. Perpendicularitat XY amb h, n.....	26
6.6. Rugositat amb l'anisotropia i l'angle.....	26
6.7. Angularitat amb l'anisotropia i l'angle.....	28

6.8. Resum dels resultats significatius	29
CONCLUSIONS	31
CONFLICTE D'INTERESSOS	33
BIBLIOGRAFIA	35
ÍNDEX DE TAULES I FIGURES	36
ANNEX I: PROVETA	37
ANNEX II: MÀQUINES I MATERIALS	38
ANNEX III: BUIDAT DE DADES I RESULTATS	39

1. Introducció

La motivació d'aquest treball ve del meu convenciment que la fabricació additiva per deposició de filament polimèric fos (FFF) és capaç de convertir-se en una tècnica de fabricació equiparable a les existents, amb capacitat de produir productes finals en grans quantitats. Això representa un canvi del concepte que se'n té actualment, on queda relegada a una eina de prototipatge i producció a petita escala.

Les possibilitats que es deriven d'una implementació generalitzada de la fabricació additiva a la indústria són nombroses, i van des de la capacitat de producció distribuïda (reduint els costos i emissions del transport) fins a l'eliminació del concepte de producció en lots, cosa que permetria iteracions instantànies de la peça en la pròpia línia de fabricació.

Per tal de fer possible aquesta revolució, cal avançar-se a les necessitats d'una potencial indústria que, previsiblement, tendiran cap a un augment de la predictibilitat, és a dir, la capacitat de conèixer les característiques mecàniques, geomètriques, estètiques, etc. que tindrà la peça acabada abans de fabricar-la.

Aquest treball vol, doncs, posar les bases per a la implementació d'un mètode sistemàtic i predictiu de disseny i preparació (*slicing*) de peces, començant per dos dels paràmetres més oblidats en les anàlisis que s'han fet fins al dia d'avui: la rugositat superficial i les toleràncies geomètriques.

...

Generalment, l'alta rugositat de les peces impreses en 3D (per qualsevol mètode) s'accepta com un defecte insalvable del mètode de fabricació, o en el millor dels casos es deixa com a conseqüència lineal i directa de l'alçada de capa.

Pel que fa a les toleràncies geomètriques, les solucions habituals passen per un mètode d'assaig i error i ajustos continuats que molts *makers* guarden com si es tractés d'una recepta secreta. Com que cadascú ha d'invertir temps i material per trobar la seva pròpia fórmula, s'incrementa la corba d'aprenentatge dels principiants i s'entorpeix l'evolució iterativa i/o comparativa de les tècniques de preprocessat.

Considero que aquests mètodes no només són ineficients, sinó que impedeixen el creixement i evolució de la tecnologia. Per sort, la solució a aquest tipus de problemes fa segles que existeix, i passa per l'aplicació del mètode científic i la publicació dels resultats.

...

Si bé seria temptador dur a terme una anàlisi exhaustiva de la vintena de paràmetres d'impressió que la majoria de softwares de *slicing* permeten escollir, s'ha hagut de limitar l'abast del treball a quatre variables (temperatura d'impressió, alçada de capa, gruix de les parets i densitat de l'infill) per tal que s'adeqüi al volum de feina esperable d'un Treball Final de Grau.

S'han escollit tres variables per valorar la rugositat (R_a – mitjana aritmètica, R_q – mitjana quadràtica, i R_z – màxima diferència pic-vall) i sis tipus de toleràncies geomètriques (circularitat i concentricitat d'un cercle, regularitat d'un polígon, planitud, paral·lelisme i perpendicularitat de superfícies planes, i angularitat de plans inclinats) com a objectes d'estudi, que han estat sotmesos a un procés estadístic per tal de correlacionar-los amb les quatre variables mencionades abans.

Addicionalment, aprofitant les dades obtingudes, ha estat possible analitzar el comportament dels paràmetres analitzats no en funció de les variables, sinó de diverses característiques geomètriques. Es tracta de la rugositat i l'angularitat en funció de l'angle del pla, el paral·lelisme en funció del gruix de les parets i l'anisotropia entre els eixos X i Y.

2. Estat de la qüestió

La literatura científica sobre la rugositat i la precisió dimensional de les peces impreses en 3D és escassa per dos motius: la fabricació additiva, en les seves diverses formes, té poc més de vint anys, i els esforços d'anàlisi d'aquesta tecnologia s'han centrat principalment en les característiques mecàniques, ja que s'ha considerat que aquestes tindrien un impacte més directe en la implementació de la tecnologia en l'àmbit industrial, com a mínim en una primera fase. Escassa, però, no vol dir nul·la, i ha estat possible trobar articles fent-hi referència des del tombant de segle amb un volum creixent en els últims cinc o sis anys.

Vasudevarao (2000), en un dels primers articles sobre la qüestió, determina que la rugositat superficial de les cares laterals depèn de l'angle i de l'alçada de capa, i no troba correlació amb la temperatura d'impressió, el diàmetre del broquet o la distància entre cordons. Addicionalment, suggereix explorar l'efecte del patró de l'infill o la temperatura de la cambra d'impressió en estudis posteriors.

Turner (2015), en un meta-anàlisi, conclou que el paràmetre que té més efecte sobre la precisió dimensional és el *warping*, és a dir, la deformació causada per la contracció del material en el refredament, i el que influeix més en la rugositat és l'alçada de capa.

Jerez-Mesa (2017) fa un estudi comparatiu entre dues impressores 3D on destaca que ambdues presenten anisotropia en els eixos XY, tan en la rugositat com en les toleràncies dimensionals. Més interessant que els resultats, pel que fa a l'experiment actual, és la proveta que utilitza per a la seva anàlisi, ja que ofereix una plataforma molt més exhaustiva que les dels altres estudis pel que fa a les mesures que s'hi poden dur a terme.

L'experiment dut a terme per Equbal et al. (2019) és, probablement, el més similar pel que fa al mètode al que es du a terme en aquest treball, tot i que se centra exclusivament en la rugositat (R_a). Busca la correlació entre la rugositat de les superfícies inferior, lateral i superior de les peces impreses per FFF i tres paràmetres d'impressió relacionats amb el *raster* (les capes superiors i inferiors sòlides). Determina que la R_a^T (superior) depèn de l'angle en què es deposita el *raster* i l'espai entre els cordons que el conformen; la R_a^B (inferior) depèn majoritàriament del suport amb què està en contacte la cara quan s'imprimeix; i la R_a^S (lateral) -que és la que s'analitza més a fons en aquest treball- no mostra relació amb els paràmetres analitzats i és influïda principalment per l'"efecte d'esglaonament" (àliasing).

Equbal comenta que Anitha (2001) va aconseguir determinar que existeix una relació de tipus invers entre l'altura de capa i la rugositat, però consultant l'article en qüestió no s'ha pogut verificar l'afirmació.

El recent article de Buj-Corral et al. (2021) és un bon exemple de les possibilitats que s'obren amb una anàlisi sistemàtica dels paràmetres d'impressió. Els autors proposen que el desenvolupament que han fet d'una configuració òptima per a estructures poroses pugui servir per dissenyar -per exemple- pròtesis de maluc que s'adhereixin millor a l'os gràcies, precisament, a un major control sobre la porositat de la superfície que hi està en contacte.

...

Un cop revisada la literatura, s'han escollit dues variables que estudis anteriors consideren rellevants - l'alçada de capa i el nombre de cordons de la paret-, una que suggereixen com a possiblement influent -el percentatge d'*infill*- i una que, si bé s'ha determinat irrellevant, no es pot descartar a causa del canvi de material -la temperatura-. Totes les anàlisis anteriors s'han realitzat amb ABS o PLA, per tant, és possible que el comportament del CPE (PETG) sigui diferent i influeixi en els resultats.

3. Plantejament d'hipòtesis

L'aplicació correcta del mètode científic requereix que, a l'hora d'iniciar un experiment, es plantegin formalment les preguntes a les quals es busca resposta. Aquestes qüestions cal redactar-les en el format d'una afirmació clara i concisa que caldrà confirmar o desmentir, és a dir, una hipòtesi. El procés de plantejament d'aquestes hipòtesis permet acotar i definir l'abast del treball i els requeriments experimentals.

En el present estudi, les qüestions que es volen provar són, primerament, la correlació de les quatre variables analitzades amb la rugositat i la precisió geomètrica.

1.- Existeix, per a cadascun dels paràmetres estudiats, una relació matemàtica que permeti determinar la qualitat superficial o geomètrica de les peces en funció de les variables analitzades.

Aquesta hipòtesi requereix trenta-sis respostes, ja que s'analitzen individualment les relacions de cadascun dels nou paràmetres amb les quatre variables. El format d'aquestes respostes s'espera que sigui "existeix la relació i es pot descriure matemàticament", o bé "no existeix", i s'assumeix que la funció resultant és constant.

Cal tenir en compte que "constant", en aquest cas, vol dir que no depèn de les variables estudiades. Això no treu la possibilitat que depengui d'algun altre paràmetre, com podria ser la velocitat d'impressió o el diàmetre del broquet.

2.- Existeix, per a cadascun dels paràmetres estudiats, un punt dins el rang analitzat de cadascuna de les variables que produeix un resultat òptim.

Per a qualsevol funció contínua en $[a,b]$ existeixen un màxim i un mínim locals. Un d'aquests dos punts, dependent de la variable que s'està analitzant, representa el millor valor que es pot obtenir de la funció dins el rang estudiat.

En una segona fase, aprofitant les característiques geomètriques de les provetes, es volen comprovar les hipòtesis següents:

3.- Existeix una anisotropia entre els eixos X i Y de les provetes, observable i quantificable en la rugositat i l'angularitat.

L'anisotropia ha estat observada en diversos dels estudis anteriors, però no ha estat quantificada. Es vol comprovar si la impressora utilitzada en causa -ja que, aparentment, el factor que influeix més en l'anisotropia és la màquina-, i si presenta algun tipus de relació amb les altres variables per tal de predir-ne el comportament.

4.- Existeix, per a la rugositat i l'angularitat, una relació matemàtica entre aquests paràmetres i l'angle de la superfície analitzada.

Vasudevarao ja va trobar una relació entre la rugositat i l'angle de la paret, que en aquest treball es vol verificar i quantificar. Addicionalment, es vol comprovar si l'angularitat també es veu afectada per aquest paràmetre, i en quina mesura.

5.- Existeix una relació quantificable entre el gruix de les parets impreses en 3D i el paral·lelisme de les superfícies d'aquestes.

Se suposa que una paret més ampla és més estable i, per tant, menys afectada per les vibracions i imperfeccions del procés de fabricació, fet que hauria de causar una major precisió geomètrica. Aquesta afirmació, però, no ha estat comprovada anteriorment.

4. Experimentació

Per tal de poder comprovar les hipòtesis anteriors, ha estat necessari desenvolupar un experiment que permeti analitzar el comportament de les quatre variables escollides en un rang ampli de valors. Per a fer-ho s'han necessitat uns fonaments estadístics sòlids, una proveta versàtil i una metodologia rigorosa que minimitzin la introducció d'errors i ajudin a obtenir uns resultats fiables.

4.1. Disseny de la proveta patró

Un dels primers passos a l'hora de dissenyar l'experiment va ser escollir la geometria de la proveta, ja que la forma d'aquesta és un dels factors més determinants a l'hora de decidir quines anàlisis s'hi podrien dur a terme. Calia que la peça disposés d'una gran quantitat de superfícies planes on es pogués mesurar fàcilment la rugositat i, alhora, una certa diversitat de formes geomètriques per a poder-hi avaluar les toleràncies.

Una revisió de la literatura existent va revelar l'absència d'una proveta estàndard. Tot i això, un dels estudis realitzats al laboratori DEFAM/TECNOFAB (Jerez-Mesa (2017)) havia desenvolupat una peça que complia la majoria de requisits que es buscaven.

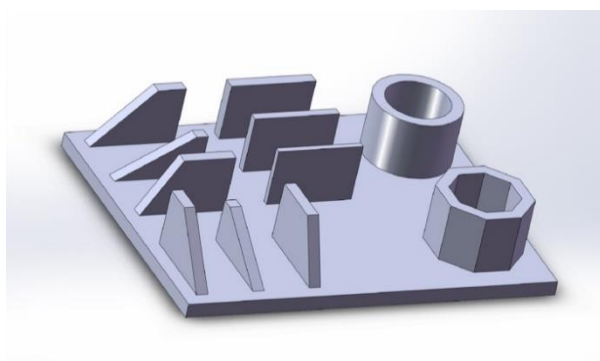


Figura 1: Proveta de Jerez-Mesa (2017)

S'ha cregut necessari, però, realitzar tres lleugeres modificacions per tal de facilitar el procés d'impressió:

Primera, la reducció de les dimensions exteriors de la peça, que permet minimitzar la quantitat de material utilitzat i el temps d'impressió. S'ha aconseguit ajustant la distància entre els diferents elements de la placa, deixant-los a només 10mm entre ells. Aquesta mesura ha quedat determinada

pels requeriments de la màquina de mesura de coordenades utilitzada, que necessita aquest espai per poder maniobrar el palpador.

Segona, la unió i reordenament de les rampes. S'han consolidat en dos blocs tal que sigui més difícil que petits defectes del procés de fabricació afectin els resultats.

Tercera, s'ha afegit una paret perpendicular a les tres que s'analitzen per tal que el broquet de la impressora tingui un recorregut ininterromput entre elles i no pugui provocar les distorsions associades amb els salts entre àrees aïllades. Addicionalment, s'han afegit xamfrans a la base de les parets de 2 i 3mm per tal de millorar-ne l'estabilitat.

Així, doncs, la proveta queda composta per una placa de 78 x 118 x 4mm, damunt la qual s'hi distribueixen cinc (sis) elements, cadascun en un volum de 30 x 30 x 20mm: un prisma octagonal buit, un cilindre buit, una regió sense cap element -per mesurar la superfície plana-, tres parets paral·leles de diferents gruixos unides per una paret perpendicular, i dos blocs de rampes a 30, 45 i 60°, un encarat a l'eix X i l'altre a l'eix Y.

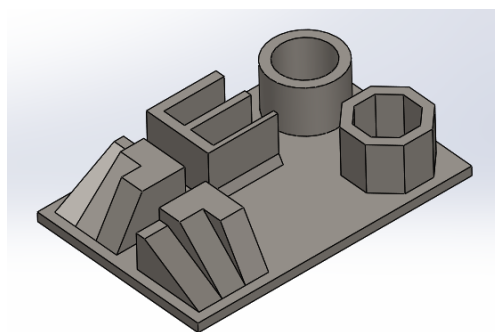


Figura 2: Proveta utilitzada

El plànol detallat de la peça, a més de dos arxius amb la geometria 3D (.step i .stl) s'inclouen a l'annex I d'aquest treball.

4.2. Característiques de les màquines i materials

Les provetes han estat impreses amb el polímer CPE HG100, una formulació comercial de PETG de la marca Fillamentum. El material ha estat subministrat en bobines de 750g de filament d' $1,75 \pm 0,05$ mm, de color Pistachio Green. Segons les recomanacions del fabricant, el rang de temperatures de treball d'aquest material està entre 255 i 275 °C.

Per a fabricar les provetes s'han utilitzat dues impressores 3D idèntiques del model Ender 3 Pro del fabricant Creality. Ambdues han estat modificades de la mateixa manera: s'ha canviat la superfície d'impressió magnètica texturitzada que venia inclosa de sèrie per plaques de vidre borosilicat de 3mm de gruix.

La preparació (*slicing*) de les peces que cal imprimir s'ha realitzat amb el software Ultimaker Cura 4.8.0 x64 per a Microsoft Windows. Més endavant es detallarà la configuració utilitzada en cadascuna de les permutacions.

Per a l'estudi de les rugositats, s'ha utilitzat un rugosímetre Mitutoyo SJ-210, i les toleràncies geomètriques s'han obtingut mitjançant una anàlisi amb una màquina de mesura de coordenades Mitutoyo Euro-C-A544 equipada amb un capçal Renishaw PH10T i un palpador esfèric de robí de 4mm de diàmetre.

4.3. Disseny estadístic de l'experiment

A l'hora d'escollir el model matemàtic ha estat evident la necessitat de reduir al màxim el nombre de provetes que calia analitzar, ja que per diverses qüestions no era viable fabricar els centenars de peces que alguns models requerien; models que, d'altra banda, tampoc podien garantir uns millors resultats. Addicionalment, la voluntat de solidificar la rellevància estadística dels resultats mitjançant la producció de tres provetes de cadascun dels models ha ajudat a moure diversos models estadístics de la columna dels "viables" a la dels "inviables".

Aquestes restriccions, combinades amb la voluntat d'estudiar múltiples variables en un únic experiment, han portat a l'elecció del mètode de Disseny d'Experiments (DOE) de Superfície de Resposta. Aquest model sacrifica l'anàlisi directe de les interaccions creuades entre variables -podent, però, extrapolar-les a partir dels resultats- a favor d'una reducció considerable del nombre d'assajos.

Tot el disseny estadístic ha estat dut a terme tenint en compte que la seva implementació s'havia de fer mitjançant el programa Minitab 19.

El disseny final queda establert de la següent manera: s'analitzen quatre punts de quatre variables diferents, amb un punt comú en totes elles. Comptant tres repeticions de cadascun dels models, surt un total de 39 peces a imprimir, detallades en la taula 1.

Taula 1: Correspondència entre peces i variables

Ref peces			h			
			T (°C)	(mm)	n	i (%)
1	2	3	260	0,20	3	15
4	5	6	260	0,20	3	30
7	8	9	260	0,20	3	45
10	11	12	260	0,20	3	60
13	14	15	260	0,20	1	45
16	17	18	260	0,20	2	45
19	20	21	260	0,20	4	45
22	23	24	260	0,12	3	45
25	26	27	260	0,16	3	45
28	29	30	260	0,24	3	45
31	32	33	250	0,20	3	45
34	35	36	255	0,20	3	45
37	38	39	265	0,20	3	45

El color blau marca la configuració central, i el verd els paràmetres que varien en cada model. Cada variable adopta quatre punts equidistants, essent sempre el tercer el comú.

La temperatura pren els valors de 250, 255, 260 i 265°C, ja que, si bé el fabricant del filament recomana un mínim de 255°C, el de l'impressora suggereix no fer-la treballar per sobre de 270°C per tal de no provocar danys als components electrònics.

Es recomana que, per norma general, s'agafi una alçada igual a la meitat del diàmetre del broquet (0,4 mm) i, si es modifica, que es faci en múltiples del pas del motor (0,04 mm) per tal d'evitar estrès als components electrònics. És per això que els valors escollits són 0,12, 0,16, 0,20 i 0,24 mm.

L'elecció del nombre de cordons de la paret ha estat gairebé automàtica, ja que es creia indispensable analitzar el cas extrem (1) i més de 5 es considera redundant. S'han analitzat els casos d'1, 2 3 i 4 cordons.

El percentatge d'*infill* recull un conjunt de valors mitjans utilitzats en producció, en increments de 15. Són 15%, 30%, 45% i 60%.

4.4. Mètode experimental

4.4.1. Preparació i impressió de les provetes

Un cop establerts aquells paràmetres d'impressió a analitzar i els seus valors en les diferents configuracions, s'han hagut d'escollir la resta de valors que l'*slicer* requereix per tal de poder processar les peces. A continuació es detallen els que s'han escollit, sempre intentant que tinguin el menor impacte possible sobre les provetes.

Taula 2: Paràmetres fixos GCODE

<u>Velocitat</u>	
Capa 1	30 mm/s
Paret	40 mm/s
Infill	50 mm/s
<u>Adhesió</u>	
Brim	5 mm
Refrigeració	No
Retracció	Sí
Suport	No
Infill	Cúbic

Per tal que les condicions d'impressió entre peça i peça fossin sempre similars s'ha monitoritzat l'ambient de la sala, amb una temperatura entre 16 i 21°C i una humitat relativa entre el 37 i el 64%. S'ha vigilat també que no hi haguessin corrents d'aire que poguessin afectar les màquines.

Pel mateix motiu, s'ha desenvolupat una rutina de preparació de la màquina i impressió:

- En cas que estigues calenta d'una impressió prèvia, s'ha deixat refredar fins a temperatura ambient abans d'apagar-la.
- Amb la impressora apagada i el llit fred s'aplica una capa generosa d'adhesiu en esprai (laca per al cabell) sobre la superfície d'impressió, que s'escampa amb pinzell amb un doble propòsit: accelerar l'evaporació dels components volàtils perquè s'assequi, i texturitzar la superfície per millorar-ne l'adhesió.
- S'inicia sempre la impressió en fred, de manera que el temps i el ritme d'escalfament depenguin el mínim possible de variables incontrolables (com, per exemple, el PID de la impressora).

- Un cop acabada la fabricació cal esperar que el llit es refredi fins als 30°C -punt en el qual l'adhesiu perd bona part de la seva força- abans de retirar la peça. Aquest refredament natural permet un relaxament més prolongat del polímer que ajuda a minimitzar el *warping*.
- Finalment, amb l'ajuda d'unes alicates de tall, es retira el *brim* i les restes de material sobrer que hagin quedat a la peça.

4.4.2. Rugosímetre

Cadascuna de les 39 peces ha estat analitzada en nou superfícies, amb tres anàlisis per superfície. S'han mesurat la base (1), les rampes, alternant x i y, d'angle petit a gran (2 a 7), i dues cares laterals de l'octàgon (8 i 9).

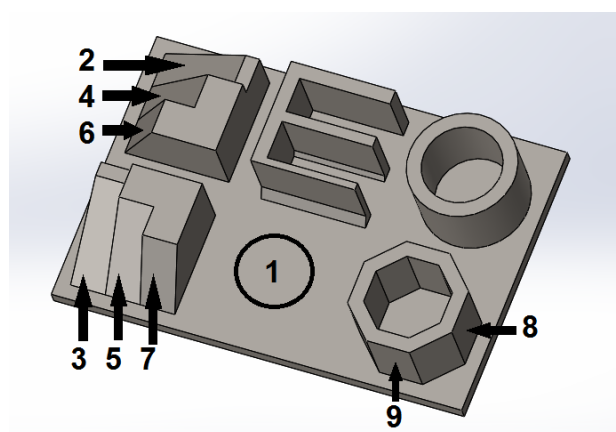


Figura 3: Superfícies analitzades amb el rugosímetre

Les mesures s'han fet seguint la norma UNE-EN ISO 4288:1998, amb una limitació. Si bé s'estableix que per al rang de rugositats analitzat ($10 < Ra < 80$) la longitud de mostreig (λc) hauria de ser de 8 mm, el rugosímetre només permetia augmentar-la fins al nivell inferior d'entre els establerts per la norma (2,5 mm). No s'espera que aquest canvi afecti significativament els resultats, ja que s'ha agafat una mostra més detallada i no s'ha perdut informació.

S'ha obtingut un total de 1053 resultats de Ra, Rq i Rz, que es poden consultar a l'annex III.

4.4.3. Màquina de mesura de coordenades (MMC)

Les trenta-nou peces han estat sotmeses a una anàlisi preprogramada amb una màquina de mesura de coordenades per tal d'avaluar-ne les toleràncies geomètriques. L'informe que genera la màquina dona els següents valors de cadascun dels elements.

- Del cilindre: el diàmetre mitjà, l'excentricitat i el punt central dels cercles interior i exterior.
- De l'octàgon: el punt central de cada cara.
- Dels vuit plans avaluats: el punt central, l'angle i la desviació.
- Dels plans inclinats: la posició, angle i desviació de la recta central.

Per qüestions tècniques ha resultat necessari repetir l'anàlisi del segon bloc de plans inclinats, les dades de la qual estan afegides al final de cada informe.

Totes els informes estan inclosos a l'annex III d'aquest treball.

4.4.4. Processament de les dades

Un cop obtingudes totes les dades, s'han compilat en diversos fulls de Microsoft Excel, mitjançant el qual s'han transformat per tal d'obtenir els valors que es volien analitzar. Després s'han exportat al Minitab, amb el qual s'ha realitzat tot el treball estadístic a partir del qual es trauran les conclusions.

A l'hora d'assignar una nomenclatura a les diferents superfícies i elements geomètrics s'ha decidit donar el nom de "x" a aquells plans que queden paral·lels a l'eix x, en contra de la convenció habitual. Aquesta ha estat una decisió deliberada, ja que d'aquesta manera es vincula cada pla al motor que es mou quan la impressora 3D deposita els cordons que el conformen. De tota manera, i essent conscients d'aquest canvi, les operacions matemàtiques s'han fet respectant les coordenades convencionals.

5. Significació estadística dels resultats

Per tal de poder processar la gran quantitat de resultats que s'han obtingut dels experiments, s'ha optat per, primer, determinar la significació estadística de cadascun d'ells. Això permet descartar tots aquells que no han produït dades rellevants i ajuda a enfocar els recursos que s'han d'analitzar més detalladament aquells valors que sí que mostren l'existència d'una correlació entre alguna de les variables amb un dels paràmetres.

A les taules següents es marquen en verd els p-valors (mesura de la significació estadística) que superen 95% de fiabilitat ($p < 0,05$), i en groc els que superen el 90% ($p < 0,10$). Només els primers seran utilitzats per a determinar l'existència o no de correlació, però s'ha marcat també el segon grup per tal d'oferir una ajuda visual a l'hora d'interpretar les taules.

Per als valors de R2 ajustat, els colors indiquen una alta confiabilitat en els resultats ($>90\%$, verd) o un mal ajust dels resultats a les dades ($<50\%$, vermell).

5.1. Resultats de la rugositat (Ra, Rq, Rz)

Superfície	Ra				R ² aj.
	T	h	n	i	
0 ^è Z	0,615	0,000	0,045	0,800	34,40%
30 ^è X	0,522	0,000	0,089	0,030	86,09%
30 ^è Y	0,589	0,000	0,001	0,479	91,79%
45 ^è X	0,591	0,000	0,893	0,708	66,64%
45 ^è Y	0,038	0,000	0,003	0,032	94,05%
60 ^è X	0,202	0,000	0,040	0,338	65,66%
60 ^è Y	0,180	0,000	0,000	0,432	85,13%
90 ^è X	0,764	0,000	0,460	0,397	60,72%
90 ^è Y	0,416	0,000	0,003	0,136	92,55%

Taula 3: Significació estadística de la Ra

Superfície	Rq				R ² aj.
	T	h	n	i	
0º Z	0,593	0,001	0,034	0,968	34,98%
30º X	0,491	0,000	0,212	0,013	81,57%
30º Y	0,575	0,000	0,001	0,169	90,66%
45º X	0,658	0,000	0,907	0,519	67,12%
45º Y	0,121	0,000	0,000	0,005	94,36%
60º X	0,196	0,000	0,032	0,393	62,74%
60º Y	0,188	0,000	0,000	0,490	84,01%
90º X	0,774	0,000	0,224	0,292	61,65%
90º Y	0,483	0,000	0,010	0,137	87,19%

Taula 4: Significació estadística de la Rq

Superfície	Rz				R ² aj.
	T	h	n	i	
0º Z	0,489	0,001	0,078	0,913	34,81%
30º X	0,346	0,000	0,999	0,003	59,05%
30º Y	0,267	0,000	0,121	0,005	79,10%
45º X	0,843	0,000	0,040	0,440	54,17%
45º Y	0,988	0,000	0,000	0,007	80,73%
60º X	0,330	0,001	0,021	0,833	31,08%
60º Y	0,230	0,000	0,000	0,490	67,82%
90º X	0,728	0,000	0,029	0,036	45,02%
90º Y	0,672	0,000	0,061	0,179	48,35%

Taula 5: Significació estadística de la Rz

En tots tres paràmetres es pot observar clarament una correlació amb l'alçada de capa -com ja indicava la literatura- i el nombre de cordons de les parets.

La temperatura no té cap mena d'influència, i és difícil determinar si l'efecte de l'infill és rellevant o no, especialment en la Rz.

5.2. Resultats de la circularitat, concentricitat i regularitat

La circularitat ha estat avaluada als cercles interior i exterior, i s'ha pres com a valor la desviació dels punts mostrejats respecte el cercle mitjà, directament (mm de desviació) i de manera relativa al diàmetre (desv/diam).

Paràmetre	Circularitat				R ² aj.
	T	h	n	i	
d int	0,931	0,794	0,002	0,144	33,47%
%d int	0,933	0,787	0,002	0,145	33,44%
d ext	0,948	0,319	0,508	0,274	0,00%
%d ext	0,946	0,321	0,513	0,271	0,00%

Taula 6: Significació estadística de la circularitat

Es pot observar com el nombre de cordons de la paret influeix en la circularitat del cercle interior però, sorprenentment, no en la de l'exterior. La resta de casos no mostren cap relació.

Paràmetre	Concentricitat				R ² aj.
	T	h	n	i	
Dist	0,823	0,827	0,001	0,000	48,87%

Taula 7: Significació estadística de la concentricitat

La concentricitat ha estat avaluada com la distància entre el centre d'ambdós cercles, i està clarament vinculada al nombre de cordons i al percentatge d'infill, però ni a la temperatura ni a l'alçada de capa.

Paràmetre	Regularitat				R ² aj.
	T	h	n	i	
D int	0,321	0,389	0,890	0,048	0,00%
d int	0,494	0,455	0,425	0,860	0,00%
d/D int	0,497	0,458	0,424	0,852	0,00%
D ext	0,901	0,105	0,024	0,357	28,96%
d ext	0,650	0,765	0,393	0,796	0,00%
d/D ext	0,650	0,767	0,397	0,793	0,00%

Taula 8: Significació estadística de la regularitat

La regularitat de l'octàgon s'ha mesurat de manera similar a la circularitat, avaluant els cercles inscrits a ambdós polígons. Lamentablement, les dades no han pogut aportar cap resultat rellevant.

5.3. Resultats de la planitud, paral·lelisme i perpendicularitat

S'han escollit dos mètodes per a avaluar la planitud: l'angle que el vector del pla mesurat forma amb l'eix corresponent, i la desviació dels punts obtinguts per la MMC.

Paràmetre	Planitud (α)				R ² aj.
	T	h	n	i	
α_x	0,062	0,585	0,057	0,991	10,72%
α_y	0,989	0,095	0,836	0,826	0,00%
α_z	0,859	0,179	0,900	0,226	17,01%

Taula 9: Significació estadística de la planitud (α)

Paràmetre	Planitud (d)				R ² aj.
	T	h	n	i	
dx	0,522	0,966	0,263	0,234	2,19%
dy	0,055	0,230	0,438	0,900	14,71%
dz	0,355	0,213	0,379	0,278	0,00%

Taula 10: Significació estadística de la planitud (d)

De manera similar, el paral·lelisme s'ha analitzat de dues maneres diferents: amb l'angle entre els dos plans i la distància entre els punts centrals d'aquests.

Paràmetre	Paral·lelisme (α)				R ² aj.
	T	h	n	i	
α_2	0,878	0,870	0,731	0,047	4,53%
α_3	0,796	0,762	0,908	0,251	0,00%
α_4	0,253	0,289	0,585	0,071	7,83%

Taula 11: Significació estadística del paral·lelisme (α)

Paràmetre	Paral·lelisme (d)				R ² aj.
	T	h	n	i	
d2	0,900	0,880	0,612	0,014	11,10%
d3	0,949	0,226	0,000	0,461	50,15%
d4	0,715	0,979	0,591	0,048	11,70%

Taula 12: Significació estadística del paral·lelisme (d)

No apareix cap tipus de correlació fiable en la planitud ni en el paral·lelisme. L'últim paràmetre d'aquest mostra, però, el que ha de ser forçosament una correlació espúria, ja que la paret de 2mm de gruix no conté *infill* en la gran majoria de les provetes.

Paràmetre	Perpendicularitat (α)				R ² aj.
	T	h	n	i	
α xy	0,597	0,000	0,018	0,217	48,17%
α xz	0,170	0,834	0,671	0,766	0,00%
α yz	0,791	0,931	0,367	0,487	0,00%

Taula 13: Significació estadística de la perpendicularitat (α)

La mesura utilitzada en el cas de la perpendicularitat ha estat la diferència entre l'angle format pels vectors dels dos plans i el valor de referència (90°). Només s'observen valors fiables en la perpendicularitat dels plans X i Y, i encara només en l'alçada de capa i el nombre de cordons de les parets.

5.4. Resultats de l'angularitat

La mesura de l'angularitat s'ha realitzat a partir de l'obtenció -amb la MMC- d'una línia continguda en el pla i perpendicular a la trama de cordons que el conformen. D'aquesta línia (una per pla inclinat, sis plans per peça) s'han obtingut dos valors: la diferència entre l'angle de la línia i l'angle nominal (α) i la desviació dels punts mesurats de la línia interpolada (d).

Paràmetre	Angularitat (α)				R ² aj.
	T	h	n	i	
α 30x	0,544	0,737	0,065	0,000	36,46%
α 30y	0,977	0,837	0,229	0,329	0,00%
α 45x	0,566	0,570	0,003	0,005	30,93%
α 45y	0,941	0,634	0,131	0,951	0,00%
α 60x	0,891	0,934	0,353	0,264	0,00%
α 60y	0,907	0,874	0,110	0,981	0,00%

Taula 14: Significació estadística de l'angularitat (α)

Paràmetre	Angularitat (d)				R ² aj.
	T	h	n	i	
d 30x	0,028	0,606	0,844	0,840	23,93%
d 30y	0,704	0,785	0,641	0,000	52,95%
d 45x	0,096	0,154	0,996	0,953	0,00%
d 45y	0,451	0,431	0,216	0,563	0,00%
d 60x	0,898	0,535	0,512	0,168	0,00%
d 60y	0,723	0,486	0,403	0,393	0,00%

Taula 15: Significació estadística de l'angularitat (d)

No s'observa cap valor amb rellevància significativa, ni en l'anàlisi dels angles ni en el de les desviacions.

5.5. Resultats de les anàlisis addicionals

Paràmetre	Rugositat (angle i anisotropia)						R ² aj.
	T	h	n	i	sin α	xy	
Ra	0,333	0,000	0,000	0,739	0,000	0,003	96,76%
Rq	0,425	0,000	0,000	0,584	0,000	0,003	96,46%
Rz	0,819	0,000	0,000	0,217	0,000	0,089	90,31%

Taula 16: Significació estadística de l'angle i l'anisotropia en la rugositat

La correlació de la rugositat amb l'angle és clara per a tots els casos. L'anisotropia és apreciable en la rugositat mitjana (Ra, Rq) però no tan clarament en la màxima (Rz).

Paràmetre	Angularitat (angle i anisotropia)						R ² aj.
	T	h	n	i	sin α	xy	
α	0,768	0,617	0,000	0,055	0,755	0,000	24,40%
d	0,834	0,355	0,287	0,224	0,000	0,853	26,12%

Taula 17: Significació estadística de l'angle i l'anisotropia en l'angularitat

S'observa anisotropia en la mesura de l'angle, i correlació amb l'angle en la desviació dels punts de mesura. Uns resultats, com a mínim, sorprenents.

És digne de menció com en aquest estudi agregat apareix una correlació entre el nombre de cordons de la paret i l'angle, cosa que no passa en l'anàlisi superfície per superfície.

Paràmetre	Paral·lelisme (gruix)					R ² aj.
	T	h	n	i	g	
α	0,662	0,810	0,983	0,022	0,333	0,00%
d	0,731	0,932	0,169	0,004	0,091	5,86%

Taula 18: Significació estadística del gruix en el paral·lelisme

No s'aprecia cap relació entre el gruix i el paral·lelisme.

Torna a aparèixer la correlació amb l'infill que abans s'havia considerat espúria, però ara amb més força. A rel d'això, es considera rellevant i s'analitzarà més detalladament.

5.6. Resum de la significació estadística

En les dues taules 19 i 20 es resumeix tota l'anàlisi anterior, indicant en vermell aquells parells paràmetre-variable en què no s'observa correlació, i en verd aquells on sí, que s'estudiaran amb més detall al següent apartat.

	T	h	n	i
Ra				
Rq				
Rz				
Circularitat			[1]	
Concentricitat				
Regularitat				
Planitud				
Paral·lelisme				[2]
Perpendicularitat		[3]	[3]	
Angularitat				

Taula 19: Resum de la significació estadística (1/2)

[1] Només en el cercle interior

[2] Correlació espúria?

[3] Només en el parell de plans XY

	xy	sin α	g
Ra			
Rq			
Rz			
Angularitat	[4]	[5]	
Paral·lelisme			

Taula 20: Resum de la significació estadística (2/2)

[4] Només en l'angle

[5] Només en la desviació

6. Anàlisi dels resultats significatius

6.1. Rugositat (Ra, Rq, Rz) amb h, n

Si s'analitzen els gràfics d'efectes principals es pot observar com, en tots tres paràmetres, l'alçada de capa té una relació lineal amb la rugositat, amb un mínim local a 0,12 mm.

El nombre de cordons de la paret, en canvi, presenta una relació inversa, molt clara en Ra i Rq, i difícil d'apreciar en Rz. En aquest cas, el mínim local estaria a 4, tot i que els valors a 3 són tan semblants que la diferència és inapreciable.

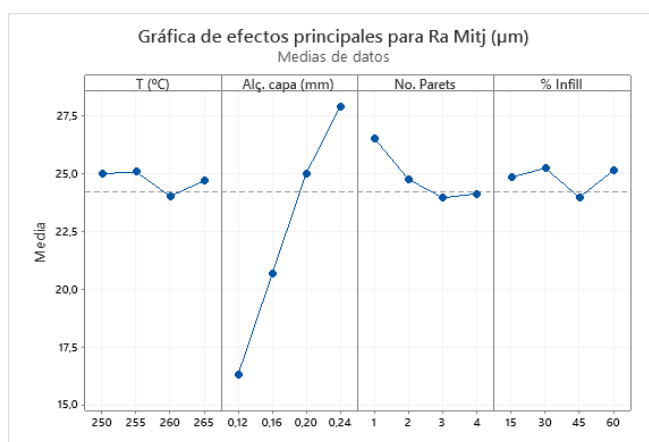


Figura 4: Gràfic d'efectes principals de la Ra

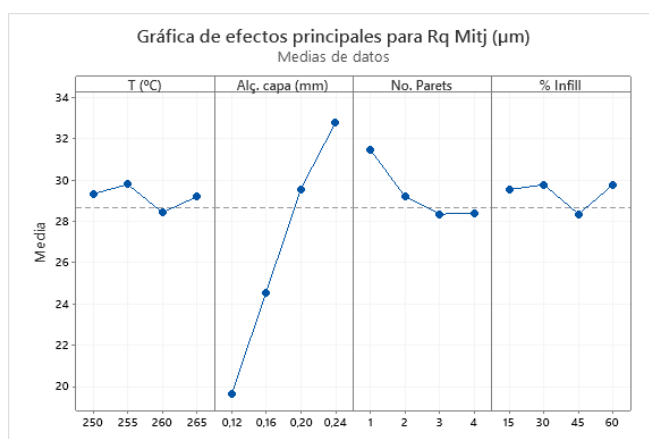


Figura 5: Gràfic d'efectes principals de la Rq

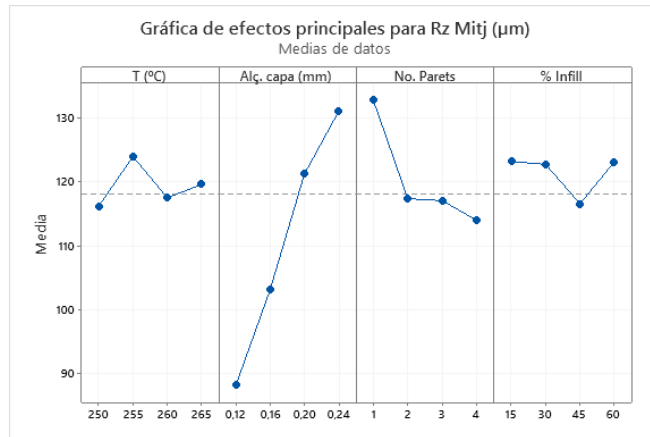


Figura 6: Gràfic d'efectes principals de la Rz

6.2. Circularitat interior amb n

De la mateixa manera que en el cas anterior, la relació entre la circularitat i el nombre de parets és inversa, amb un mínim local a 4. En canvi, aquí no sembla que s'hagi arribat a una regió gairebé plana de la funció, i sembla que amb un nombre més elevat encara es podrien millorar significativament els resultats.

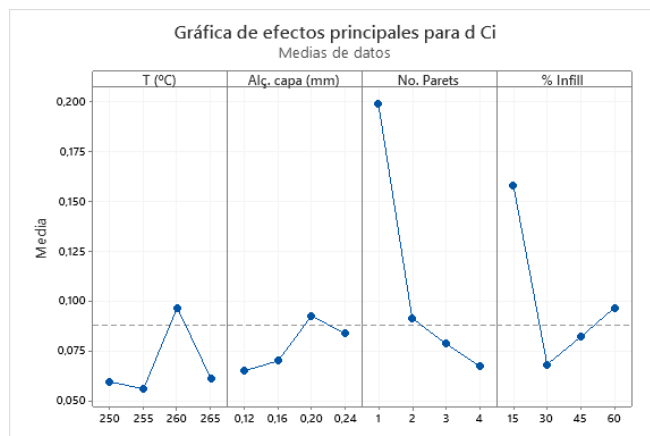


Figura 7: Gràfic d'efectes principals de la circularitat (d int)

6.3. Concentricitat amb n, i

En la concentricitat s'hi pot observar una correlació lineal descendent del nombre de cordons de la paret (mínim local, 4), i una relació amb l'infill que no queda clara a causa de l'alta dispersió dels punts. Podria tractar-se d'una funció lineal o inversa.

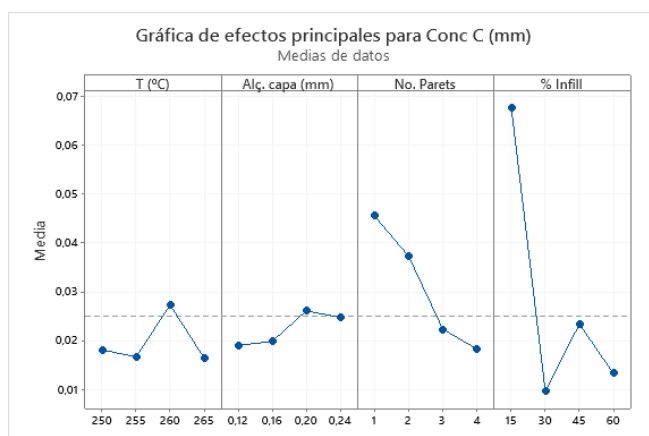


Figura 8: Gràfic d'efectes principals de la concentricitat

6.4. Paral·lelisme amb i

Els resultats del paral·lelisme són força incongruents, i ja s'havia mencionat abans que és possible que es tracti d'una correlació espúria. També podria tractar-se d'un error amb les dades, ja que hi ha un parell de valors molt allunyats de la resta. En qualsevol cas, no es considera que els resultats condueixin a una conclusió fiable.

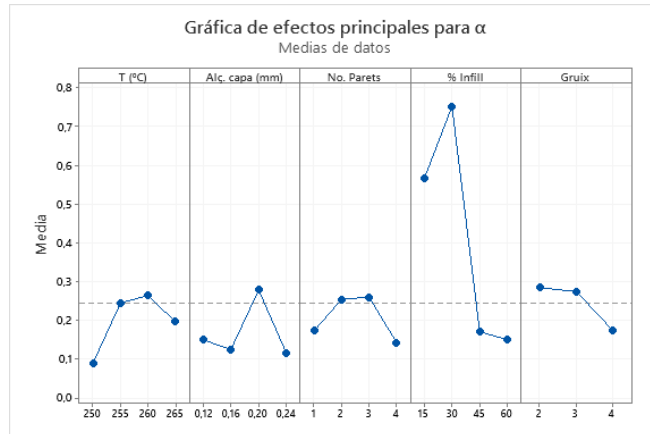


Figura 9: Gràfic d'efectes principals del paral·lelisme (α)

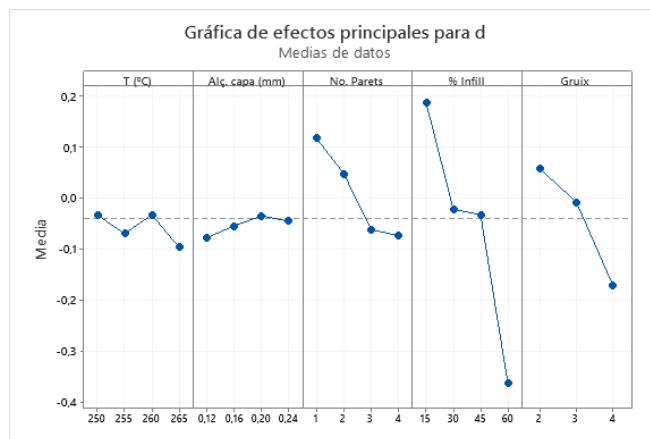


Figura 10: Gràfic d'efectes principals del paral·lelisme (d)

6.5. Perpendicularitat XY amb h, n

Per a ambdues variables, el gràfic d'efecte principal mostra que hi ha una correlació positiva i aproximant-se al valor ideal, però es fa difícil determinar quin tipus de funció s'ajusta millor a les dades.

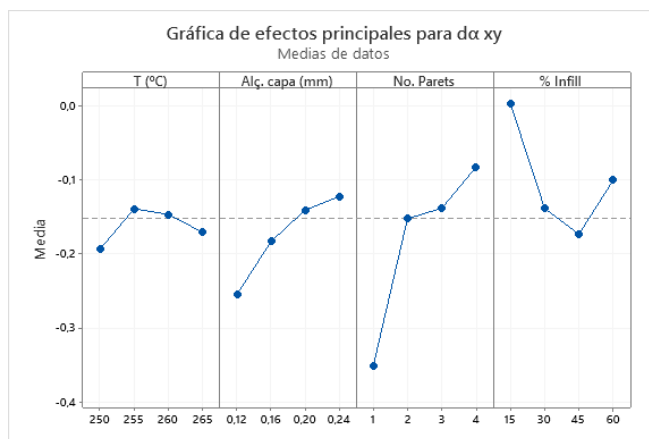


Figura 11: Gràfic d'efectes principals de la perpendicularitat XY

6.6. Rugositat amb l'anisotropia i l'angle

La relació de la rugositat amb el sinus de l'angle de la paret és lineal i molt forta, essent el paràmetre que més efecte té de tots els estudiats. El mínim relatiu (i absolut) està a 1, és a dir, 90°. L'efecte de l'anisotropia és menor, però estadísticament rellevant. Els plans paral·lels a l'eix Y sempre tenen una qualitat lleugerament millor que els encarats a X.

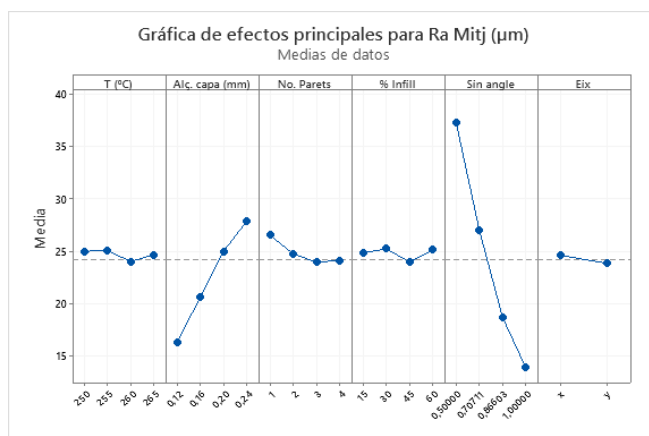


Figura 12: Gràfic d'efectes principals de la Ra (α i xy)

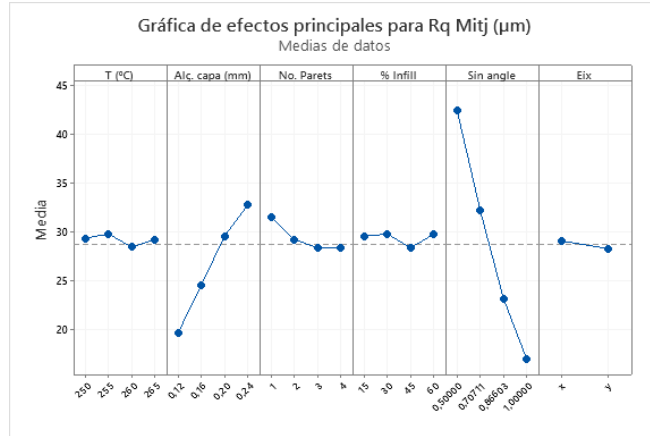


Figura 13: Gràfic d'efectes principals de la Rq (α i xy)

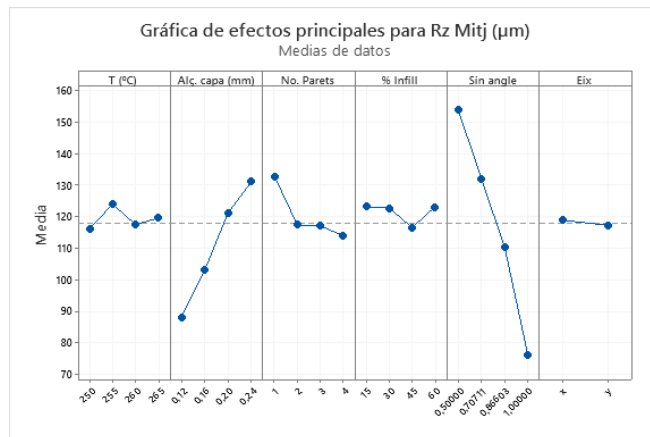


Figura 14: Gràfic d'efectes principals de la Rz (α i xy)

6.7. Angularitat amb l'anisotropia i l'angle

L'anisotropia axial és evident i pronunciada en la mesura de l'angle, és a dir, els plans inclinats paral·lels a l'eix Y són molt més precisos que els paral·lels a X. La diferència, per a aquest model d'impressora, és d'aproximadament 0,25°.

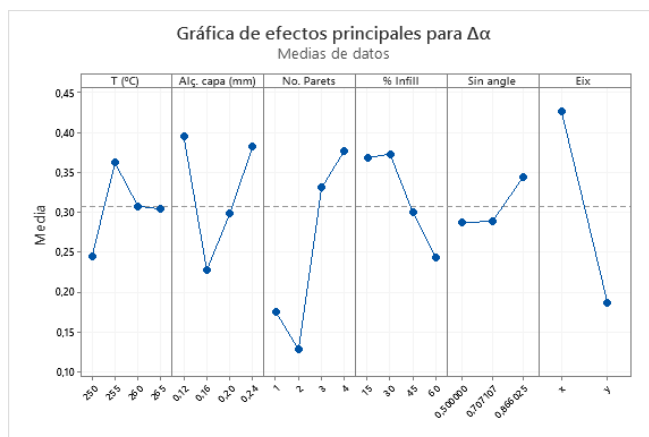


Figura 15: Gràfic d'efectes principals de l'anisotropia (α) (α i xy)

L'efecte de l'angle sobre l'angularitat, és a dir, l'augment de la imprecisió amb la reducció de l'angle, és pronunciat i significatiu, però no queda clar si es pot modelar amb una equació simple.

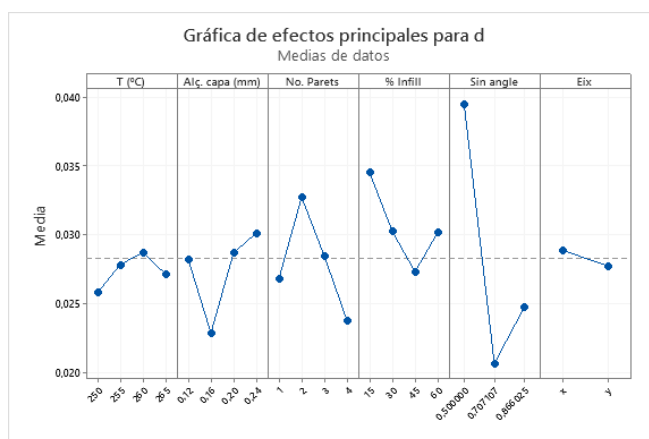


Figura 16: Gràfic d'efectes principals de l'anisotropia (d) (α i xy)

6.8. Resum dels resultats significatius

Un cop realitzades totes les anàlisis als paràmetres que mostraven resultats significatius, s’han compilat en quatre taules-resum les conclusions d’aquest treball. Les dues primeres (21 i 22) indiquen quin tipus de relació hi ha entre els paràmetres i les variables, i les dues següents (23 i 24) els valors òptims locals en aquelles combinacions en les quals s’han pogut determinar.

	T	h	n	i
Ra		LIN	INV	
Rq		LIN	INV	
Rz		LIN	?	
Circularitat			INV	
Concentricitat			LIN	?
Regularitat				
Planitud				
Paral·lelisme				X
Perpendicularitat		?	?	
Angularitat				

Taula 21: Resum dels resultats significatius (1/2)

	xy	sin α	g
Ra	Y	LIN	
Rq	Y	LIN	
Rz	?	LIN	
Angularitat	Y	?	
Paral·lelisme			

Taula 22: Resum dels resultats significatius (2/2)

	T	h	n	i
Ra		0,12	4	
Rq		0,12	4	
Rz		0,12		
Circularitat			4	
Concentricitat			4	-
Regularitat				
Planitud				
Paral·lelisme				
Perpendicularitat		0,24	4	
Angularitat				

Taula 23: Resum dels punts òptims (1/2)

	xy	sin α	g
Ra	Y	1	
Rq	Y	1	
Rz		1	
Angularitat	Y	-	
Paral·lelisme			

Taula 24: Resum dels punts òptims (2/2)

Es pot deduir, per tant, que per a tots els paràmetres -excepte un- per als quals s'ha obtingut un punt òptim, la configuració de la peça ideal seria la següent: Alçada de capa 0,12 mm, 4 cordons de paret, angle completament vertical i pla paral·lel a l'eix Y.

Conclusions

Les conclusions d'aquest treball es divideixen en dues seccions: en la primera part es dona resposta a les hipòtesis plantejades al començament; i en la segona es planteja un mètode predictiu de la rugositat superficial en funció d'aquells paràmetres d'entre els analitzats que afecten amb més intensitat l'acabat de la peça analitzada.

...

Existeix una relació lineal entre l'altura de capa i la rugositat superficial, és a dir, com més gruixuda la capa, més gran la rugositat. El punt òptim local es troba, per tant, en la mesura més petita analitzada, 0,12 mm. Això es compleix per a les tres mesures de la rugositat, Ra, Rq i Rz.

Existeix una relació inversa entre el nombre de cordons que conformen una paret i la rugositat superficial d'aquesta. Aquesta afirmació només es compleix per a Ra i Rq, i no s'ha pogut demostrar per a Rz. El resultat òptim (menor rugositat) s'obté amb el nombre més elevat de cordons, 4.

Existeix una relació inversa entre el nombre de cordons i la circularitat d'un cilindre buit. El resultat òptim s'obté amb el nombre més elevat de cordons, 4.

Existeix una relació lineal entre el nombre de cordons i la concentricitat dels dos cilindres. El resultat òptim s'obté amb el nombre més elevat de cordons, 4.

Existeix una relació indeterminada entre el percentatge d'*infill* i la concentricitat dels cercles.

Existeixen dues relacions indeterminades entre, d'una banda, l'alçada de capa i, de l'altra, el nombre de cordons de la paret, amb la perpendicularitat entre els plans X i Y. Si bé no es pot concretar el tipus de funció, els punts òptims locals són, respectivament, 0,24 mm i 4 cordons.

No existeix, o no s'ha pogut demostrar l'existència de, correlació entre les combinacions de paràmetre-variable no mencionades anteriorment.

...

Existeix una anisotropia entre els eixos X i Y, apreciable en la Ra, la Rq i, especialment, l'angularitat. Els resultats indiquen que l'eix Y és el més precís, però és difícil quantificar la diferència.

Existeix una correlació lineal forta entre el sinus de l'angle d'un pla inclinat i la rugositat d'aquest. El punt òptim local (i probablement global) es troba a $\sin(\alpha) = 1$, és a dir, a 90°.

Existeix una correlació indeterminada entre l'angle d'un pla inclinat i l'angularitat del mateix.

No s'ha observat cap relació entre el paral·lelisme de les superfícies d'una paret i el gruix de la mateixa.

...

A partir dels resultats obtinguts ha estat possible elaborar un gràfic (figura 17) que entrellaça les dues variables en les quals s'ha observat la correlació més forta -alçada de capa i angle del pla- amb el paràmetre que ha donat els valors més fiables -la rugositat Ra-.

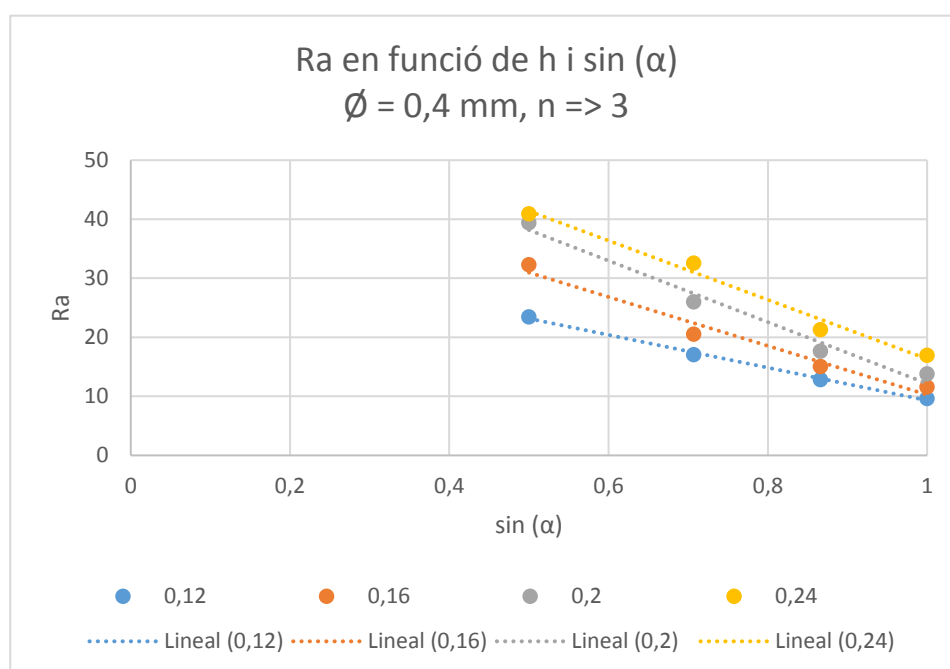


Figura 17: Ra en funció de h i $\sin(\alpha)$

Si bé en aquests moments la quantitat de dades no és suficient per a crear un model complet, es considera que un estudi futur podria convertir aquest gràfic en una eina útil per poder predir la rugositat superficial d'una peça abans de fabricar-la.

Conflicte d'interessos

Isaac Cisa Bofarull declara que ha rebut de Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o. les quatre bobines de CPE HG100 que s'han utilitzat en aquest treball a un preu rebaixat. També declara que cap persona associada a Fillamentum ha tingut accés a aquest treball ni a la informació que hi apareix abans de la seva publicació.



Bibliografia

Anitha, R., Arunachalam, S. i Radhakrishnan, P., "Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling." *Journal of Material Processing Technology* 118 (2001) 385-388.

Buj-Corral, I., Bagheri, A. i Sivatte-Adroer, M., "Effect of Printing Parameters on Dimensional Error, Surface Roughness and Porosity of FFF Printed Parts with Grid Structure." *Polymers* 13 (2021) 1213.

Equbal, A., Equbal, I., Equbal, A. i Sood, A.K., "Multi-criterion decision method for roughness optimization of Fused Deposition Modelled parts." *Additive Manufacturing Technologies From an Optimization Perspective* (2019) 235-262.

Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J.A. i Gomez-Gras, G., "Precisión dimensional de impresoras 3D: Estudio comparativo a través de mediciones de alta precisión." *13º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica* (2017).

Turner, B.N. i Gold, S., "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness." *Rapid Prototyping Journal* 21 (2015) 250-261.

Vasudevarao, B., Natarajan, D.P., Henderson, M. i Razdan, A., "Sensitivity Of RP Surface Finish To Process Parameter Variation" (2000).

Índex de taules i figures

Taula 1: Correspondència entre peces i variables	10
Taula 2: Paràmetres fixos GCODE	11
Taula 3: Significació estadística de la Ra	14
Taula 4: Significació estadística de la Rq	15
Taula 5: Significació estadística de la Rz	15
Taula 6: Significació estadística de la circularitat	16
Taula 7: Significació estadística de la concentricitat	16
Taula 8: Significació estadística de la regularitat	16
Taula 9: Significació estadística de la planitud (α)	17
Taula 10: Significació estadística de la planitud (d)	17
Taula 11: Significació estadística del paral·lelisme (α)	17
Taula 12: Significació estadística del paral·lelisme (d)	18
Taula 13: Significació estadística de la perpendicularitat (α)	18
Taula 14: Significació estadística de l'angularitat (α)	19
Taula 15: Significació estadística de l'angularitat (d)	19
Taula 16: Significació estadística de l'angle i l'anisotropia en la rugositat	19
Taula 17: Significació estadística de l'angle i l'anisotropia en l'angularitat	20
Taula 18: Significació estadística del gruix en el paral·lelisme	20
Taula 19: Resum de la significació estadística (1/2)	21
Taula 20: Resum de la significació estadística (2/2)	21
Taula 21: Resum dels resultats significatius (1/2)	29
Taula 22: Resum dels resultats significatius (2/2)	29
Taula 23: Resum dels punts òptims (1/2)	30
Taula 24: Resum dels punts òptims (2/2)	30
<hr/>	
Figura 1: Proveta de Jerez-Mesa (2017)	7
Figura 2: Proveta utilitzada	8
Figura 3: Superfícies analitzades amb el rugosímetre	12
Figura 4: Gràfic d'efectes principals de la Ra	22
Figura 5: Gràfic d'efectes principals de la Rq	22
Figura 6: Gràfic d'efectes principals de la Rz	23
Figura 7: Gràfic d'efectes principals de la circularitat (d int)	23
Figura 8: Gràfic d'efectes principals de la concentricitat	24
Figura 9: Gràfic d'efectes principals del paral·lelisme (α)	25
Figura 10: Gràfic d'efectes principals del paral·lelisme (d)	25
Figura 11: Gràfic d'efectes principals de la perpendicularitat XY	26
Figura 12: Gràfic d'efectes principals de la Ra (α i xy)	26
Figura 13: Gràfic d'efectes principals de la Rq (α i xy)	27
Figura 14: Gràfic d'efectes principals de la Rz (α i xy)	27
Figura 15: Gràfic d'efectes principals de l'anisotropia (α) (α i xy)	28
Figura 16: Gràfic d'efectes principals de l'anisotropia (d) (α i xy)	28
Figura 17: Ra en funció de h i sin (α)	32

Annex I: Proveta

Els documents que conformen aquest primer annex són tres, que es troben adjunts a aquest document dins la carpeta homònima.

- El plànol de la proveta, en format pdf.
- La geometria 3D de la proveta, en format stl, l'estàndard per a fabricació additiva.
- El model en CAD de la proveta, en el format multiprograma STEP.

Annex II: Màquines i materials

Aquest annex conté la informació que els diferents fabricants de les màquines i materials posen a disposició dels usuaris i que han estat útils per a la realització d'aquest treball.

- La informació sobre el polímer CPE HG100, agrupada en tres documents:
 - o La fitxa tècnica, "Technical Data Sheet_CPE HG100_03012019.pdf".
 - o La informació de seguretat, "MSDS_CPE HG100_EN_14052019.pdf"
 - o Les recomanacions d'ús, "3D Printing Guide_CPE HG100_EN_21042020.pdf"
- El manual d'usuari del rugosímetre "Mitutoyo_SJ-210.pdf".
- La guia ràpida d'utilització del rugosímetre, "Mitutoyo - Quick guide (2016).pdf"

Annex III: Buidat de dades i resultats

Els tres dossiers d'aquest annex contenen les dades i els resultats de totes les anàlisis dutes a terme en el transcurs d'aquest treball.

- La primera carpeta inclou tots els informes generats pel rugosímetre, agrupats per superfície i numerats segons s'indica a la figura 3 de la memòria.
- A la segona carpeta s'hi troben els 39 informes de la MMC, un per peça, numerats com s'indica a la taula 1.
- La tercera carpeta conté els arxius de resultats del Minitab, agrupats segons si les dades provenen del rugosímetre, la MMC, o si es tracta dels experiments addicionals fets a partir de l'agrupació de dades anteriors.

