

Treball de Fi de Màster

## **Màster en Tecnologies Industrials**

# **Estudi i anàlisi de la influència dels paràmetres d'impressió sobre l'error dimensional, la rugositat i la porositat de peces per a la fabricació de prototips d'assaig quirúrgic**

## **MEMÒRIA**

**Autor:** Elisabeth Carreras Sanz  
**Director:** Irene Buj Corral  
**Convocatòria:** Gener 2022



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

Aquest projecte s'emmarca en un projecte de recerca del grup TECNOFAB del Departament d'Enginyeria Mecànica de la UPC, que es basa en la creació de prototips d'ossos per a l'ús quirúrgic mitjançant impressió 3D.

En aquest projecte s'investiga la influència de diversos paràmetres d'impressió 3D sobre tres respostes concretes, que són: l'error dimensional, la rugositat i la porositat de provetes prismàtiques. Aquestes estan fabricades mitjançant una impressora model Sigma de BCN 3D Technologies usant una barreja de polipropilè (PP) i carbonat de calci ( $\text{CaCO}_3$ ) com a material d'impressió.

En aquesta memòria, primerament, es fa una introducció del món de la FFF o fabricació per filament fos, explicant l'estat de l'art de la matèria i les diferents tecnologies existents en aquest àmbit. Un cop en context, es presenten els requeriments del procés experimental del projecte, com és el programari utilitzat, la maquinària necessària, la selecció de material... Posteriorment, es defineix un disseny d'experiments (DOE), concretament un disseny complet de quatre variables, que són: la temperatura, la velocitat, el diàmetre de broc i l'alçada de capa, amb tres rèpliques del punt central.

Un cop les peces s'havien imprès i mesurat, s'han cercat models de regressió lineals per a cada resposta, i s'ha dut a terme una anàlisi exhaustiva dels resultats. Després, amb tots els models, s'ha portat a terme una optimització multiobjectiu mitjançant el mètode de la funció d'utilitat (desirability function). En aquest estudi s'ha determinat quin valor cal donar a les diferents variables per tal d'aconseguir els objectius definits, que són: reduir l'error dimensional i la rugositat, alhora que s'aconsegueix un valor de porositat concret.

Seguidament, s'han posat les bases per assajar l'adhesió entre capes que, en alguns casos, s'havia detectat que era baixa a les proves descrites anteriorment. Per fer-ho, s'han imprès provetes per a l'assaig de tracció en la direcció vertical, i s'han sotmès a un assaig a tracció, per tal de veure les tensions màximes que poden suportar. Com més elevat sigui aquest valor, més elevada es considera l'adhesió entre capes.

També s'ha fet un estudi de l'impacte ambiental que ha tingut aquest treball pel que fa a emissions, sorolls i residus i s'han calculat els costos del projecte. D'altra banda, també s'han donat recomanacions de cara a futurs projectes basats en la continuació d'aquest treball.

# Sumari

<b>1. GLOSSARI</b>	<b>7</b>
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>8</b>
2.1. Origen del projecte.....	8
2.2. Motivació.....	8
2.3. Requeriments previs .....	9
2.4. Objectius del projecte .....	9
2.5. Abast del projecte .....	10
<b>3. ESTAT DE L'ART</b>	<b>12</b>
3.1. Història.....	12
3.2. Punts forts i febles de la tecnologia FDM .....	15
3.3. Tipus de fabricació additiva .....	16
<b>4. PROCÉS EXPERIMENTAL</b>	<b>19</b>
4.1. Procés experimental pas a pas.....	19
4.1.1. Disseny de les provetes .....	19
4.1.2. Selecció de les variables d'impressió.....	20
4.1.3. Impressió de les provetes .....	21
4.1.4. Anàlisi estadística .....	22
4.1.5. Proves adhesió .....	22
4.2. Material .....	23
4.3. Variables .....	24
4.3.1. Temperatura .....	24
4.3.2. Velocitat .....	25
4.3.3. Diàmetre de broc .....	25
4.3.4. Alçada de capa .....	26
4.4. Respostes.....	27
4.4.1. Error dimensional.....	27
4.4.2. Rugositat.....	29
4.4.3. Porositat.....	31
<b>5. DISSENY, RESULTATS I ANÀLISI</b>	<b>33</b>
5.1. Disseny experimental.....	33
5.2. Models .....	36
5.2.1. Error dimensional x .....	37
5.2.2. Error dimensional y .....	43
5.2.3. Error dimensional z .....	46

5.2.4.	Rugositat.....	50
5.2.5.	Porositat.....	54
5.2.6.	Resum dels models .....	59
5.3.	Optimització multiobjectiu.....	60
5.3.1.	Optimització amb la mateixa importància.....	62
5.3.2.	Optimització amb diferents importàncies.....	63
5.3.3.	Resum de l'optimització multiobjectiu.....	65
<b>6.</b>	<b>ESTUDI I ANÀLISI DE L'ADHESIÓ ENTRE CAPES</b> .....	<b>67</b>
6.1.	Estudi previ a l'anàlisi.....	68
6.2.	Anàlisi a tracció i d'adhesió .....	73
<b>7.</b>	<b>IMPACTE AMBIENTAL</b> .....	<b>77</b>
7.1.	Emissions .....	77
7.2.	Sorolls.....	77
7.3.	Residus .....	78
<b>8.</b>	<b>COSTOS ASSOCIATS AL PROJECTE</b> .....	<b>79</b>
<b>9.</b>	<b>PLANIFICACIÓ I ORGANITZACIÓ</b> .....	<b>81</b>
	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>83</b>
	<b>AGRAÏMENTS</b> .....	<b>85</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>86</b>



## 1. Glossari

*Hotend*: element que forma part del sistema d'extrusió d'una impressora 3D que s'encarrega de subministrar calor fins a fondre el material per tal que s'extrudeixi fluidament gràcies a un motor.

*Infill*: també conegut com a farcit. Determina la quantitat de material que hi ha a l'interior de la peça que volem imprimir, és un terme relacionat amb la densitat de la peça.

*Shell*: traduït literalment significa closca. En el món de la impressió 3D, representa els contorns o perímetres exteriors amb què es dissenyen les peces per tal de protegir-les i fer-les més resistents.

## 2. Introducció

El present Treball de Final de Màster (TFM) estudia la fabricació de prototips d'ossos mitjançant impressió 3D amb polipropilè també esmentat com PP i carbonat de calci (CaCO<sub>3</sub>). S'enmarca en l'estudi del projecte BASE3D sobre fabricació additiva, amb el número 001-P-001646. En aquest treball es porta a terme l'estudi de la influència de les variables d'impressió sobre l'error dimensional i l'acabament superficial aconseguït a les peces impreses, així com una optimització d'aquestes variables. També es posen les bases per a un estudi posterior que minimitzi la problemàtica de la falta d'adhesió de les capes, descoberta durant el procés d'impressió de les provetes.

Aquest treball es constitueix d'una gran part experimental, que s'ha realitzat majoritàriament al Laboratori de Tecnologies de Fabricació de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial (ETSEIB) i també al laboratori del Grup de Recerca Aplicada en Biomecànica de l'Impacte (GRABI) de l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE). Les mesures dimensionals i de rugositat s'han dut a terme al Laboratori de Metrologia de l'ETSEIB.

### 2.1. Origen del projecte

Aquest projecte neix de la necessitat dels cirurgians traumatòlegs de fer assaigs previs a les operacions, fent servir reproduccions dels ossos en algun material que sigui fàcil d'imprimir i que tingui unes propietats tant semblants com sigui possible a la realitat. Fins ara, es feia servir ABS, acrílonitrilo butadiè estirè, però aquest material genera fums tòxics durant la seva impressió i, a més, el seu comportament als assaigs de fresatge i foradament fets pels cirurgians és bastant diferent del de l'os.

És part d'un projecte més extens, BASE3D, del qual una de les seves branques, FUSE3D, es porta a terme en col·laboració entre la UPC, el Centre Tecnològic de Catalunya conegut com a Eurecat **Error! Reference source not found.** i l'hospital Sant Joan de Déu de Barcelona, especialitzat en nens i dones [1].

### 2.2. Motivació

He crescut veient al meu pare treballar com a intermediari en un procés d'injecció de peces de plàstic, entre d'altres processos de fabricació industrial. És a dir, des de la meva infància



he estat endinsada en aquest món i he anat veient com ha anat evolucionant al llarg del temps i això m'ha fet interessar-me per les noves tecnologies, com és la impressió 3D.

Durant el transcurs del grau vaig anar sentint curiositat pels diferents processos de fabricació de peces, per aquest motiu sempre que vaig tenir l'oportunitat vaig escollir cursar assignatures relacionades amb la temàtica, com Taller de fabricació i posteriorment Sistemes de fabricació, ambdues amb la Irene Buj com a professora. A més a més, en l'assignatura de Projecte I, vaig escollir un projecte que es basava en la fabricació d'una peça amb impressió 3D i posteriorment la col·locació de LED's i la programació les seves seqüències. A més a més, també destacar l'assignatura d'estadística, de la qual hem tret molts coneixements per l'anàlisi d'aquest treball. Vaig realitzar també el Treball de Final de Grau (TFG) d'un estudi previ al vist en aquest treball amb el títol "Influència dels paràmetres d'impressió sobre l'error dimensional, la rugositat i la porositat en processos de fabricació per filament fos (FFF)" on s'estudiaven els millors paràmetres d'impressió amb PLA per tal de poder fer pròtesis de maluc. Durant el màster que s'està cursant també hi ha hagut assignatures relacionades amb la temàtica com és el cas de Sistemes integrats de fabricació, també amb la Irene Buj com a professora.

A més a més, recentment he pogut adquirir una impressora 3D personal per poder experimentar lliurement des de casa. Per tot això, aquest projecte està impulsat en una gran part per la motivació personal per aprendre més respecte a aquesta temàtica. D'aquesta manera, vaig posar-me en contacte amb la Irene per fer-li saber el meu interès i ella em va plantejar aquest treball.

### **2.3. Requeriments previs**

En la realització d'aquest treball han estat necessàries unes certes nocions prèvies d'impressió 3D apreses a les assignatures i projectes esmentats anteriorment. S'han emprat també coneixements, adquirits gràcies al TFG realitzat anteriorment i s'han ampliat considerablement al llarg d'aquest projecte. Aquests coneixements són en els programaris utilitzats al llarg de l'estudi, és a dir en: CURA, SolidWorks, Minitab, Excel i Word.

### **2.4. Objectius del projecte**

L'objectiu principal d'aquest projecte és dur a terme l'estudi i anàlisi de la influència dels paràmetres d'impressió sobre la qualitat de peces impreses de polipropilè barrejat amb

carbonat de calci, emprats per a la fabricació de prototips que reproduïen ossos, per al seu ús durant la preparació d'operacions quirúrgiques, per tal que s'assemblin el més possible a l'os. Per a fer aquesta anàlisi s'han estudiat les següents respostes sobre les provetes imprimides: l'error dimensional, la porositat i la rugositat.

Com a objectius secundaris presents al treball, podem dir que els més importants són:

- Recollir l'estat de l'art sobre la matèria, centrat principalment en el procés de fusió per modelatge fos (FDM), també anomenat fabricació per filament fos (FFF) de materials compostos de plàstic i ceràmica..
- Definir i ajudar a portar a terme assaigs experimentals d'impressió 3D de peces de PP barrejat amb carbonat de calci, entenent tots els paràmetres d'impressió i definint les respostes més adequades per estudiar la qualitat de les provetes, en aquest cas l'error dimensional, la rugositat superficial i la porositat.
- Cercar models matemàtics lineals de regressió per a cada una de les respostes per separat, veient la influència de les diferents variables, i fent una selecció d'aquelles que són significatives en cada cas per tal d'obtenir models simplificats.
- Optimitzar les tres respostes simultàniament amb els models aconseguits, és a dir, trobar una combinació de les variables escollides que minimitzi l'error dimensional i la rugositat i que s'aproximi al valor objectiu de la porositat, tot variant els valors d'importància assignats a cadascuna de les respostes.
- Posar les bases per a un futur estudi per a la millora de l'adhesió entre capes, que és una de les problemàtiques que s'han descobert al llarg de la realització dels assaigs experimentals d'impressió amb el material estudiat.

## 2.5. Abast del projecte

En aquest projecte s'ha vist com les variables d'impressió afecten sobre el resultat de les peces impreses. Com a variables s'han escollit les que acostumen a ser més significatives a l'hora d'imprimir, que són: la temperatura, la velocitat, el diàmetre de broc i l'alçada de capa. S'han mirat les tres respostes que hem comentat anteriorment: l'error dimensional, la porositat i la rugositat. No s'ha estudiat la resistència mecànica com a resposta de l'estudi d'optimització, malgrat que aquesta resposta sí que s'ha tractat a la part final del treball, sobre la millora de l'adhesió entre les capes impreses.

Com a material d'impressió, l'estudi s'ha dut a terme amb una barreja de polipropilè amb carbonat de calci. S'ha fet l'estudi per dues concentracions diferents, del 35 % i el 50 % en pes, per avaluar el seu efecte sobre els resultats. La selecció i desenvolupament del material ha estat feta per part del centre Eurecat per imitar les propietats dels ossos.

Una vegada fet l'estudi de les variables resposta, s'ha fet un estudi preliminar sobre l'adhesió entre capes impreses amb aquest material. No s'ha fet un estudi complet, però s'ha obert el camí, per tal de definir un possible assaig de resistència a tracció per a la comparació de l'adhesió de provetes impreses amb diferents condicions. Aquest estudi es podrà ampliar en futurs treballs. Un altre possible ampliació de l'estudi seria la realització d'assajos de resistència a compressió, que no s'han portat a terme en aquest treball. És a dir, tot i que l'abast de l'estudi és limitat degut al temps i recursos destinats hi ha diverses possibles vies d'investigació de cara al futur.

### 3. Estat de l'art

La fabricació additiva (AM: Additive Manufacturing) o fabricació per addició [1] respon al concepte de producció de peces tridimensionals a partir d'afegir, capa per capa, el material desitjat de manera que vagi adoptant la forma i l'aspecte desitjat. Es basa en un procés que en lloc de treure material, com serien les tecnologies de fabricació substractiva com per exemple el torneigament, el fresatge o el tall per làser, n'afegeix.

Inicialment, va anomenar-se prototipat ràpid (PR: Rapid Prototyping) on l'èmfasi estava en crear alguna cosa ràpidament i que la sortida fos un prototip o model de base del qual es derivessin altres models i, eventualment, el producte final. Però a poc a poc, amb el temps es va veure que el terme no era del tot correcte, ja que les millores en la qualitat de la producció d'aquestes màquines han fet que hi hagi un enllaç molt més proper al producte final. Per aquest motiu, en un comitè que es va dur a terme a ASTM International es va decidir canviar el nom a fabricació additiva, tot i que encara està en consens.

Avui en dia, per tant, es sol usar el terme de fabricació additiva per entorns industrials, professionals i especialitzats on seria el concepte genèric para referir-se al mètode de fabricació que consisteix en afegir capes de material fins aconseguir la forma desitjada sense implicar quina tecnologia s'utilitza per a fer-ho. I es coneix com a impressió 3D les tècniques d'àmbit més casolà, emprades per a la fabricació de components amb mida i resolució limitada, d'us més senzill i assequible gràcies a les impressores 3D.

#### 3.1. Història

El 1983, una primera idea va rondar pel cap del físic nord-americà Chuck Hull [3] i l'any següent, l'any 1984, va inscriure la seva primera patent d'estereolitografia (SLA). L'estereolitografia va ser la primera tecnologia que permetia crear un objecte 3D a partir de dades digitals. Però no va ser fins al 1986 que va fundar una empresa de prototipatge comercial, anomenada 3D Systems a Valencia, California.

En la primera patent d'Hull [4], un raig de llum ultraviolada és enfocat sobre la superfície d'un dipòsit ple de líquid fotopolímer. El raig de llum es mou sota el control d'un ordinador i



dibuixa cada capa de l'objecte sobre la superfície del líquid. On el feix toca la superfície del fotopolímer [5], aquest polimeritza i canvia d'estat a sòlid, tal com es veu en la *Figura 1*. Chuck Hull va veure que la tecnologia no es limitaria només a líquids i, per tant, va fer moltes patents relacionades amb qualsevol material capaç de solidificar o d'alterar el seu estat físic.

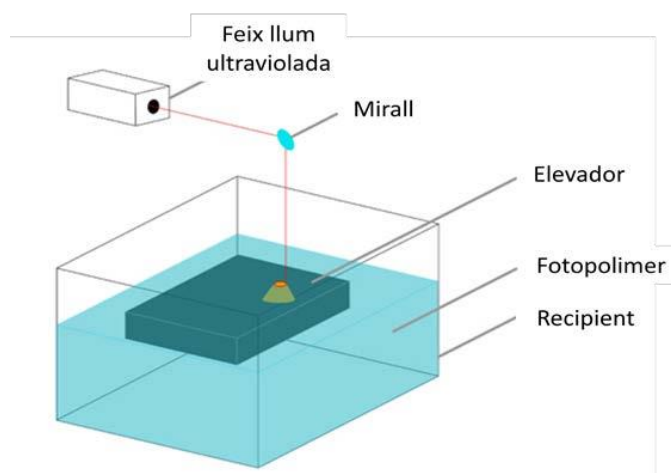


Figura 1: Representació de l'estereolitografia.

Al 1987, el professor nord-americà Carl R. Deckard [6], a la Universitat de Texas i amb l'ajut del seu assessor Joe Beaman van inventar el que es coneix com SLS o sintetitzat selectiu per làser [6].

Aquesta tècnica de fabricació additiva primerenca, es basa en la deposició d'una capa prima de pols de material sobre un tanc escalfat a una temperatura inferior però molt propera a la de fusió del material escollit. Mitjançant un làser d'alta potència es sintetitza el pols fent que les partícules es fusionin i solidifiquin, tal com es veu a la *Figura 2*. Junts van crear la start up DTM, que més endavant, al 2001 [7], va ser comprada pel seu major competidor, 3D Systems.

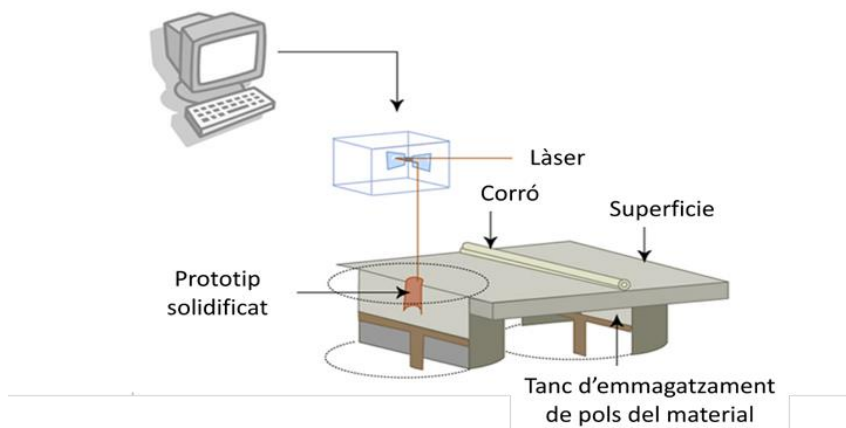


Figura 2: Representació del SLS.

El 1989, Scott Crump va presentar una de les tecnologies principals d'impressió 3D que més s'utilitza avui en dia, la deposició per deposició fosa o FDM. Ell, i la seva dona Lisa Crump, van patentar la idea i van crear l'empresa Stratasys, basada en la fabricació d'impressores 3D i sistemes de producció 3D per a prototips ràpids.

Aquesta tècnica es basa en un filament de material que inicialment s'emmagatzema en bobines, és introduït en un filtre, on aquest es fon i es diposita controladament en capes, per conformar la peça desitjada, tal com es veu en la Figura 3 a continuació.

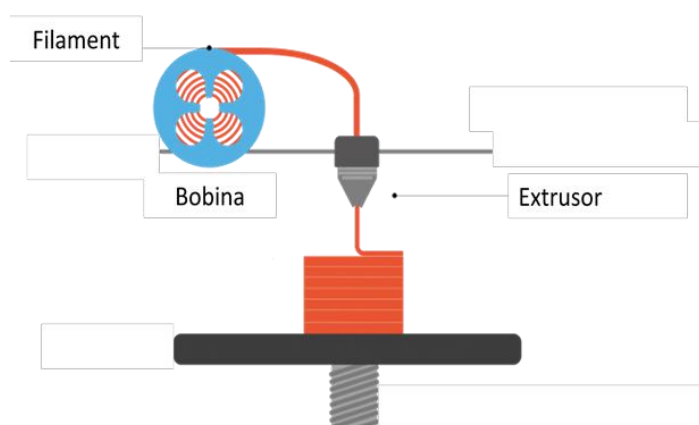


Figura 3: Representació de la tecnologia FDM.

No va ser fins al venciment de les patents de Hull, la majoria d'elles a partir del 2014 [8], que es va començar a investigar amb més profunditat i llibertat sobre aquest mètode de fabricació. Va sorgir un creixement explosiu en aquesta metodologia, principalment en sectors com la salut i la indústria aeroespacial. Permet obtenir des d'implants personalitzats, pròtesis adaptades a les necessitats de l'usuari o inclús de teixits orgànics, fins a components d'un motor d'una aeronau. També s'aplica a altres sectors com l'automoció, la indústria tèxtil, l'electrònica, la joieria etc. Últimament, s'està començant a provar en el sector alimentari, com per exemple amb xocolata o formatge [9].

### **3.2. Punts forts i febles de la tecnologia FDM**

La fabricació per filament fos (FFF) o modelatge per deposició fosa (FDM) és una tècnica amb un enorme potencial en ple procés de creixement que anirà desenvolupant-se amb el pas del temps. A dia d'avui suposa una revolució en el món de la manufactura de peces, ja que permet crear una gran varietat de geometries, amb diversos materials i característiques diferents. Les altres màquines que s'utilitzen en altres tècniques de fabricació tenen una funció específica i limitada, per aquest motiu, al variar una mica el producte final, s'ha d'adaptar o fins i tot canviar la maquinària i el procés de fabricació quasi per complet.

Es tracta una tècnica de fabricació flexible i personalitzada [10], que a més a més, no requereix d'una gran instal·lació ni d'un gran espai per a tenir-la, pel que està a l'abast de més gent.

Actualment, és una de les tècniques de fabricació més sostenible, ja que al utilitzar únicament el material d'impressió per a la fabricació de la peça, no es generen deixalles i per tant, es redueixen els processos intermedis de producció d'utilitatges i el cost d'aquests. És la única tècnica que afegeix material, enlloc de tallar i treure matèria prima. Per aquest motiu, només té despeses relacionades amb el material utilitzat, el temps d'impressió i el procés d'acabat de la peça una vegada impresa. A més a més, permet fer repiques i prototips de peces a desenvolupar per a poder estudiar-les detingudament i reduir costos de la fabricació final.

Al ser un món per explorar i a múltiples aplicacions encara per descobrir [11], serà capaç de

resoldre noves necessitats dels consumidors, crear noves places de treball i noves formes de treball. Però per altra banda, al tractar-se d'una disminució de maquinària que a més fa que sigui més accessible per a tothom, també contribueix a la disminució de llocs de treball de les plantes de manufactura actuals. Per tant, algunes companyies sortiran beneficiades i altres perjudicades per al mateix motiu.

També augmentaran els problemes amb els drets d'autor, ja que amb un escàner es pot arribar a copiar qualsevol objecte. Per aquest motiu serà més complicat controlar la rèplica de productes amb copyright. Al poder vendre qualsevol peça realitzada amb impressió 3D augmenta la competència i disminueixen els costos, a part de que no existeix control de qualitat de les peces fabricades, pel que augmenta el risc per als consumidors.

Per altra banda, també s'ha de comentar que es tracta d'una tècnica de fabricació limitada, per tant hi ha formes geomètriques més complexes que donen problemes a l'hora de fabricar, com podrien ser les rosques. A més a més, moltes vegades es necessita de suports pel moment de la fabricació i, posteriorment, de postprocessos per tal de millorar l'acabat superficial de les peces.

### 3.3. Tipus de fabricació additiva

Des que es va descobrir fins a la actualitat es coneixen diversos tipus de tecnologies que es basen en la fabricació additiva. En concret hi ha sis tipus ben diferenciats que són els que es veuen a continuació:

- Binder jetting o injecció per aglutinant
- Directed energy deposition
- Material jetting o injecció de material
- Sheet lamination o laminació de fulls
- Vat photopolymerization
- Extrusió de material





Exactament, aquest projecte estarà dins de l'àmbit de l'extrusió de material. Si es vol saber més informació respecte a la resta de tècniques es pot consultar el Treball de Final de Grau fet pel propi alumne [24].

Si ens centrem en l'extrusió de material, és una basa en la Fabricació per filament fos (FFF) o deposició per modelatge fos (FDM). És la tecnologia que s'ha usat en aquest treball de recerca per a la impressió de les provetes.

Es tracta d'una tecnologia basada en la deposició d'un material termoplàstic que es troba inicialment enrolat en una bobina a partir de fondre'l en el hotend, i extrudir-lo a través del broc. Després de ser extrudit, aquest és dipositat sobre una superfície que s'anomena llit d'impressió, el qual s'ha de mantenir a una certa temperatura perquè les capes de material s'adhereixin correctament, i que les peces tinguin una qualitat major a causa d'una adhesió millor fent que el plàstic estigui a una temperatura igual o superior a aquella en què està fos i és mal·leable. També hi ha l'opció d'usar laca de cabell creant una fina capa que augmenta l'adhesió del plàstic al llit.

La tecnologia FDM treballa amb termoplàstics dels quals destaquen el PLA (àcid polilàctic) i l'ABS (l'acronitril butadiè estirè). Aquestes impressores poden disposar d'un o més capçals, fent així possible la utilització de més d'un material alhora. Aquestes peces presenten un gran avantatge, ja que es pot triar un material per al suport que sigui soluble amb l'aigua evitant així desperfectes en la peça quan s'extreuen els suports.

També s'estan utilitzant materials que són filaments de barreja de més d'un material, sobretot material plàstic amb ceràmic, com seria el cas d'aquest projecte. Un material compost és aquell que es fa mitjançant la unió de dos o més materials per a aconseguir la combinació de propietats que no és possible obtenir amb els materials originals per separat. Com a material compost metàl·lic que s'utilitza en impressió podem descartar el copperfill de coure, el bronzefill de bronze i el steelfill d'acer [11]. I pel que fa als materials compostos ceràmics, podem trobar per exemple el material escollit en aquest treball que es tracta d'una barreja de polipropilè amb carbonat de calci.

Les impressores de 3D que usen la tecnologia FDM funcionen desplaçant els hotends en el pla horitzontal (pla XY), i es va movent verticalment (en l'eix Z) per tal d'anar fent les

successives capes de material a l'alçada que pertoca. Per tant, el moviment vertical es farà quan s'hagi completat una passada sencera en el pla XY, i anirà fent passades dipositant el material fos. També hi ha algunes impressions que van fent capes en el pla YZ i que es mouen en direcció en l'eix X, però aquestes són menys comuns.

Les impressores que usen FDM es poden classificar en: les impressores d'industrials i les d'escriptori. En el cas de les primeres es tracta de màquines grans, molt cares, amb grans toleràncies geomètriques i gran precisió, mentre que les segones són molt més assequibles, amb acabats amb qualitats menors tot i que amb els anys s'han anat millorant notablement.

## 4. Procés experimental

En els propers punts es veurà el procés experimental que s'ha dut a terme per aquest projecte i tot els recursos necessaris emprats, començant pel programari utilitzat, la maquinària emprada, el material escollit, les variables i respostes avaluades a les peces.

### 4.1. Procés experimental pas a pas

Resumint, es dissenyen les provetes sobre les quals s'ha fet l'estudi i es seleccionen les variables d'impressió que interessa avaluar i les respostes que ens interessin estudiar. Un cop fet això, es duen a terme les impressions i posteriorment es fan les mesures de les respostes i el seu estudi estadístic. En finalitzar, es decideix fer una ampliació de l'estudi fent unes proves d'adhesió entre capes.

Al diagrama de blocs que es mostra a la Figura 4 es veu un resum del procés experimental explicat i el programari i la maquinària emprada en cada pas i a continuació en els propers punts es descriu detalladament aquest procés.



Figura 4: Diagrama de blocs del procés

#### 4.1.1. Disseny de les provetes

Inicialment s'han de dissenyar les provetes que s'assajaran, amb un programa de disseny assistit per ordinador, també coneguts com a CAD (*computer-aided design and drafting*). Per aquest cas s'ha escollit el SolidWorks, ja que és un molt utilitzat al llarg del grau, però

podríem haver utilitzat per exemple el més conegut que és l'AutoCAD. SolidWorks és un programa de disseny assistit per ordinador per modelatge 2D i 3D i per tant, hem dissenyat la peça en 3D que a posteriori es vol imprimir, que es tracta d'un prisma de dimensions 10x10x20 mm, tal com es veu a la Figura 5. S'han imprès prismes, degut al fet que en una posterior ampliació i continuació del treball es volen fer assaigs de resistència mecànica a compressió. L'arxiu es guarda en format STL per a poder llegir el document en el següent programari emprat.

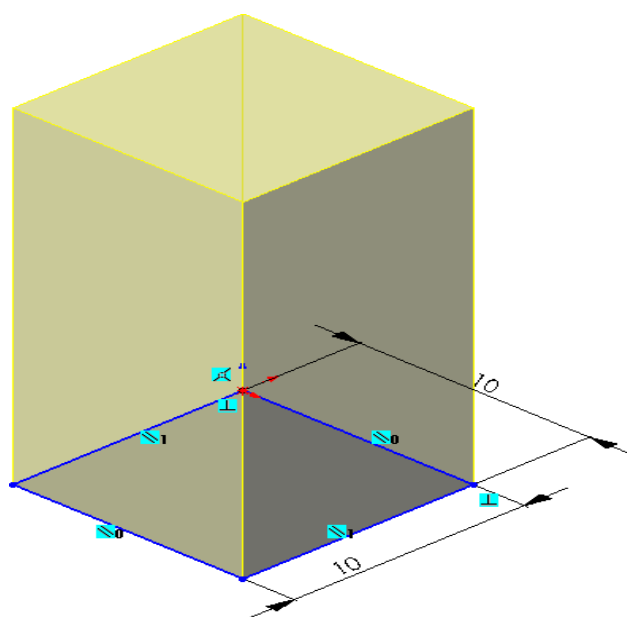


Figura 5: Croquis acotat de la peça en SolidWorks

#### 4.1.2. Sel·lecció de les variables d'impressió

Aquest fitxer STL s'ha de tractar amb un programa anomenat CURA. En aquest programa es poden seleccionar totes les variables d'impressió que ens poden interessar. Aquest programa compta amb un ampli ventall de variables a escollir, com pot ser l'alçada de capa, l'amplada de la *shell*, el grau de ventilació, l'*infill*, la temperatura d'escalfament del material, la temperatura del llit calent, la direcció i patró d'impressió i un llarg etc.

A més a més, una vegada escollides aquestes variables es genera automàticament el G-

code, és a dir el codi que s'ha d'introduir a la impressora 3D per a fer la posterior impressió. A part, podem veure en detall totes les capes i recorregut que farà la impressora en aquell cas així com el temps estimat d'impressió.

#### 4.1.3. Impressió de les provetes

Una vegada es té el G-code només s'ha de posar el codi a la impressora 3D, normalment mitjançant una targeta SD i es procedirà a imprimir la proveta amb els paràmetres escollits anteriorment.

La impressora 3D que s'ha utilitzat per a imprimir les diferents provetes ha estat la Sigma R19 de BCN 3D Technologies, que es pot veure a la Figura 6.



Figura 6: Sigma R19 de BCN 3D Technologies [12].

És una impressora d'escriptori que disposa de la millora de sistema IDEX [13]. Es tracta de dos extrusors independents l'un de l'altre, cadascú amb el seu *hotend* i que per tant, permet imprimir amb dos colors diferents alhora, amb materials diferents i fins i tot, amb dos diàmetres de broc diferents.

Pel que fa als diàmetres de broc disponibles per la Sigma R19 són: 0,3-0,4-0,5-0,6-0,8-1 mm i pot arribar a imprimir a una alçada de capa mínima de 0,5 mm. El diàmetre de filament que admet és de 2,85 mm amb una tolerància de 0,05 mm. Aquesta impressora té un volum màxim d'impressió, limitat per les dimensions del llit calent i de l'alçada d'ella, és a dir 210x297x210 mm [14]. Té una resolució de 12,5 µm en els eixos X i Y, en canvi té una de 1 µm en l'eix Z [15][13]. Pot arribar a imprimir a una temperatura de 280°C, escalfant el llit fins a 100°C.

#### 4.1.4. Anàlisi estadística

Per finalitzar, una vegada impreses totes les provetes es mesuren totes les variables resposta escollides, per tal de dur a terme posteriorment l'anàlisi estadística. La forma de mesurar les respostes està explicada posteriorment a l'apartat 3.4. Per tal de fer l'anàlisi estadística, s'han apuntat totes les proves amb els valors de les variables de cadascuna d'elles i el valors de les variables resposta mesurades al programa Minitab. Aquest programa és dissenyat per executar funcions estadístiques, des de les més bàsiques fins a altres realment complexes. S'han cercat models lineals de regressió i s'han simplificat eliminant-ne els termes un a un, començant pels menys significatius (*backward stepwise method*) [20]. Posteriorment, s'ha portat a terme una optimització multiobjectiu mitjançant el mètode de la funció d'utilitat o *Desirability function* [21].

Convé esmentar també que, al llarg de tota la fase d'anàlisi del projecte s'han emprat els dos programes del pack Office, Word i Excel, per prendre notes i guardar resultats.

#### 4.1.5. Proves adhesió

Una vegada dut a terme tot el projecte inicial, s'ha decidit procedir amb unes proves d'adhesió de les capes impreses, mitjançant un assaig de resistència a tracció, que

s'explicat a l'apartat 5.4. S'ha obert el camí a seguir investigant per aquest punt, ja que encara hi ha molt espai per la millora i descobriment de les impressió amb barreges de materials. Aquest punt es comentarà amb més profunditat més endavant.

## 4.2. Material

Les impressores 3D escalfen el material amb el qual s'ha decidit imprimir fins a una temperatura concreta que varia depenent del material escollit, la qualitat final que es vulgui donar a la peça i la velocitat d'impressió. S'escalfa el material fins que es troba en l'estat adequat per ser extrudit a través del broc i posteriorment dipositat sobre el llit calent, donant-li la forma desitjada.

A dia d'avui, les impressores són capaces d'imprimir amb una àmplia varietat de productes, des dels més coneguts com són els plàstics, com també metàl·lics, ceràmics i fins i tot productes alimentaris com pot ser per exemple formatge o xocolata.

Entre tots els possibles, s'ha escollit imprimir les provetes amb materials plàstics, ja que són els més econòmics, més fàcils d'imprimir i a més a més pràctics per a fer els prototips d'ossos que necessitem.

S'ha escollit com a material principal el polipropilè, de fórmula química  $C_3H_6$  és un polímer termoplàstic que s'obté de la polimerització de propilè **Error! Reference source not found.** També s'ha afegit un percentatge de carbonat de calci ( $CaCO_3$ ) junt amb el polipropilè. El carbonat de calci es tracta d'un compost que entra en la categoria de les oxosals, és el component principal de moltes estructures presents en els sers vius com les closques i esquelets de molts organismes [17]. Aquest material aporta una millor aproximació del prototip d'os a la realitat.

En tractar-se d'una barreja de materials poc comuna en la impressió 3D es va haver de demanar al laboratori d'Eurocat explícitament la fabricació del filament per a dur a terme el projecte. Va ser també Eurocap qui va decidir fer proves amb aquest material, ja que té una gran similitud amb els ossos i a més a més no genera fums tòxics com pot passar amb altres materials. Es van demanar dues mostres diferents, una amb un 35% de carbonat de calci i una altra amb un 50%. D'aquesta manera s'han dut a terme tots els experiments amb les dues barreges de materials per tal de veure com afecta aquest percentatge de carbonat

de calci en les respostes estudiades.

A continuació es mostra la Taula 1 on es veuen les propietats del polipropilè [16] i del carbonat de calci [17].

Taula 1: Propietats generals dels materials

Propietat	Polipropilè	Carbonat de calci
Densitat [g/cm <sup>3</sup> ]	0,85	2,711
Temperatura d'inici de fusió [°C]	173	899

### 4.3. Variables

S'ha escollit centrar l'estudi en quatre variables, aquestes són la temperatura, la velocitat, el diàmetre de broc i l'alçada de capa. Aquesta decisió ha estat presa amb l'experiència de treballs anteriors com és el meu TFG [24] o altres treballs també realitzats a la UPC [25]. En aquests treballs s'ha vist que aquestes són les variables que més interessa variar per trobar diferències significatives en els resultats, aquest aspecte es veurà reflexat a l'anàlisi.

S'ha treballat amb cadascuna d'elles dins d'un cert rang de valors en els quals es garanteix un bon funcionament, per veure com repercuteix a les variables resposta una petita variació d'aquestes variables. Aquests valors s'han fixat prou petits per al correcte funcionament de la impressora, i per altra banda, prou grans per a veure la variabilitat entre un nivell i l'altre si aquesta existeix. El rang de valors d'aquestes variables està associat a uns nivells: nivell alt (+1), baix (-1) i punt central (0).

A continuació es presenten aquestes variables i els rangs escollits per cadascuna d'elles.

#### 4.3.1. Temperatura

La primera variable és la temperatura d'extrusió del filament. Expressada en graus centígrads, es tracta de la temperatura a la que es posa el *hotend* per tal de fondre el material per a ser extrudit i dipositat posteriorment.





Per poder escollir la temperatura a la que imprimir, s'ha de tenir present que el material a fondre no es faci malbé i estigui el prou viscos per tal de ser capaç de travessar el broc i dipositar-se en la forma desitjada fent que les capes s'adhereixin correctament amb les seves contigües. No pot ser una temperatura massa elevada, ja que comprometria l'estat del material, fent que les peces resultants fossin defectuoses. I tampoc pot ser una temperatura massa baixa perquè el material s'ha de fondre per poder sortir de l'extrusor.

S'ha decidit treballar amb el rang de temperatures entre 230°C i 250°C per al cas en el qual la concentració del carbonat de calci és del 35% i en canvi, s'ha decidit que per les que tenen un 50% serà entre 250°C i 270°C. Això és degut al fet que el carbonat de calci necessita una temperatura més elevada per fondres i per tant, a l'augmentar la concentració d'aquest material hem d'augmentar la temperatura per poder extruir-lo.

#### **4.3.2. Velocitat**

La velocitat d'impressió es mesura en mm/s i es refereix a la velocitat a la que es mou el capçal de la impressora a l'hora d'imprimir les peces.

Quan més ràpid s'imprimeix, més força i pressió es situa sobre l'extrusor [18]. Aquestes poden causar vibracions i errors en la impressió, produint irregularitats fent que disminueixi la qualitat de la peça. També és cert que una velocitat baixa acostuma a obtenir resultats millors però massa baixa fa perdre el temps i per tant econòmicament no és rentable.

S'ha decidit que la velocitat variï entre el seu nivell baix de 20 mm/s i el seu nivell alt de 40 mm/s. Aquestes són les velocitats més estàndard de funcionament per impressions amb polipropilè.

#### **4.3.3. Diàmetre de broc**

Mesurat en mil·límetres, és el tamany que té la punta del *hotend*, exactament per on surt el material. Limita la quantitat de material que surt per unitat de temps, conegut com a *flow*. Per tant, quant més petit és el diàmetre de broc menys *flow* tenim. També limita l'alçada de capa, per exemple, per al PLA es recomana que l'alçada de capa estigui entre el 25 % i el

75 % del diàmetre del broc.

S'ha decidit que el diàmetre de broc serà de 0,4 per al nivell baix i de 0,8 per al nivell alt. Com s'ha comentat anteriorment, la impressora emprada per l'estudi disposa dels següents diàmetres de broc disponibles: 0,3-0,4-0,5-0,6-0,8-1 mm i és per això que s'ha escollit un valor alt i un baix, evitant els extrems per a dur a terme les proves i estudiar la seva afectació en la resposta. En la Figura 7 podem veure una diferència entre els diferents diàmetres de broc.



Figura 7: Diferents diàmetres de broc [22].

#### 4.3.4. Alçada de capa

Mesurat també en mil·límetres, es tracta de la diferència de la posició del broc en z entre una capa i la consecutiva. Amb valors alts d'alçada de capa, es nota més les diferents capes. Per tant, com més baixa sigui l'alçada de capa més qualitat té la peça però, com és d'esperar, més temps es trigarà en imprimir-se, ja que s'han de fer més capes per tal d'imprimir la mateixa alçada [19].

S'ha escollit com a nivell baix 0,1 mm d'alçada de capa i com a nivell alt 0,3 mm, és aproximadament els rangs que s'acostumen a escollir per a fer aquest tipus d'estudis, ja que són valors que permeten la correcta impressió de les peces i a més a més es prou ampli per veure variacions entre el nivell alt i el baix.

Podem veure en la Figura 8 l'efecte que té un diferent valor d'alçada de capa sobre l'aparença de la peça resultant, es poden veure les diferències a simple vista.

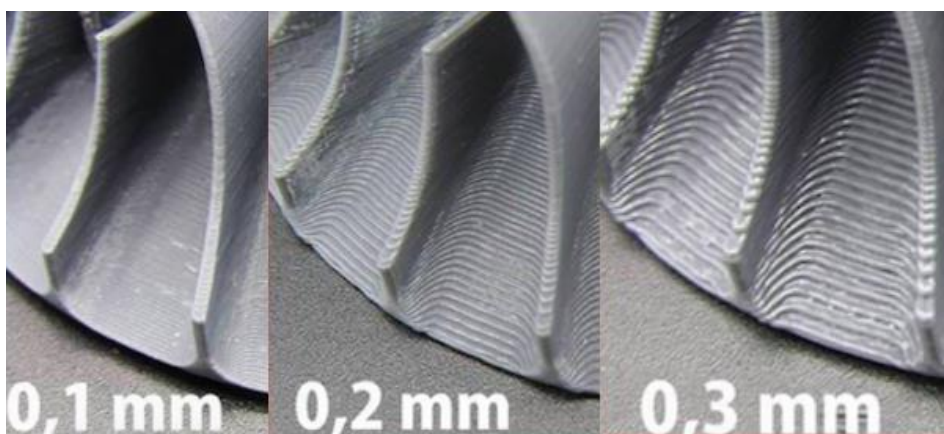


Figura 8: Imatge de l'efecte d'un canvi en l'alçada de capa sobre el resultat d'impressió [23][22].

## 4.4. Respostes

Les variables resposta fan referència a aquelles variables a estudiar sobre les provetes una vegada estan impreses. S'han considerat les més interessants d'analitzar la seva qualitat.

Aquestes variables resposta són: l'error dimensional, la rugositat i la porositat. S'explicaran a continuació i també la forma de prendre les mesures de cadascuna d'elles.

### 4.4.1. Error dimensional

L'error dimensional es tracta d'una diferència o desviació entre les mesures finals de la peça produïda i les desitjades i dissenyades inicialment. És complicat fer una peça cent per cent perfecte, ja que hi influeixen molts factors que poden afectar augmentant l'error dimensional de moltes maneres diferents.

La labor de un metròleg és la de veure si una mesura d'una peça fabricada, es troba o no, dins d'unes toleràncies especificades que garanteixen el correcte funcionament de la peça per a la funció per la qual ha estat dissenyada. És a dir, es tracta de veure si tot i tenir un cert error dimensional es pot considerar la peça com a correcte.

L'error dimensional pot estar produït per diferents factors [24]:

- Degut a l'instrument: són les causes atribuïbles al propi instrument de mesura i poden ser degudes a defectes de fabricació. Aquests poden ser per deformacions, manca de linealitat, manca de paral·lelisme, etc.
- Degut a l'operari: moltes de les causes de l'error aleatori es deuen a l'operari que realitza el mesurament. Poden ser deguts a el comportament de l'operari com les alteracions emocionals, agudesa visual, cansament, etc. I els deguts al procediment de mesura que segueix, com un error en la força exercida en efectuar mesures o per l'ús d'instrumentació inadequada.
- Degut a l'ambient de medició: destacant entre elles la temperatura, la humitat, la pols i les vibracions o interferències electromagnètiques.

En tot moment s'intenta reduir al màxim aquest error, ja que l'ideal seria tenir les mesures exactes del disseny. Això s'intentarà fent mesures precises, amb la supervisió d'un operari i en les condicions idònies de l'ambient i personals, per tal de veure l'error dimensional correctament.

Per poder fer les mesures de l'error dimensional es va utilitzar un peu de rei digital que indica les mesures en mm i dona el resultat amb dos decimals. Es va mesurar les dimensions de les provetes en els tres eixos per tal de poder obtenir tres errors dimensionals, un per cada eix. Amb aquestes mesures s'ha calculat l'error relatiu en tant per cent tal i com es mostra en l'Eq.1 on  $x_0$  és el valor ideal i  $x$  el valor real mesurat experimentalment.

$$\frac{(|x-x_0|)}{x_0} \cdot 100$$

Eq. 1

#### 4.4.2. Rugositat

La rugositat és el conjunt d'irregularitats que posseeix una superfície. La major o menor rugositat d'una superfície depèn principalment del seu acabat superficial. En general, caldrà realitzar correccions sobre l'error de forma o les ondulacions que poden posseir les superfícies degut al seu procés de fabricació fent un procés de postfabricació on s'intentarà millorar aquest acabat.

Es pot qualificar la rugositat amb diversos paràmetres: Ra, Rz, Rku i Rsk. En aquest treball parlarem en tot moment de Ra o rugositat mitjana aritmètica.

La Ra o rugositat mitjana aritmètica és la desviació mitjana aritmètica del perfil. Es mesura en  $\mu\text{m}$  i es representa amb l'alçada de la línia vermella de la Figura 9. És la línia que deixa la mateixa àrea per sobre que per sota del perfil en valor absolut.

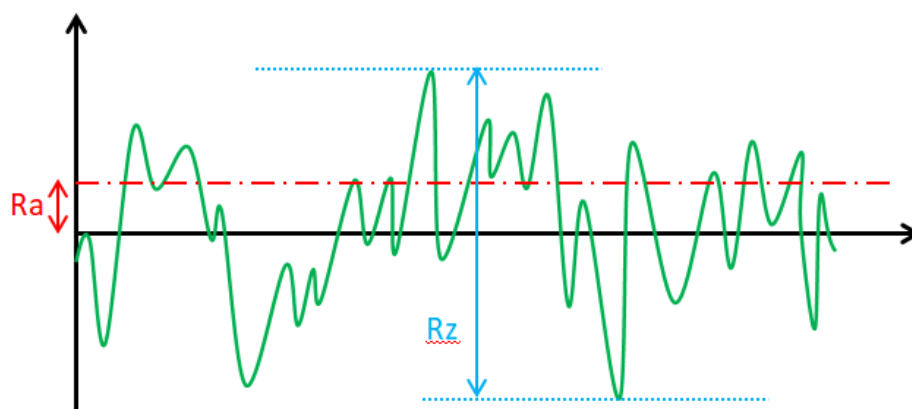


Figura 9: Representació d'un perfil de rugositat amb els paràmetres.

En aquest treball, la rugositat es mesura amb un rugosímetre de contacte, concretament un Taylor Hobson Talysurf 2. Aquest instrument es compon d'una agulla amb la punta, generalment de diamant per evitar el desgast per us, que palpa a la perfecció els pics i les valls tal com es pot veure a la Figura 10. També conté un captador, que registra tots els moviments verticals de l'agulla.

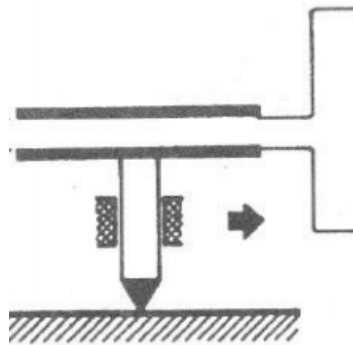


Figura 10: Representació del perfil d'un rugosímetre.

El rugosímetre emprat crea un informe on es recullen totes les dades. Aquest informe s'anomena informe de Taylor Hobson i un exemple d'un perfil mesurat seria el que es mostra en la Figura 11.

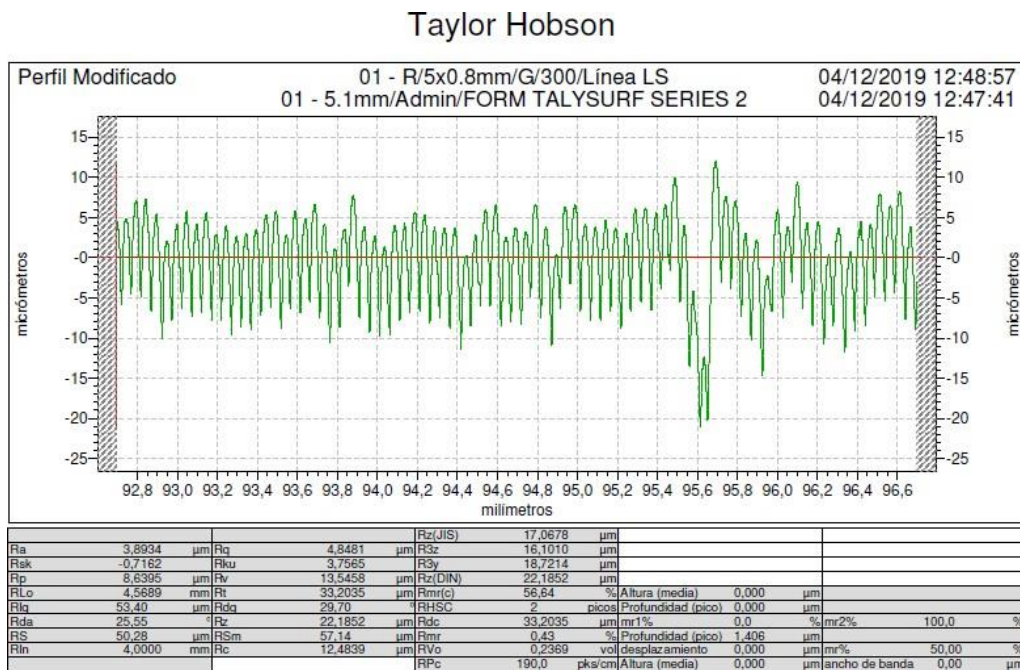


Figura 11: Exemple d'un informe de Taylor Hobson.

#### 4.4.3. Porositat

La porositat o fracció de buits és una mesura d'espais buits en un material. De fet, porus ve del llatí *porus* i significa forat petit.

En aquest cas, per tal de trobar la porositat de les provetes primer de tot s'ha calculat la densitat de la barreja de material. Per poder calcular la densitat real de les provetes hem dividit el pes de les provetes entre el seu volum, el qual el vam trobar multiplicant les mesures extreptes de les provetes. Podem veure imatges del moment de presa de dades en la Figura 12.



Figura 12: Imatges de la presa de dades per tal de calcular la densitat real.

Per tal de calcular la densitat aparent inicialment es va calcular mitjançant les densitats de cada material i tenint en compte el percentatge de cada material i que les provetes s'ha imprès amb un 80% d'*infill*. Però es va veure que no és un valor rigorós, ja que el material pot tenir defectes com concentració d'aire, d'umitat, etc que fagin variar aquest valor. A més a més, també al considerar el 80% d'*infill* no es té en compte que les provetes tenen *shell* i

això també afecta directament a la densitat. Per aquest motiu es van agafar dos trossos de filament, un del 35% de concentració de carbonat de calci i l'altre del 50% i es van pesar i mesurar amb un peu de rei de la forma més exacta possible. Amb les mesures i tenint en compte que la secció del filament és circular es va poder calcular el volum i d'aquesta manera amb el pes es van poder extreure els valors de densitat aparent del material que es veuen a la Taula 2.

Densitat aparent PP +35%CaCO <sub>3</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Densitat aparent PP +35%CaCO <sub>3</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
1,185	1,5

Taula 2: Valors de la densitat aparent del material.

Trobat aquests valors trobem l'*infill* fent la densitat real dividida entre l'aparent i obtindrem el valor en percentatge. I per tant, per trobar la porositat només haurem de fer la diferència entre el 100% i aquest valor.



## 5. Disseny, resultats i anàlisi

En cop decidides per una banda, les variables a experimentar i el rang de cadascuna d'elles i, per altra banda, les respostes que més interessin i el seu comportament ideal, es procedeix al següent pas. En aquest s'ha de decidir el disseny adequat per a realitzar l'estudi, dur-lo a terme i analitzar els resultats obtinguts per saber quines variables són les desitjades per als nostres prototips d'ossos. Per això es cerquen models de regressió lineal per a cadascuna de les respostes i, posteriorment es fa una optimització multiobjectiu tenint en compte totes les respostes alhora.

En els propers punts s'explicarà un a un tots els passos de l'anàlisi experimental mencionat i es veuran els resultats extrets.

### 5.1. Disseny experimental

Primer de tot, cal definir el disseny factorial que s'estudiarà. Els dissenys factorials permeten estudiar l'efecte de cada factor sobre cada variable resposta, així com l'efecte de les interaccions entre factors sobre aquesta variable.

Aquests dissenys poden ser complets o fraccionats. Com s'explica a capítol *The 2k factorial design* del llibre *Design and analysis of experiments* de Douglas C. Montgomery [20], els dissenys són complets quan es duen a terme tots els experiments de totes les combinacions possibles dels seus factors. Mentre que són fraccionats si s'ometen experiments d'algunes de les combinacions possibles per tal de disminuir la quantitat de treball, temps o diners a gastar en el projecte.

Un sistema factorial fraccionat es defineix mitjançant la seva resolució, com es veu a la Figura 13. Aquesta variarà en funció del nombre de factors del disseny i de com de reduïda fem la matriu d'experiments, és a dir de quants experiments deixem de fer respecte al sistema complet. Les resolucions de disseny descriuen en quin grau els efectes d'un disseny factorial formen estructures d'àlies amb altres efectes, és a dir, en quin grau es poden confondre els seus efectes entre ells i amb les seves interaccions. Quan s'executa un



possibilitat que les respostes variïn de manera quadràtica en lloc de lineal.

S'ha escollit fer un disseny factorial 24 complet i aleatoritzat amb tres punts centrals. És a dir, com tenim quatre variables (temperatura, velocitat, diàmetre de broc i alçada de capa), fer els setze experiments que serien totes les combinacions possibles dels dos nivells de cada variable (-1 i +1), i afegir-hi tres rèpliques en els que es posaran totes les variables al seu valor central (0). Fent, d'aquesta manera, un total de dinou experiments aleatoritzats. Com s'ha escollit un sistema factorial complet, tenim un sistema de resolució V.

Interessa aleatoritzar qualsevol sistema factorial. L'aleatorització és una tècnica que s'utilitza per equilibrar l'efecte de condicions externes o no controlables, que poden influir en els resultats d'un experiment.

El DOE escollit per tant és el que es mostra a la Taula 3 amb els valors codificats amb -1 per al rang baix i +1 per al rang alt.

Taula 3: DOE del projecte amb els valors codificats.

Ordre	Temperatura	Velocitat	Diàmetre de broc	Alçada de capa
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1
17	0	0	0	0

18	0	0	0	0
19	0	0	0	0

Si volem el DOE sense codificar, és a dir amb els valors que prenent les variables, és el que es mostra a la Taula 4 a continuació.

Taula 4: DOE del projecte amb els valors sense codificar.

Ordre	Temperatura (°C)	Velocitat (mm/s)	Diàmetre de broc (mm)	Alçada de capa (mm)
1	230	20	0,4	0,1
2	250	20	0,4	0,1
3	230	40	0,4	0,1
4	250	40	0,4	0,1
5	230	20	0,8	0,1
6	250	20	0,8	0,1
7	230	40	0,8	0,1
8	250	40	0,8	0,1
9	230	20	0,4	0,3
10	250	20	0,4	0,3
11	230	40	0,4	0,3
12	250	40	0,4	0,3
13	230	20	0,8	0,3
14	250	20	0,8	0,3
15	230	40	0,8	0,3
16	250	40	0,8	0,3
17	240	30	0,6	0,2
18	240	30	0,6	0,2
19	240	30	0,6	0,2

## 5.2. Models

Després, una vegada definit el disseny escollit s'ha fet l'anàlisi estadística dels resultats amb el Minitab per descobrir quines variables són significatives per cada una de les variables resposta del projecte. A més a més, en tots els casos s'ha buscat el model per cada una de

les respostes, aquell que tingui el millor ajust i que sigui el més simplificat possible obviant variables que no afectin a la resposta de forma directe.

Un model és una relació entre les variables estudiades que defineix de la millor manera una resposta específica. Primer de tot es mira el model incloent-hi tots els efectes principals de les quatre variables estudiades i totes les interaccions d'aquestes variables fins a segon ordre, ja que el disseny escollit té resolució V, i per tant, cap efecte principal o interacció de dos factors forma estructura d'àlies amb cap altre efecte principal o interacció de dos factors i d'aquesta manera s'han evitat les confusions.

La cerca de models és un procés iteratiu, ja que una vegada trobat el model amb totes les variables, s'ha d'anar simplificant traient els termes menys significatius un a un fins trobar un model simplificat que sigui el més semblant a la realitat possible. En tot moment, s'ha d'assegurar que l'ajust sigui mantenint-se elevat i que l'extracció d'aquestes variables no afecti negativament al model. Per obtenir els models simplificats s'ha seguit el mètode *stepwise* amb *backward elimination*, eliminant els termes un per un, començant per aquell que sigui menys significatiu [20].

### 5.2.1. Error dimensional x

Les mesures de l'error dimensional en l'eix x en mm per als dinous experiments duts a terme per cada una de les dues concentracions de carbonat de calci escollides són les que es veuen a continuació a la Taula 5.

Taula 5: Mesures experimentals de l'error dimensional en l'eix x.

Proveta	Error dimensional x per a un 35% de $\text{CaCO}_3$	Error dimensional x per a un 50% de $\text{CaCO}_3$
1	1,00	1,20
2	0,80	1,20
3	1,30	1,40
4	1,30	0,90
5	0,00	1,60

6	0,70	2,30
7	0,50	0,20
8	0,40	0,20
9	2,80	3,50
10	2,70	2,30
11	2,10	2,70
12	3,20	2,10
13	0,50	1,10
14	0,00	1,80
15	0,30	0,20
16	0,80	0,30
17	0,30	1,60
18	1,10	0,40
19	0,90	1,60

Podem veure com el valor inferior és un error dimensional 0, és a dir que les dimensions són exactament les proposades idealment al disseny. Mentre que el valor més alt que trobem és d'un error relatiu del 3,2%.

Introduint aquests resultats al Minitab hi podem veure els diagrames de Pareto de la Figura 14 per a la concentració del 35% de carbonat de calci i la Figura 15 per a la concentració del 50%.

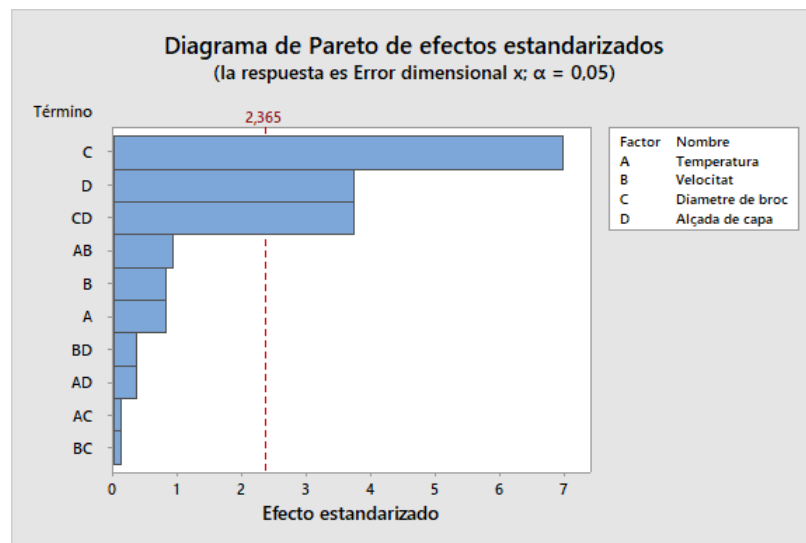


Figura 14: Pareto sense simplificar de l'error dimensional x per una concentració de  $\text{CaCO}_3$  del 35%.

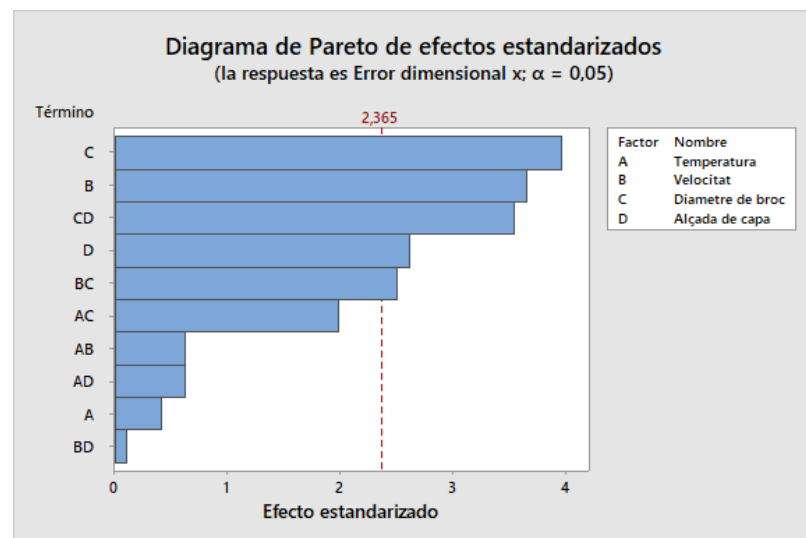


Figura 15: Pareto sense simplificar de l'error dimensional x per una concentració de  $\text{CaCO}_3$  del 50%.

En aquests dos casos obtenim un ajust del 79,55% i del 73,23% respectivament, és a dir

aquestes variables descriuen el comportament del model de manera prou acurada. Vist això comencem a eliminar els termes menys significatius de cada cas fins obtenir el model reduït, sense disminuir el valor de l'ajust. Fent això trobem el Pareto de la Figura 16 i de la Figura 17 amb un ajust del 86,17% i del 73,45% respectivament, veiem que aquests ajustos han augmentat a l'eliminar variables no significatives. Podem veure el model per la concentració de carbonat de calci del 35% en en l'Eq. 2 i el de la concentració del 50% en l'Eq. 3.

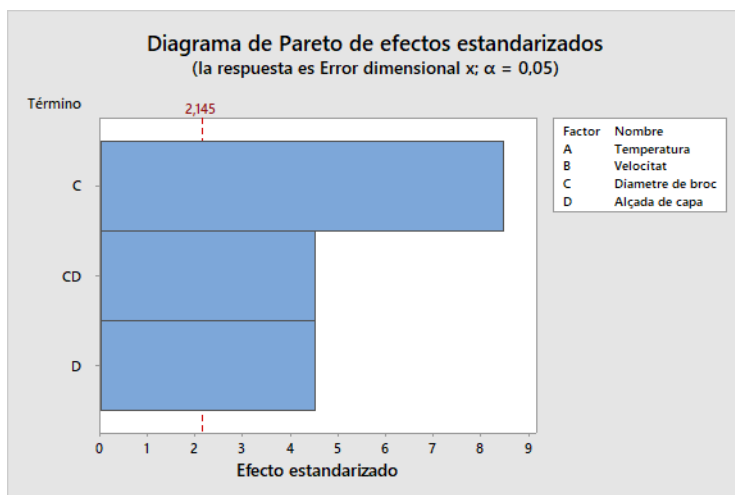


Figura 16: Pareto simplificado de l'error dimensional x per una concentració de CaCO<sub>3</sub> del 35%.

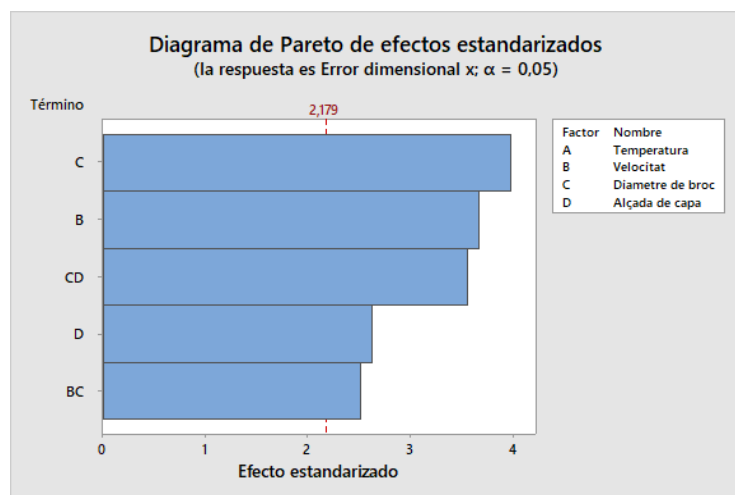




Figura 17: Pareto simplificat de l'error dimensional x per una concentració de CaCO<sub>3</sub> del 50%.

$$\text{Error dimensional } x = 1,1500 - 0,7500 \text{ Diàmetre de broc} + 0,4000 \text{ Alçada de capa} - 0,4000 \\ \text{Diàmetre de broc} * \text{Alçada de capa} - 0,383 \text{ Pt Ctral}$$

Eq. 2

$$\text{Error dimensional } x = 1,437 - 0,437 \text{ Velocitat} - 0,475 \text{ Diàmetre de broc} + 0,313 \text{ Alçada de capa} - \\ 0,300 \text{ Velocitat} * \text{Diàmetre de broc} - 0,425 \text{ Diàmetre de broc} * \text{Alçada de capa} - 0,238 \text{ Pt Ctral}$$

Eq. 3

S'han deixat de treure variables arribats a aquest punt perquè treure'n més significava una reducció de l'ajust del model, és a dir, el model s'ajustava pitjor a la realitat. En ambdós casos veiem que el diàmetre de broc així com l'alçada de cada es queden en el model, així com també la seva interacció. Té sentit a simple vista aquest resultat, ja que com hem vist al comentar les variables, una alçada de capa major implica que es veuen més clarament les capes i per tant es produeix rugositat indesitjada i un possible error dimensional. El mateix passa amb el diàmetre de broc, depenent del tamany que tingui pot afectar de la mateixa forma que l'alçada de capa.

D'aquest model veiem com afecten els efectes principals i les interaccions a la resposta, apareixen en gris aquelles que hem decidit que no són significatives. Es poden veure els resultats d'aquest estudi pel 35% de CaCO<sub>3</sub> en la Figura 18 i pel 50% en la Figura 19.

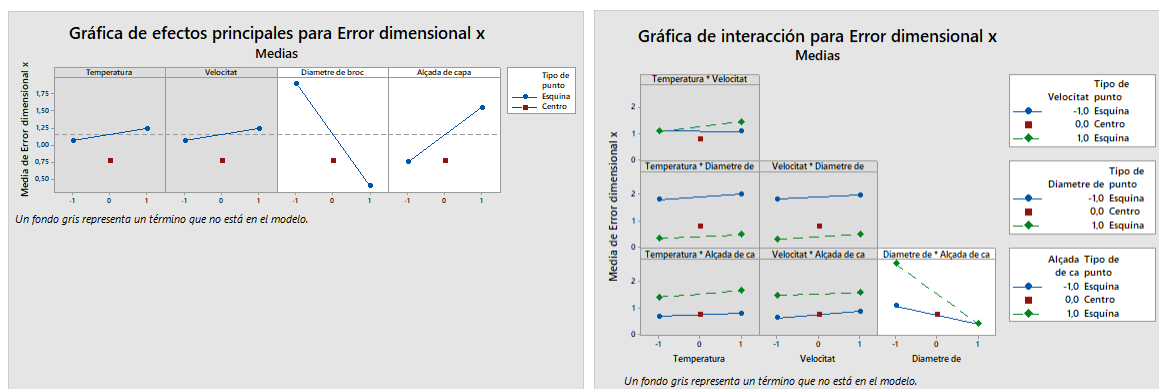


Figura 18: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per l'error dimensional en x per la concentració del 35% de CaCO<sub>3</sub>

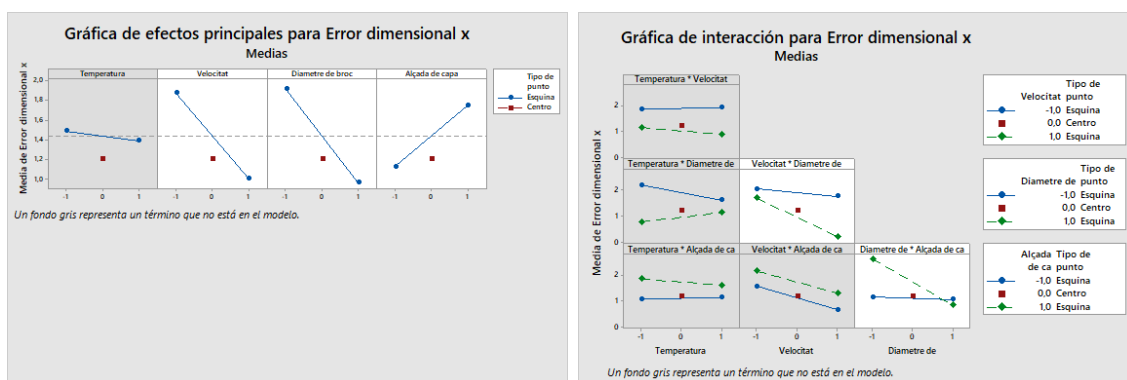


Figura 19: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per l'error dimensional en x per la concentració del 50% de CaCO<sub>3</sub>.

Es pot veure com les variables afecten de manera molt semblant a les dues concentracions de carbonat de calci. En ambdós casos, per reduir l'error dimensional es necessita un diàmetre de broc de nivell alt, és a dir de 0,8 mm i una alçada de capa de nivell baix, és a dir del 0,1 mm. A més a més, pel cas del 50% de CaCO<sub>3</sub> també ens interessa la velocitat al nivell alt, és a dir de 40 mm/min. Mirant les interaccions la més significativa és la CD, és a dir diàmetre\*alçada de capa, amb aquesta podríem dir que si tenim l'alçada de capa al nivell alt ens interessa que el diàmetre també estigui al nivell alt, d'aquesta manera reduim l'error dimensional considerablement.



## 5.2.2. Error dimensional y

Repetirem el procediment per l'error dimensional en l'eix y mesurat en mm. Les mesures de l'error dimensional en l'eix y per als dinous experiments duts a terme per cada una de les dues concentracions de carbonat de calci escollides són les que es veuen a la Taula 6.

Taula 6: Mesures experimentals de l'error dimensional en l'eix y.

Proveta	Error dimensional y per a un 35% de CaCO <sub>3</sub>	Error dimensional y per a un 50% de CaCO <sub>3</sub>
1	0,40	0,60
2	1,50	0,50
3	0,70	0,80
4	0,80	0,30
5	0,70	1,20
6	0,80	1,50
7	0,00	0,80
8	0,20	0,90
9	3,00	2,80
10	3,20	2,40
11	2,50	3,40
12	2,40	2,90
13	0,50	2,00
14	0,10	1,10
15	0,60	0,30
16	1,00	1,10
17	1,00	1,30
18	0,50	0,90
19	1,00	0,70

Introduint aquests resultats al Minitab i podem veure els diagrames de Pareto de la Figura 20 a l'esquerra per a la concentració del 35% de carbonat de calci i a la dreta la per la concentració del 50%.

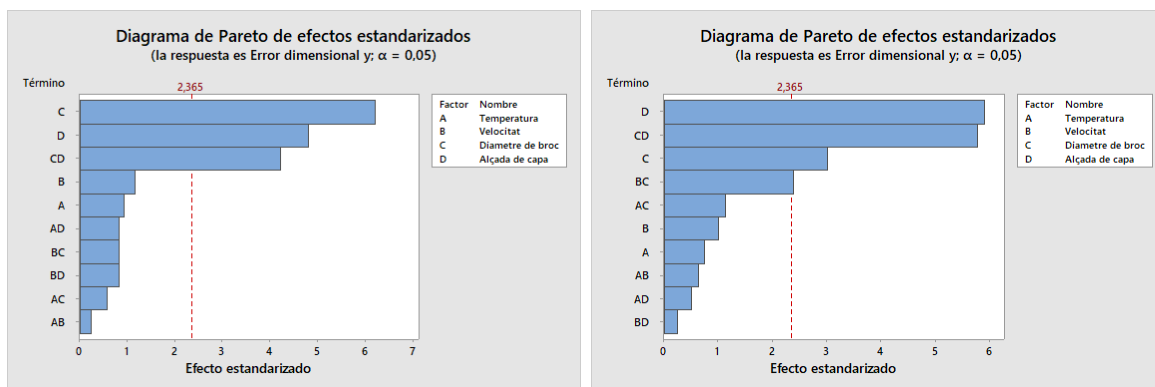


Figura 20: Pareto sense simplificar de l'error dimensional y per una concentració de CaCO<sub>3</sub> del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.

En aquests dos casos obtenim un ajust del 80,58% i del 81,47% respectivament, és a dir aquestes variables descriuen correctament el comportament del model. Eliminant els termes menys significatius de cada cas fins obtenir el model reduït, com es veu a la Figura 21 trobem els models reduïts amb un ajust del 83,80% i del 78,43% respectivament. Generalment, parariem de retirar variables quan el valor disminueix però s'ha decidit no fer així pel cas on la concentració del carbonat de calci és del 50%, ja que eliminant un gran nombre de variables disminuïa l'ajust només en un 3% i per tant valia la pena.

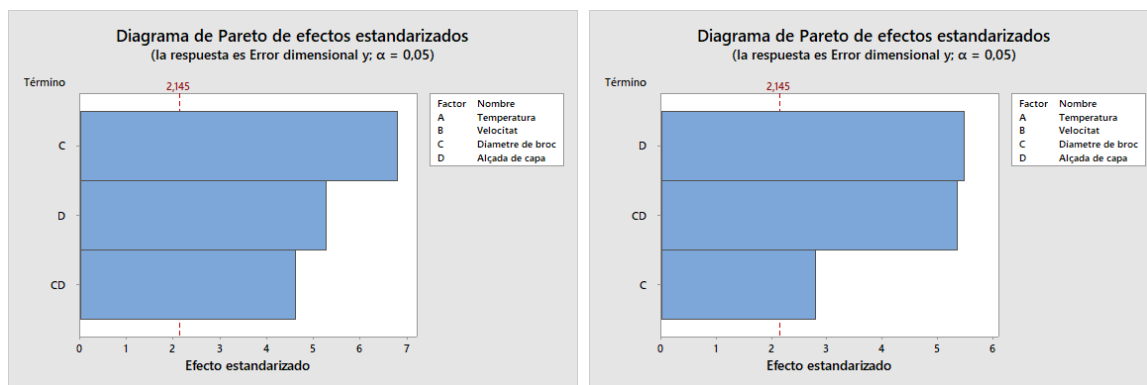


Figura 21: Pareto simplificat de l'error dimensional y per al 35% de CaCO<sub>3</sub> a l'esquerra i 50% a la dreta.

Podem veure el model a seguir en l'Eq. 4 a continuació per la concentració del 35% i en l'Eq. 5 per al 50%.

$$\text{Error dimensional } y = 1,1500 - 0,6625 \text{ Diàmetre de broc} + 0,5125 \text{ Alçada de capa} - 0,4500 \text{ Diàmetre de broc} * \text{Alçada de capa} - 0,317 \text{ Pt Ctrl}$$

Eq. 4

$$\text{Error dimensional } y = 1,412 - 0,300 \text{ Diàmetre de broc} + 0,587 \text{ Alçada de capa} - 0,575 \text{ Diàmetre de broc} * \text{Alçada de capa} - 0,446 \text{ Pt Ctrl}$$

Eq. 5

D'aquests models reduïts veiem com afecten els efectes principals a la resposta i també les interaccions, com s'ha comentat anteriorment apareixen en gris aquelles que hem decidit que no són significatives. Es poden veure els resultats d'aquest estudi pel 35% de CaCO<sub>3</sub> en la Figura 22 i pel 50% en la Figura 23.

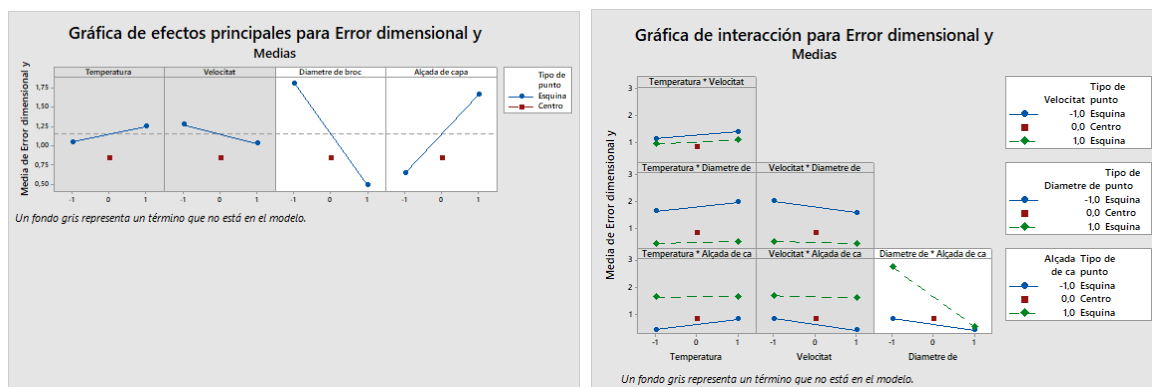


Figura 22: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per l'error dimensional en y per la concentració del 35% de CaCO<sub>3</sub>.

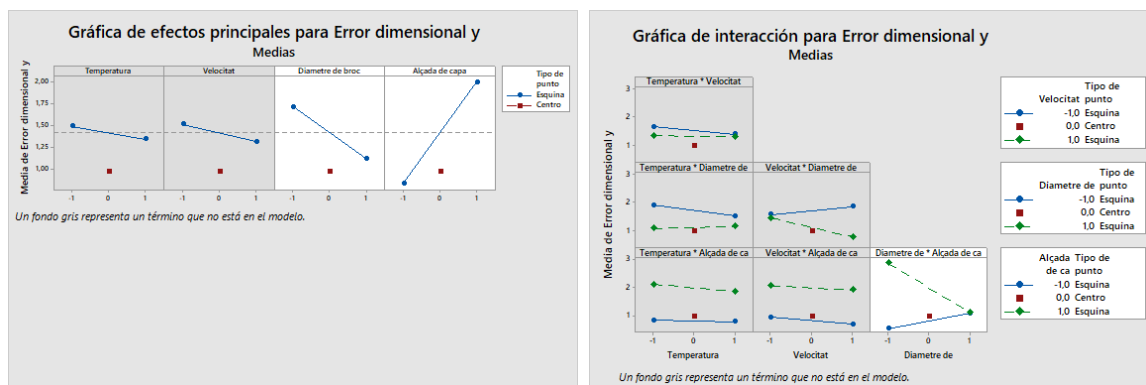


Figura 23: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per l'error dimensional en y per la concentració del 50% de CaCO<sub>3</sub>.

Podem veure com les variables afecten de forma exactament igual a les dues concentracions de carbonat de calci, les mateixes variables són significatives i han de tenir el mateix valor per reduir l'error dimensional. En ambdós casos per reduir aquesta variable resposta, veiem que necessitem un diàmetre de broc de nivell alt, és a dir de 0,8 mm i una alçada de capa de nivell baix, és a dir del 0,1 mm. Si mirem les interaccions només hi ha una que ens interessa avaluar i es la CD, és a dir diàmetre\*alçada de capa, amb aquesta podem dir que si tenim l'alçada de capa al nivell alt ens interessa que el diàmetre també estigui al nivell alt, d'aquesta manera reduïm l'error dimensional considerablement.

Observem que tot és exactament igual que a l'error dimensional de l'eix x vist anteriorment, per tant confirmem el que esperàvem trobar, al tractar-se d'un prisma no hi ha distinció entre l'eix x i el y, ja que ambdós mesuren el mateix i per tant és correcte que ens dongui el mateix pels dos.

### 5.2.3. Error dimensional z

Repetirem el procediment per l'error dimensional en l'eix z, és a dir en el vertical. Les mesures de l'error dimensional en l'eix z en mm per cada una de les dues concentracions de carbonat de calci són les que es veuen a la Taula 7.



Taula 7: Mesures experimentals de l'error dimensional en l'eix z.

Proveta	Error dimensional z per a un 35% de CaCO <sub>3</sub>	Error dimensional z per a un 50% de CaCO <sub>3</sub>
1	0,05	0,15
2	0,35	0,20
3	0,35	0,30
4	0,25	0,30
5	0,15	0,35
6	0,10	0,35
7	1,15	0,55
8	1,20	0,25
9	0,35	0,30
10	0,50	0,25
11	0,25	0,60
12	1,05	0,50
13	0,75	0,25
14	0,15	0,20
15	0,35	0,40
16	0,90	1,15
17	0,35	0,25
18	0,30	0,55
19	0,20	0,50

Introduint aquests resultats al programari d'anàlisi estadística podem veure els diagrames de Pareto de la Figura 24 a l'esquerra per a la concentració del 35% de carbonat de calci i a la dreta la per la concentració del 50%.

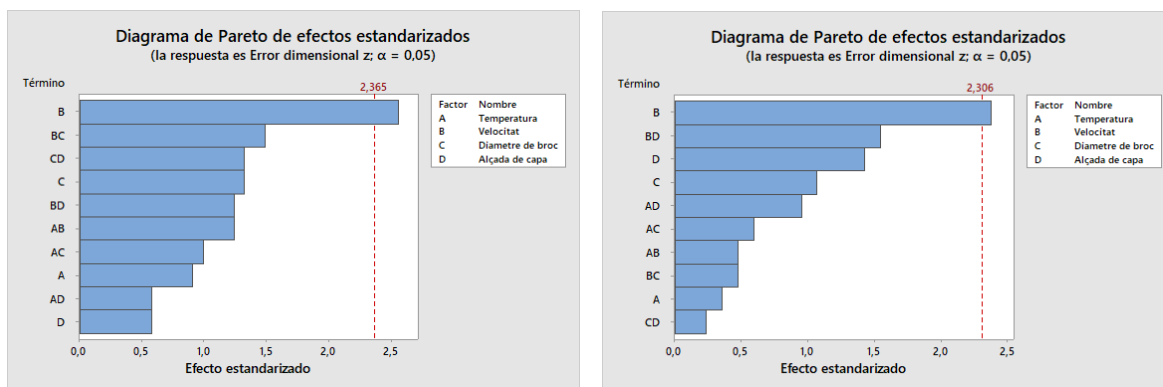


Figura 24: Pareto sense simplificar de l'error dimensional z per una concentració de  $\text{CaCO}_3$  del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.

En aquests dos casos obtenim un ajust inferior a la resta de respostes, és a dir aquestes variables no descriuen el comportament del model d'una forma gaire acurada. Eliminant els termes menys significatius de cada cas fins obtenir el model reduït, augmenta aquest ajust però segueixen sent valors baixos. En l'error dimensional en l'eix z veiem que no podem treure moltes variables al reduir els models i a més a més l'ajust es bastant dolent, és a dir el model no descriu la realitat de forma acurada, veiem aquest model en la Figura 25.

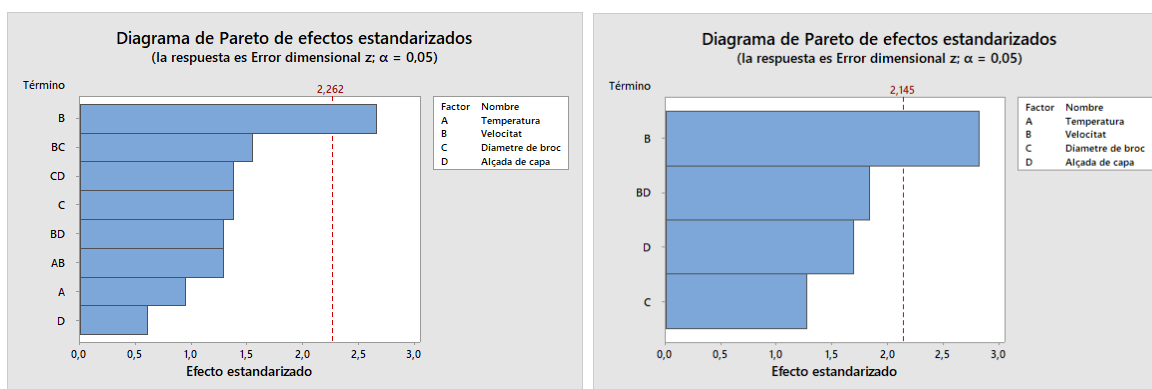


Figura 25: Pareto simplificat de l'error dimensional z per una concentració de  $\text{CaCO}_3$  del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.



Podem veure l'equació que representa el model simplificat a la Eq. 6 a continuació per al 35% i en l'Eq. 7 per al 50% de carbonat de calci:

Error dimensional  $z = 0,4938 + 0,0687 \text{ Temperatura} + 0,1937 \text{ Velocitat} + 0,1000 \text{ Diàmetre de broc} + 0,0438 \text{ Alçada de capa} + 0,0937 \text{ Temperatura*Velocitat} + 0,1125 \text{ Velocitat*Diàmetre de broc} - 0,0937 \text{ Velocitat*Alçada de capa} - 0,1000 \text{ Diàmetre de broc*Alçada de capa} - 0,210 \text{ Pt Ctral}$

Eq. 6

Error dimensional  $z = 0,3895 + 0,1250 \text{ Velocitat} + 0,0562 \text{ Diàmetre de broc} + 0,0750 \text{ Alçada de capa} + 0,0813 \text{ Velocitat*Alçada de capa}$

Eq. 7

D'aquests models reduïts veiem com afecten els efectes principals a la resposta i també les interaccions, com s'ha comentat anteriorment apareixen en gris aquelles que hem decidit que no són significatives. Es poden veure els resultats d'aquest estudi pel 35% de  $\text{CaCO}_3$  en la Figura 26 i pel 50% en la Figura 27.

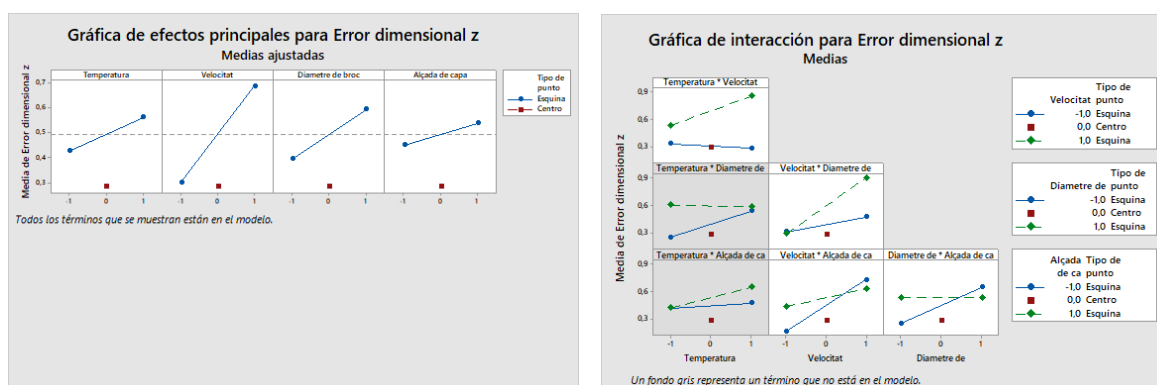


Figura 26: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per l'error dimensional en z per la concentració del 35% de  $\text{CaCO}_3$ .

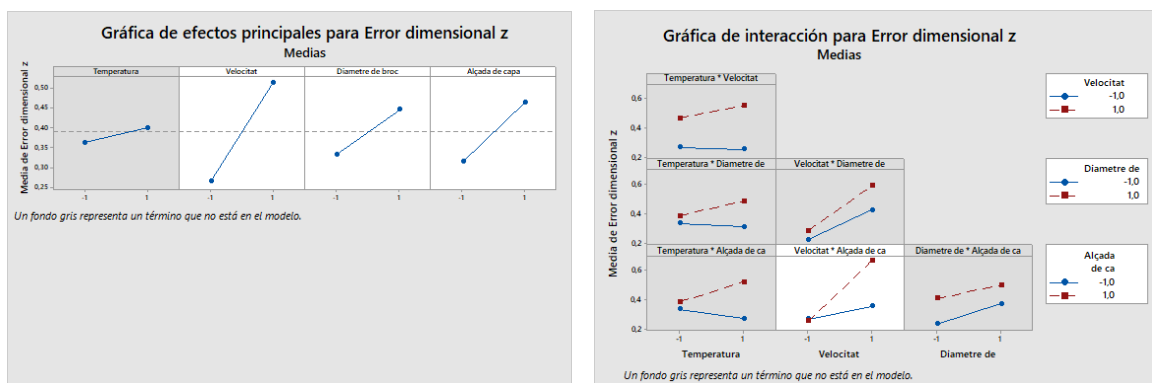


Figura 27: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per l'error dimensional en z per la concentració del 50% de CaCO<sub>3</sub>.

Podem veure com les variables afecten de forma semblant en les dues concentracions de carbonat de calci. En ambdós casos per reduir aquesta variable resposta, veiem que necessitem totes les variables en el nivell baix, tot i que la temperatura no és significativa pel cas del 50% de CaCO<sub>3</sub>. En ambdós casos, mirant els diagrames de Pareto veiem que la variable més important a reduir és la velocitat. La velocitat d'impressió afecta en el refredament del material una vegada dipositat, si imprimim a velocitats altres no refredem del tot el material abans de dipositar-hi una altra capa, per tant és lògic que apareguin diferències en l'error dimensional z, és a dir al que se'l pot relacionar amb el pes. Podem veure les interaccions com afecten a la resposta però no entraré en detall, ja que pel nivell d'ajust per aquesta variable es molt baix.

### 5.2.4. Rugositat

Tornem a fer la mateixa anàlisi per la rugositat. Les mesures d'aquesta variable resposta per als dinous experiments per les dues concentracions de carbonat de calci són les que es veuen a la Taula 8.

Taula 8: Mesures experimentals de la rugositat.



Proveta	Rugositat per a un 35% de CaCO <sub>3</sub>	Rugositat per a un 50% de CaCO <sub>3</sub>
1	8,02	7,89
2	10,19	7,72
3	9,57	8,39
4	9,34	8,29
5	7,04	8,60
6	8,83	10,78
7	7,26	8,89
8	7,71	9,08
9	22,04	22,25
10	21,46	21,39
11	21,24	21,45
12	21,38	22,29
13	21,92	19,69
14	19,81	19,11
15	19,36	20,25
16	19,25	20,33
17	13,57	17,36
18	13,53	13,89
19	13,85	13,63

Introduint aquests resultats al Minitab i podem veure els diagrames de Pareto de la Figura 28 a l'esquerra per a la concentració del 35% de carbonat de calci i a la dreta la pel 50%.

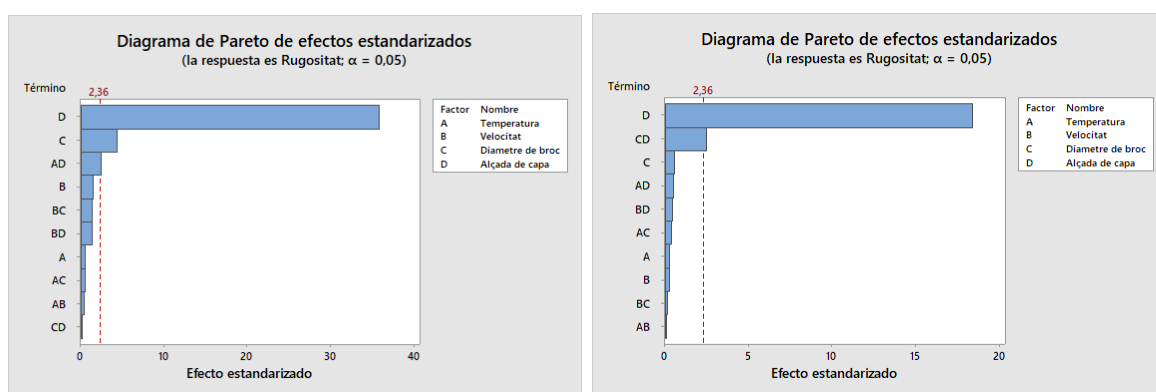


Figura 28: Pareto sense simplificar de la rugositat per una concentració de CaCO<sub>3</sub> del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.

En aquests dos casos obtenim un ajust del 98,65% i del 94,90% respectivament, és a dir aquestes variables descriuen el comportament del model d'una forma casi perfecte. Eliminant els termes menys significatius de cada cas fins obtenir el model reduït, com es veu a la Figura 29 trobem els models reduïts amb un ajust del 98,57% i del 97,79% respectivament.

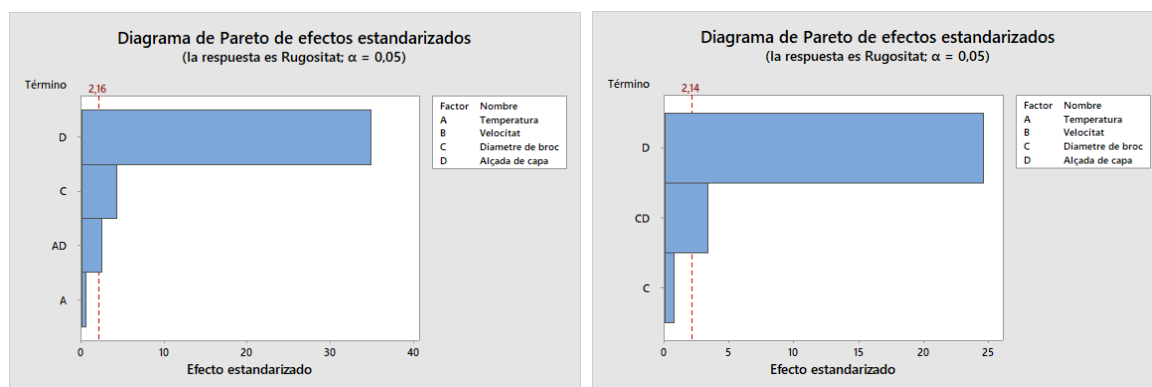


Figura 29: Pareto simplificat de la rugositat per una concentració de CaCO<sub>3</sub> del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.

Podem veure a l'Eq. 8 el model d'aquesta resposta per la concentració del 35% i en l'Eq. 9 per al 50% de carbonat de calci:

$$\text{Rugositat} = 17,852 - 0,856 \text{ Velocitat} - 6,549 \text{ Diàmetre de broc} + 0,471 \text{ Alçada de capa}$$

Eq. 8

$$\text{Rugositat} = 27,614 - 3,556 \text{ Diàmetre de broc} + 1,179 \text{ Alçada de capa}$$

Eq. 9

D'aquests models reduïts veiem com afecten els efectes principals a la resposta i també les



interaccions. Es poden veure els resultats d'aquest estudi pel 35% de  $\text{CaCO}_3$  en la Figura 30 i pel 50% en la Figura 31.

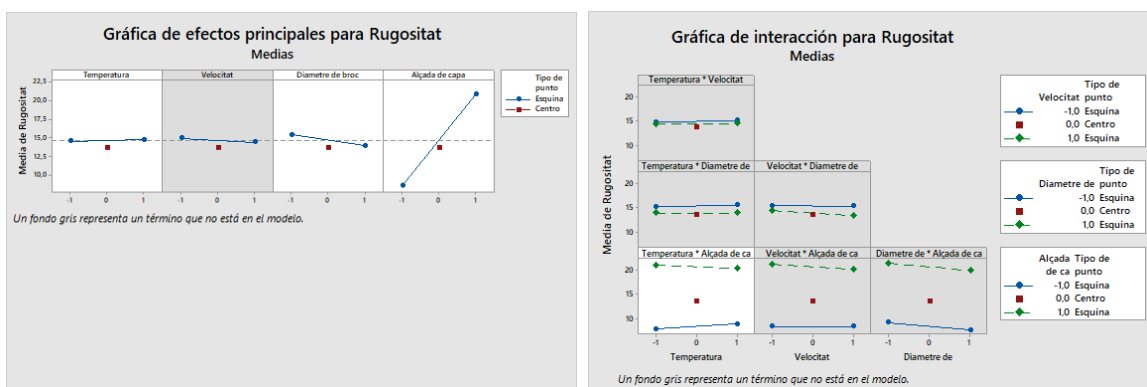


Figura 30: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per la rugositat pel 35% de  $\text{CaCO}_3$ .

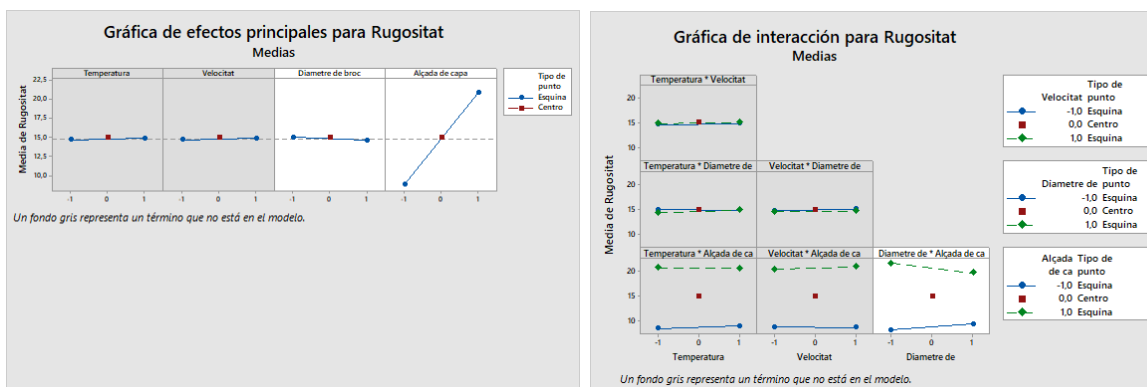


Figura 31: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per la rugositat pel 50% de  $\text{CaCO}_3$ .

En ambdós casos, veiem que l'alçada de capa es la variable més significativa i amb molta diferència respecte a la resta. És per aquest motiu que s'ha decidit estudiar que passaria si només deixéssim aquesta variable per descriure el model i treiéssim tota la resta com es mostra a la Figura 32. En aquest cas l'ajust del model seria del 96,66% i del 95,46%

respectivament. Veiem que el valor de l'ajust només disminueix un 2% aproximadament en els dos casos i per tant, podríem dir que també es un bon model, ja que tenint una sola variable es segueix tenint un ajust molt elevat.

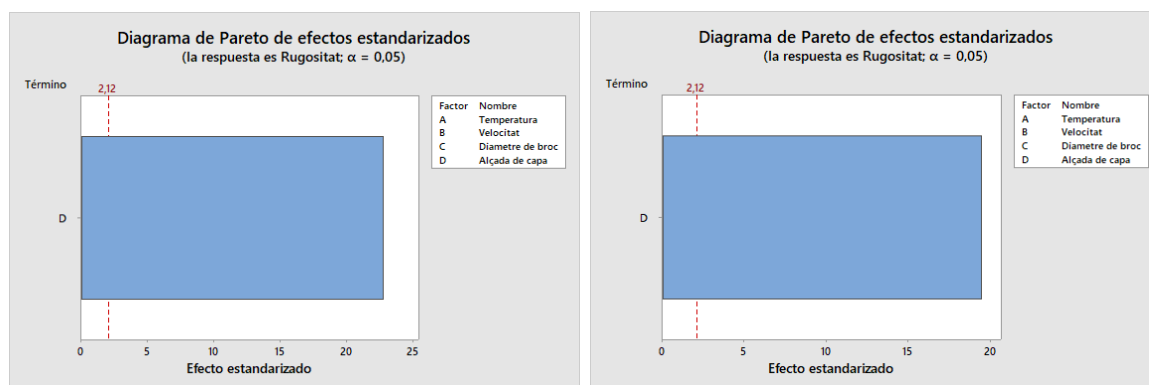


Figura 32: Pareto del model el màxim simplificat possible de la rugositat per una concentració de  $\text{CaCO}_3$  del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.

Com hem comentat, l'alçada de capa és el paràmetre més important. En els dos casos necessitem que estigui en el seu valor baix per poder disminuir la rugositat. Podem assegurar per tant, el que hem comentat anteriorment, que és que la rugositat està directament relacionada amb l'alçada de capa, ja que a més alçada de capa, més espai hi ha entre una i la posterior i per tant més arc del material extrudit veiem i això provoca un augment en la rugositat. Podem veure com afecten la resta de variables i d'interaccions a les figures esmentades anteriorment, però ja veiem que no aporten un gran valor a l'ajust del model.

### 5.2.5. Porositat

Repetim l'anàlisi però aquest cop amb les mesures de porositat. Les mesures d'aquesta variable resposta per als dinou experiments per les dues concentracions de carbonat de calci són les que es veuen a la Taula 9. Com hem comentat anteriorment, l'*infill* és del 80% per tant l'objectiu de porositat és del 20% i per aquest motiu veurem els valors calculats

aproximadament d'aquest valor.

Taula 9: Mesures experimentals de la porositat.

Proveta	Porositat per un 35% de CaCO <sub>3</sub>	Porositat per un 50% de CaCO <sub>3</sub>
1	21,81	29,83
2	25,20	29,68
3	21,96	30,98
4	23,36	29,07
5	13,97	23,89
6	14,70	25,94
7	10,77	23,03
8	10,56	23,34
9	27,33	34,72
10	26,32	32,13
11	26,40	33,54
12	26,11	33,70
13	12,87	26,88
14	10,75	24,50
15	10,28	24,35
16	9,82	24,80
17	14,82	26,34
18	16,37	23,90
19	15,78	24,03

Introduint aquests resultats al Minitab s'hi pot veure els diagrames de Pareto de la Figura 33 a l'esquerra per a la concentració del 35% de carbonat de calci i a la dreta la per la concentració del 50%.

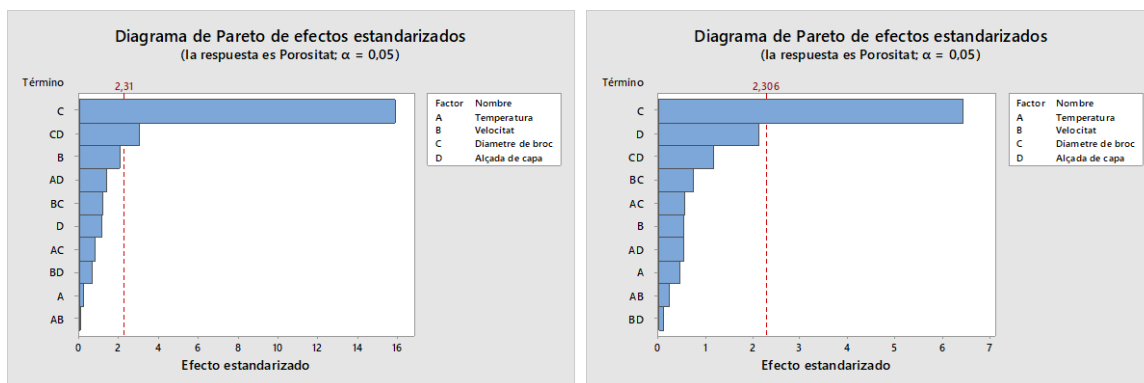


Figura 33: Pareto sense simplificar de la porositat per una concentració de CaCO<sub>3</sub> del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.

En aquests dos casos s'obté un ajust del 93,59% i del 68,45% respectivament, és a dir aquestes variables descriuen de forma correcta el comportament del model. Eliminant els termes menys significatius de cada cas fins obtenir el model reduït, com es veu a la Figura 34 es troben els models reduïts amb un ajust del 94,21% i del 79,56% respectivament.

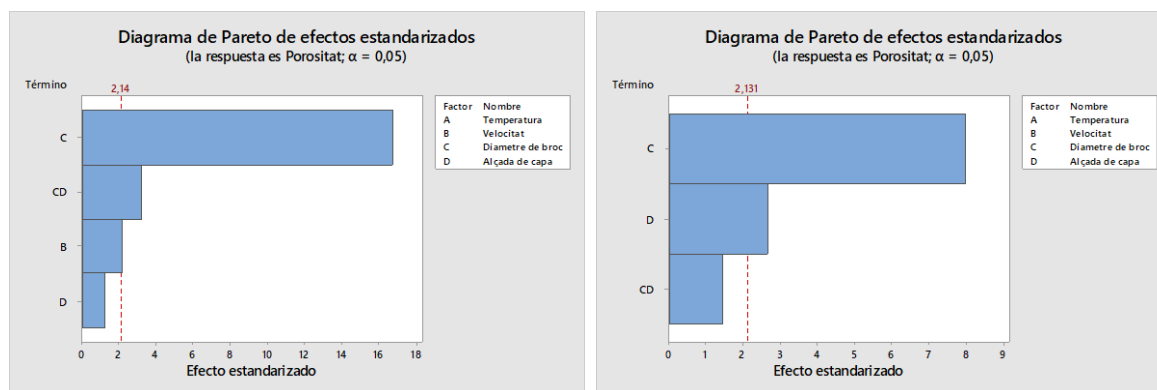


Figura 34: Pareto simplificat de la porositat per una concentració de CaCO<sub>3</sub> del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.

Podem veure a l'Eq. 10 el model d'aquesta resposta per la concentració de carbonat de calci





del 35% i en l'Eq. 11 pel 50%:

$$\text{Porositat} = 14,649 + 0,096 \text{ Temperatura} - 0,754 \text{ Diàmetre de broc} + 6,156 \text{ Alçada de capa} - 0,427 \text{ Temperatura} * \text{Alçada de capa} - 1,004 \text{ Pt Ctrial}$$

Eq. 10

$$\text{Porositat} = 14,772 - 0,185 \text{ Diàmetre de broc} + 6,069 \text{ Alçada de capa} - 0,817 \text{ Diàmetre de broc} * \text{Alçada de capa} + 0,188 \text{ Pt Ctrial}$$

Eq. 11

D'aquests models reduïts veiem com afecten els efectes principals a la resposta i també les interaccions. Es poden veure els resultats d'aquest estudi pel 35% de CaCO<sub>3</sub> en la Figura 35 i pel 50% en la Figura 36.

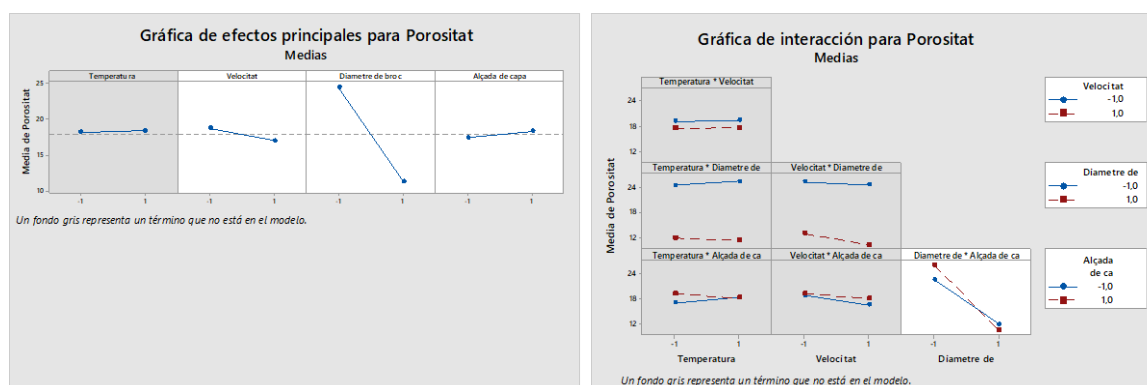


Figura 35: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per la porositat per la concentració del 35% de CaCO<sub>3</sub>.

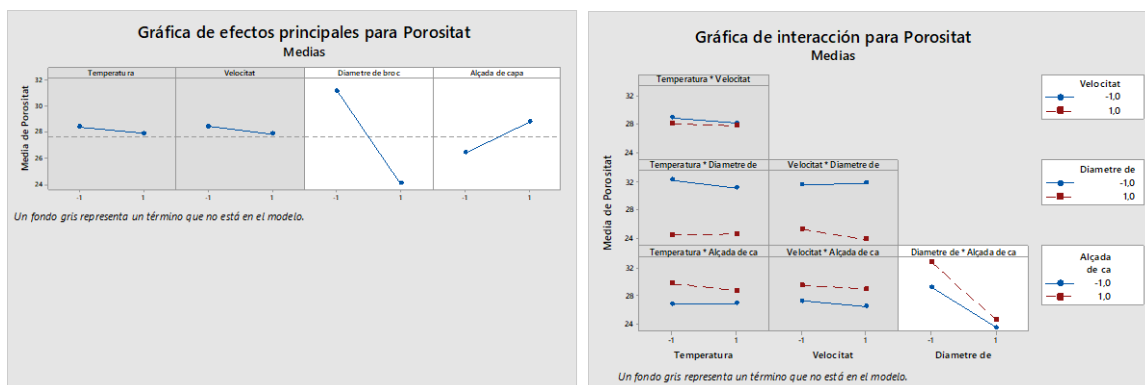


Figura 36: Gràfica d'efectes principals i de les interaccions per la porositat per la concentració del 50% de  $\text{CaCO}_3$ .

En ambdós casos, veiem que el diàmetre de broc és la variable més significativa i amb molta diferència respecte a la resta. És per aquest motiu que s'ha decidit estudiar que passaria si només deixéssim aquesta variable per descriure el model i treiéssim tota la resta com es mostra a la Figura 37. En aquest cas l'ajust del model seria del 89,60% i del 66,72% respectivament. Veiem que el valor de l'ajust només disminueix un 5% pel cas de la concentració del 35% i un 15% pel cas del 50%.

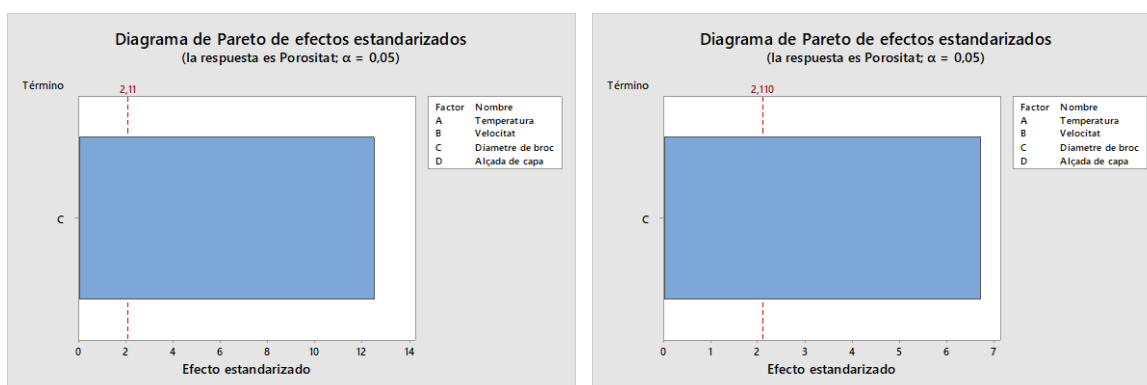


Figura 37: Pareto del model el màxim simplificat possible de la porositat per una concentració de  $\text{CaCO}_3$  del 35% a l'esquerra i d'un 50% a la dreta.

Com hem comentat, el diàmetre de broc és el paràmetre més important. Ens interessa obtenir un valor del 20% de porositat o aproximar-nos al màxim possible, per tant veiem que pel cas de la concentració del carbonat de calci del 35% ens interessarà el nivell del punt central (0), ja que és el que més s'aproxima al valor objectiu de porositat. Pel que fa al cap de la concentració de carbonat de calci del 50% voldrem el diàmetre de broc clarament al nivell alt i tot i així estarem conseguint valors de porositat allunyats de l'objectiu.

### 5.2.6. Resum dels models

Vist tot el punt anterior podem fer una taula resum per agrupar tota la informació i tenir una imatge global del nivell d'interès de les variables per tal de millorar cada una de les variables resposta. Es mostra a continuació a la Taula 10 on el nivell alt es representa amb un +1, el nivell baix amb un -1, el punt central amb un 0 i quan hi ha algun dels nivells entre parèntesis vol dir que aquella variable no és tant significativa com la resta tot i que entra dins del model escollit.

Taula 10: Taula resum dels models.

Resposta	Concentració de CaCO <sub>3</sub>	Temperatura	Velocitat	Diàmetre de broc	Alçada de capa
Error dimensional en l'eix x	35%			+1	-1
	50%		+1	+1	-1
Error dimensional en l'eix y	35%			+1	-1
	50%			+1	-1
Error dimensional en l'eix z	35%	-1	-1	-1	-1
	50%		-1	-1	-1
Rugositat	35%	(-1)		(+1)	-1
	50%			(-1)	-1
Porositat	35%		(-1)	0	(+1)
	50%			+1	-1

Per inspecció directa, podem observar que en tots els casos interessa una alçada de capa baixa per tal d'aconseguir les respostes desitjades, però tal com s'ha comentat anteriorment, principalment per reduir la rugositat i per ajudar a disminuir l'error dimensional.

També s'observa com l'altre variable més important és el diàmetre de broc, ja que és significatiu en la major part de respostes. Per reduir l'error dimensional del pla xy es voldrà un diàmetre de broc elevat però per reduir l'error dimensional de l'eix z es preferirà un diàmetre de broc menor. Per la rugositat i porositat dependrà de quina barreja de material es tracti, ja que es comporten de forma diferent.

Es pot observar com la temperatura i la velocitat són les variables menys significatives respecte a les quatre seleccionades ja que són variables que s'acostumen a treure al moment de fer el mètode *stepwise* amb *backward elimination*.

### 5.3. Optimització multiobjectiu

En el punt anterior s'ha realitzat un estudi per optimitzar cada una de les respostes per separat. Però en general, és inusual trobar un sistema on només una sola resposta necessiti ser optimitzada, en canvi, freqüentment s'han de considerar varies respostes alhora.

En un estudi estadístic per fer una optimització multiobjectiu de dues o més variables resposta es fa servir la funció d'utilitat coneguda com *desirability function*. Aquesta funció varia si es busca maximitzar, estar al voltant d'un valor objectiu o minimitzar la resposta. A continuació en la Figura 38 es poden veure les tres opcions d'optimització que ofereix Minitab. A l'esquerra es mostra com s'aproxima una resposta que es vol minimitzar, a la dreta una que es vol maximitzar i al centre una que es vol mantenir al voltant d'un valor.

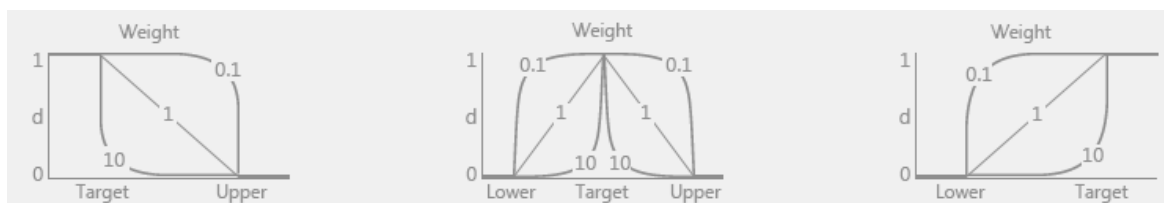


Figura 38: Opcions d'optimització de Minitab.

A Minitab, en fer l'optimització multiobjectiu s'han de fixar dos valors, la importància i la ponderació. La importància és un valor que es troba entre 0 i 10. Com més alt sigui el valor, abans prioritzarà el Minitab aquella resposta enfront de les altres. La ponderació permet modificar la corba de la funció *desirability*, fent que s'aproximi a una recta o a una corba tal com es veu en la *Figura 38*. En aquest treball la ponderació s'ha mantingut en tot moment com la recta de pendent 1 mentre que s'han fet diferents proves variant la importància.

Abans de començar, s'ha d'especificar que aquesta optimització només s'ha fet per les tres variables resposta que són l'error dimensional en l'eix x, la porositat i la rugositat. Presa aquesta decisió, s'ha d'especificar l'òptim de cada resposta, tal com s'ha comentat anteriorment en les variables resposta s'introdueix aquests objectius al Minitab, com es veu en la *Figura 39*.

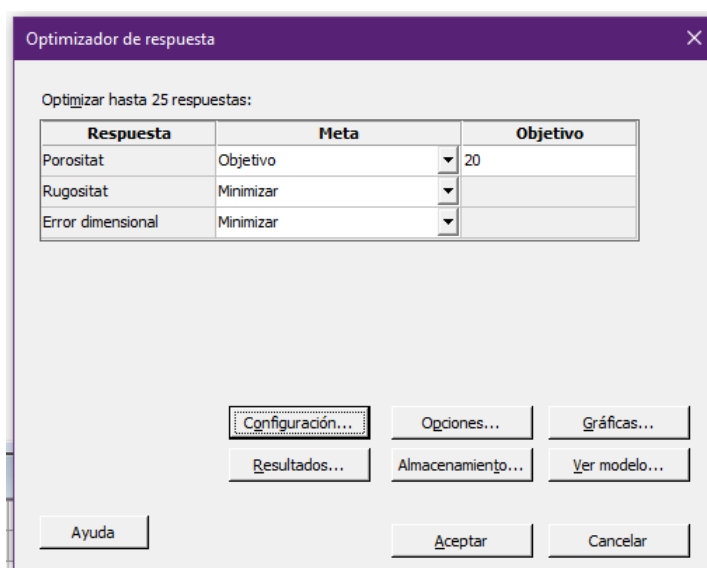


Figura 39: Optimizador de les respostes amb els seus valors objectius.

En els propers punts es veuran els resultats obtinguts en el cas de fixar la mateixa importància per totes les variables respostes i en el cas de donar una importància major a cadascuna d'elles.

### 5.3.1. Optimització amb la mateixa importància

En aquest apartat s'ha considerat que totes les respostes tenen la mateixa importància. Aquest valor de ponderació pot ser qualsevol entre 0 i 10, tal com s'ha esmentat anteriorment, però s'ha fixat en 1 ja que és el valor que fica el Minitab per defecte.

Mitjançant la funció *desirability* del Minitab s'ha realitzat l'optimització multiobjectiu i podem veure els resultats obtinguts per a les provetes que tenen un 35% de concentració de carbonat de calci en la Figura 40 i per les provetes que tenen un 50% de carbonat de calci en la Figura 41.

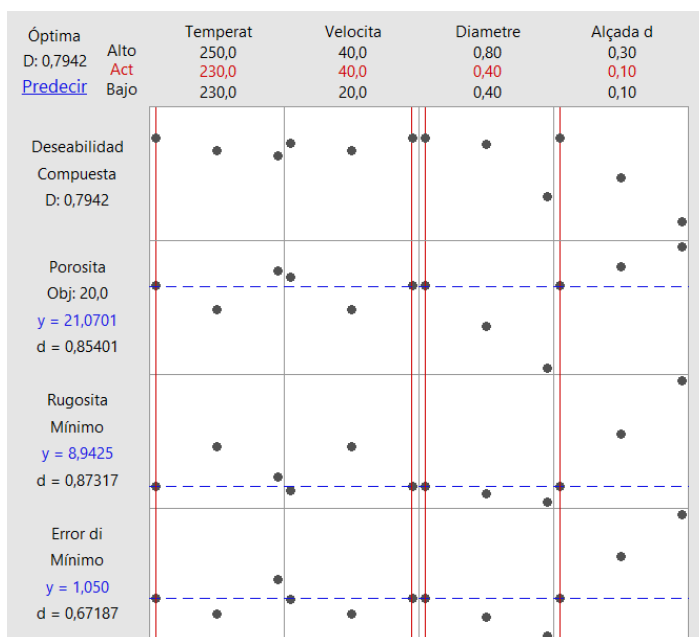


Figura 40: Captura Optimització multiobjectiu amb la mateixa importància pel 35% de CaCO<sub>3</sub>.

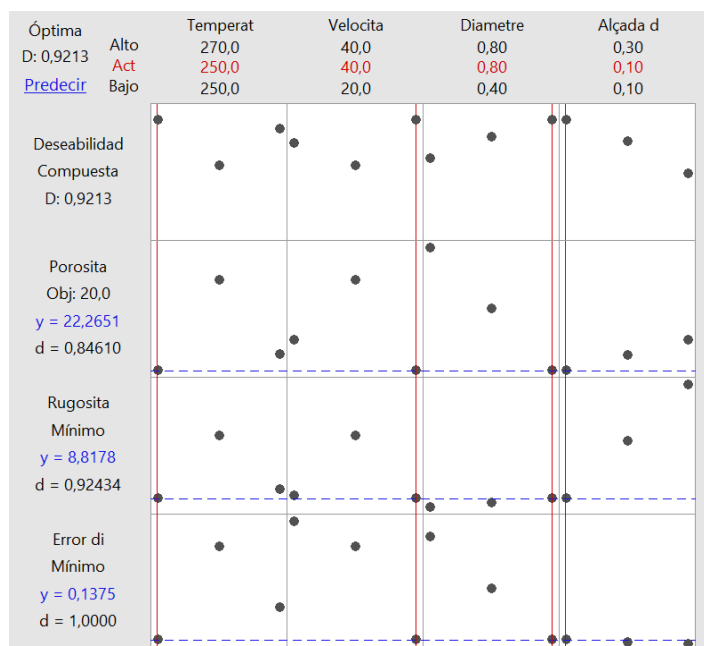


Figura 41: Captura Optimització multiobjectiu amb la mateixa importància pel 50% de  $\text{CaCO}_3$ .

Primer de tot veiem que el valor de la funció representa el grau de compliment dels objectius especificats amb el valor de les variables que ens indica, aquest valor és de 0,7942 pel 35% de  $\text{CaCO}_3$  i de 0,9213 pel cas del 50%. Aquest valor sempre varia entre el 0 i el 1, sent aquest últim un perfecte compliment dels objectius. Per aquest motiu, es pot dir que aquesta optimització compleix correctament els objectius desitjats.

Veurem el resum del resultat de tots els casos al finalitzar aquesta anàlisi.

### 5.3.2. Optimització amb diferents importàncies

Una vegada trobat l'òptim per a la mateixa importància s'ha buscat l'òptim per a cadascuna de les tres respostes. Es fixarà la ponderació a un valor de 1 per a tots els casos, i es canviarà la importància d'una resposta a 10 en cada cas.

Farem aquesta anàlisi augmentant la importància de l'error dimensional per les dues concentracions de carbonat de calci, tal com es veu en Figura 42. Posteriorment per la

rugositat en la Figura 43 i el mateix per la porositat en la Figura 44.

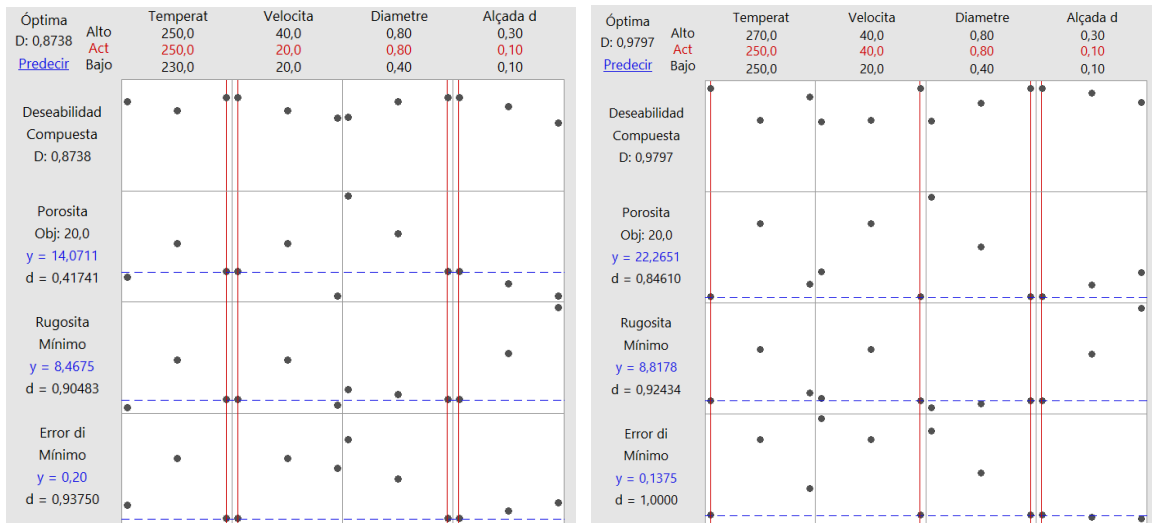


Figura 42: Captura Optimització multiobjectiu amb major importància a l'error dimensional.

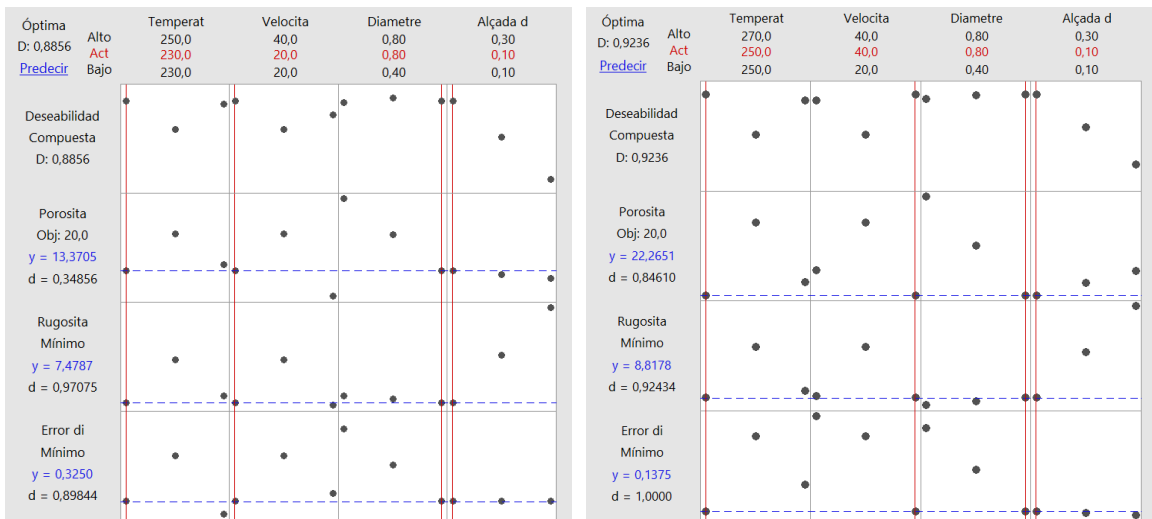


Figura 43: Captura Optimització multiobjectiu amb major importància a la rugositat.



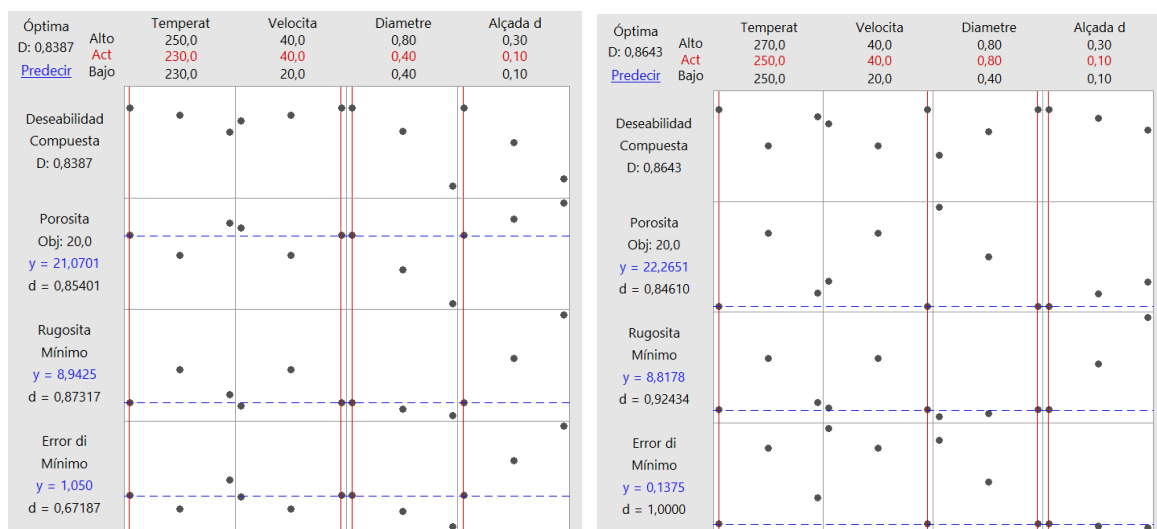


Figura 44: Captura Optimització multiobjectiu amb major importància a la porositat.

En tots els casos tenim un valor de la funció *desirability* d'entre el 0,85 i el 1, per tant, en tots casos ens aproximem als objectius especificats per les diferents variables. Comentar que en tots els casos, veiem que el valor d'aquesta funció per al cas on la concentració de carbonat de calci és del 50% és major que per quan la concentració és del 35%.

### 5.3.3. Resum de l'optimització multiobjectiu

Podem resumir les variables desitjades en cada cas en la Taula 11, incloent els resultats extrets anteriorment en el cas de tenir totes les respostes amb la mateixa importància i els resultats de quan posem més importància en cadascuna de les variables.

Taula 11: Valors codificats de les variables amb l'optimització multiobjectiu pels diferents casos d'importància.

Importància	Concentració CaCO <sub>3</sub>	Temperatura (°C)	Velocitat (mm/min)	Diàmetre de broc (mm)	Alçada de capa (mm)
Mateixa	35%	230	40	0,4	0,1

	50%	250	40	0,8	0,1
Error dimensional preponderant	35%	250	20	0,8	0,1
	50%	250	40	0,8	0,1
Rugositat preponderant	35%	230	20	0,8	0,1
	50%	250	40	0,8	0,1
Porositat preponderant	35%	230	40	0,4	0,1
	50%	250	40	0,8	0,1

S'observa que l'alçada de capa és l'única variable que sempre es manté en el mateix valor sigui quina sigui l'optimització realitzada. Sempre es desitjarà una alçada de capa de 0,1 mm per tant serà el primer valor a prioritzar per a posteriors estudis.

Veiem per altra banda que, com a norma general, es prefereix la velocitat de 40 mm/s i el diàmetre de broc de 0,8 mm. També s'observa que en tots les optimitzacions que es veuen l'altre dada com a escollida, ens trobem en el cas en que la concentració de carbonat de calci és del 35% i com hem comentat anteriorment, s'observa que el valor de la funció *desirability* és superior per la concentració del 50% en tots els casos. D'aquesta manera es pot assegurar encara més que interessin aquests valors per aquestes variables.

Pel que fa a la temperatura és prou variable però també s'ha vist en el punt anterior que és de les primeres variables que s'etreu dels models per ser poc significativa, per tant no és rellevant. Tot i així sembla que preferirem escollir la temperatura de 250°C si és possible.

És a dir, amb això es veu que es prefereix treballar a temperatures altes, a velocitats també altes, amb alçades de capa baixes i diàmetres de broc elevats per tal d'obtenir bons resultats a les peces impreses, minimitzant l'error dimensional, minimitzant la rugositat i obtenint la porositat desitjada.

## 6. Estudi i anàlisi de l'adhesió entre capes

S'ha vist durant el procés experimental, que l'adhesió entre capes de les provetes impreses és el que podria provocar alguns problemes a l'hora d'imprimir els prototips per ús quirúrgic. És per aquest motiu que s'ha decidit fer una anàlisi centrat en aquesta problemàtica per avaluar que es pot tenir present per tal d'evitar-ho o disminuir aquest efecte al màxim.

La unió d'entre capes és la capacitat d'una capa del material extrudit fos en adherir-se amb una la capa següent. El fenomen que provoca que aquestes capes es separin durant o després de la impressió és la delaminació [26], tal com es pot veure en l'exemple de la Figura 45.



Figura 45: Imatge d'exemple de la delaminació en impressió 3D.

La delaminació pot ser causada per diferents aspectes i moltes vegades es produeix per la coexistència de diversos alhora. Aquests poden ser [26]:

- Tensió interna en el model: és provocada generalment per geometries complexes. Per tant és important recolzar-se d'estructures externes quan sigui necessària a

l'hora d'imprimir algunes peces.

- Humitat elevada del material: la humitat excessiva en l'ambient que envolta la bobina de material fa que aquesta incrementi el percentatge d'aigua del seu interior, fent que aquest es degradi. A més a més, quan s'extrudeix el material pel *hotend* la peça queda defectuosa perquè l'aigua al cap de poc temps s'evapora, deixant forats buits a l'interior del material [24].
- Paràmetres d'impressió inadequats: com s'ha vist en els apartats anteriors els paràmetres d'impressió escollits afecten en les variables resposta com és l'error dimensional, la porositat, etc. Aquest aspecte pot fer disminuir l'adhesió entre capes.

És per aquest motiu que s'ha decidit estudiar l'adhesió de les provetes que es disposen actualment, amb el material escollit. Per poder fer això s'ha buscat quin tipus de prova era l'adequat i hem vist que és un camp poc explorat en el món de la impressió 3D.

Existeixen assajos normalitzats d'adhesió però requereixen utilitatges específics per a poder-se realitzar que acostumen a tenir un cost elevat. Tenint en compte que això es tracta d'un estudi preliminar per veure si interessa endinsar-se més en aquest tipus d'anàlisi s'han volgut buscar alternatives més econòmiques. És per aquest motiu que s'ha vist que es pot fer un assaig a tracció aplicant la força en direcció perpendicular a la d'impressió de la proveta per dur a terme aquest estudi.

## 6.1. Estudi previ a l'anàlisi

Un assaig a tracció consisteix en sotmetre a una proveta normalitzada a un esforç axial creixent fins a arribar a la ruptura [27]. En aquest assaig es mesura la resistència del material i es pot determinar el mòdul elàstic o mòdul de Young, el límit elàstic, la tensió a tracció, l'allargament de ruptura...

Com a consideració prèvia, hem decidit fer aquesta anàlisi únicament per la barreja del material on la concentració del carbonat de calci és del 35%. Aquesta decisió ha estat presa degut a la dificultat a l'hora d'imprimir les provetes quan la concentració era del 50%. Podem



considerar aquest punt com una porta a un nou estudi a futur.

Es van fer dos tipus d'assajos a tracció, pel primer s'ha decidit seguir la norma ISO 527-2 del tipus 1A [30], és a dir utilitzarem una proveta amb un gruix establert de 4mm. Podem veure les diferents formes de provetes en la Figura 21.

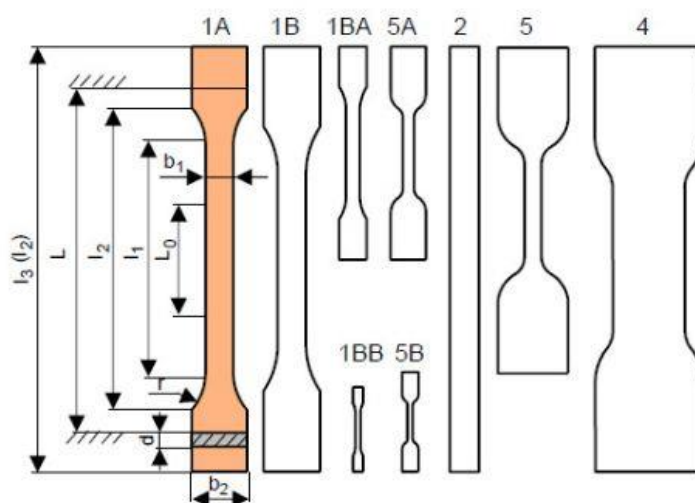
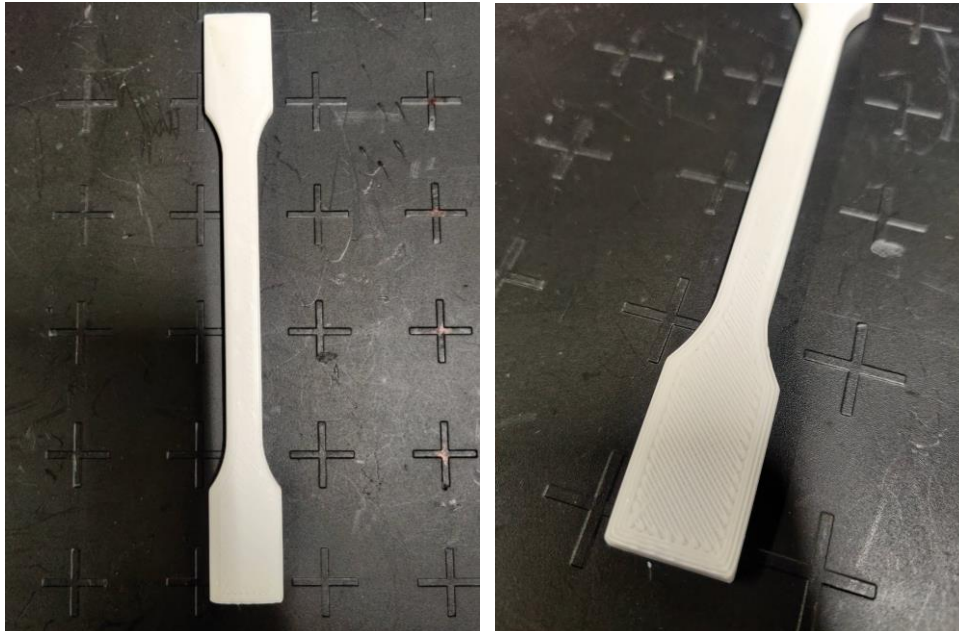


Figura 46: Diferents tipus de provetes segons la normativa seguida.

S'ha decidit amb quines variables d'impressió es durà a terme aquest estudi. Vist l'apartat anterior d'anàlisi estadística i entenent les limitacions geomètriques i de temps que ens trobarem a l'hora d'imprimir hem decidit emprar l'alçada de capa de 0,3 mm per poder trigar menys temps en imprimir les provetes, el diàmetre de broc al seu valor central (0,3 mm) i la velocitat d'impressió en 20 mm/s. En resum, s'ha seleccionat les condicions que proporcionen una rugositat baixa i un error dimensional baix, mentre que s'ha variat la temperatura perquè està molt relacionada amb la adhesió i per tant era important fer un estudi estadístic.

En aquesta anàlisi es decideixen imprimir un total de cinc provetes amb direcció perpendicular al llarg de la proveta per poder aconseguir les dimensions desitjades per complir la normativa, tal com es veu en la

Figura 47, on en la imatge de la dreta es veu amb més detall la direcció d'impressió.



*Figura 47: Imatges de les provetes impreses al laboratori.*

Per altra banda, en el segon assaig que s'ha realitzat, s'han imprès tres provetes seguint la normativa ASTM D638 – 14 [28]. El motiu d'aquest canvi de normativa és degut al fet que es vol imprimir algunes en vertical, ja que és com s'imprimiran els prototips d'ossos per a ús quirúrgic i en aquest cas es necessita una base més gran amb una espessor superior per a poder-les dur a terme [29]. A més a més, així aquesta anàlisi a tracció es pot extrapolar a una anàlisi d'adhesió entre capes, que és exactament el que es buscava.

S'han imprès únicament tres provetes d'aquesta manera i això és degut a la dificultat a l'hora d'imprimir-les i també al llarg temps d'impressió que requereixen, algunes d'entre deu i dotze hores. A continuació en la Figura 48 es poden veure les imatges de la proveta a imprimir a l'esquerra i a la dreta de la proveta amb el revestiment exterior necessari per tal de poder imprimir-la en direcció paral·lela a l'eix de la proveta.

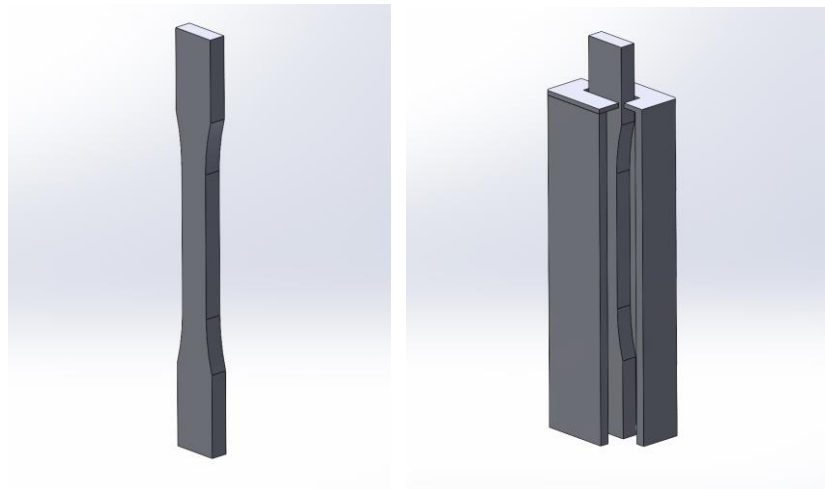


Figura 48: Imatges de la proveta i el seu revestiment extretes del SolidWorks.

S'han fet tres provetes, cada una d'elles impresa amb una temperatura diferent, a 230°C, 240°C i 250°C per avaluar la diferència dels resultats. Comentar que tot i així, hi ha hagut alguna problemàtica en l'impressió en la part final de la proveta tal com es mostra en la

Figura 49 on es veu com la part final ha patit un error amb el material. Aquest error es va acceptar, ja que estava a la part de la mordassa i no en la part central de la proveta que és la zona d'estudi.



Figura 49: Imatge d'un defecte d'impressió de les provetes.

Vist això es van poder dur a terme els assajos de tracció al laboratori del Grup de Recerca Aplicada en Biomecànica de l'Impacte (GRABI) de la Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE) amb l'ajuda del professor Jordi Lluma.

Els assajos es van dur a terme mitjançant una màquina d'assajos universal Zwick/Roell Z005 [31] i una camara ben il·luminada mitjançant LEDs per grabar la deformació i ruptura de les provetes tal com es veu a la Figura 50. I els paràmetres del model d'assaig són els mostrats a la Taula 12.

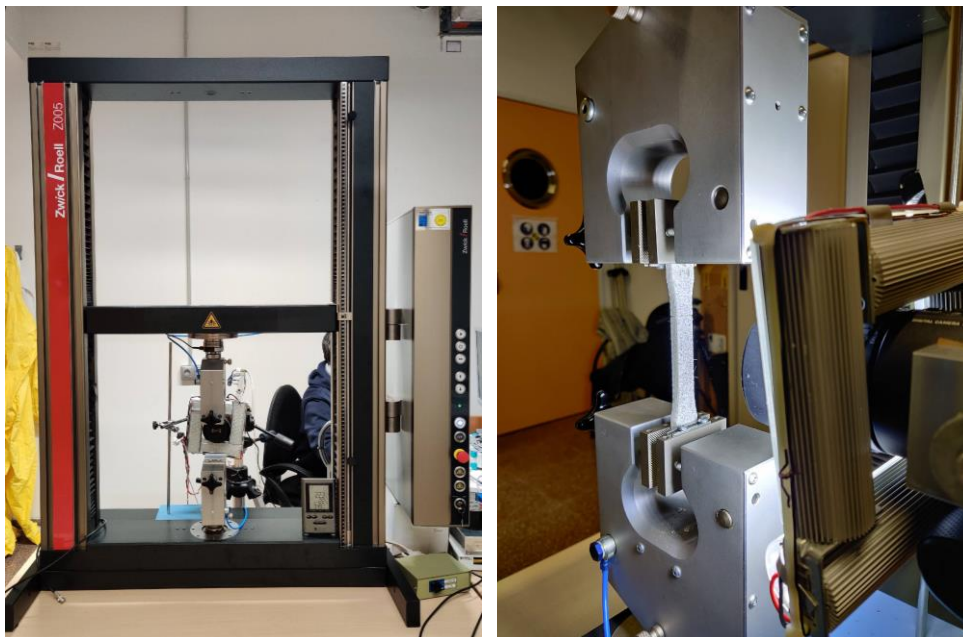


Figura 50: Imatges de la màquina d'assajos universal.

Taula 12: Paràmetres de la màquina d'assajos universal.

Longitud de subjecció en posició d'inici (mm)	Precarga (N)	Velocitat d'assaig (mm/min)
115	0,1	5



## 6.2. Anàlisi a tracció i d'adhesió

Seguidament, es van poder dur a terme els cinc assajos a tracció i els tres assajos d'adhesió. Podem veure els resultats de la força suportada en la variació del temps en la Figura 51 de tots els assajos simultàniament.

Evolució en el temps de les forces suportades per les provetes

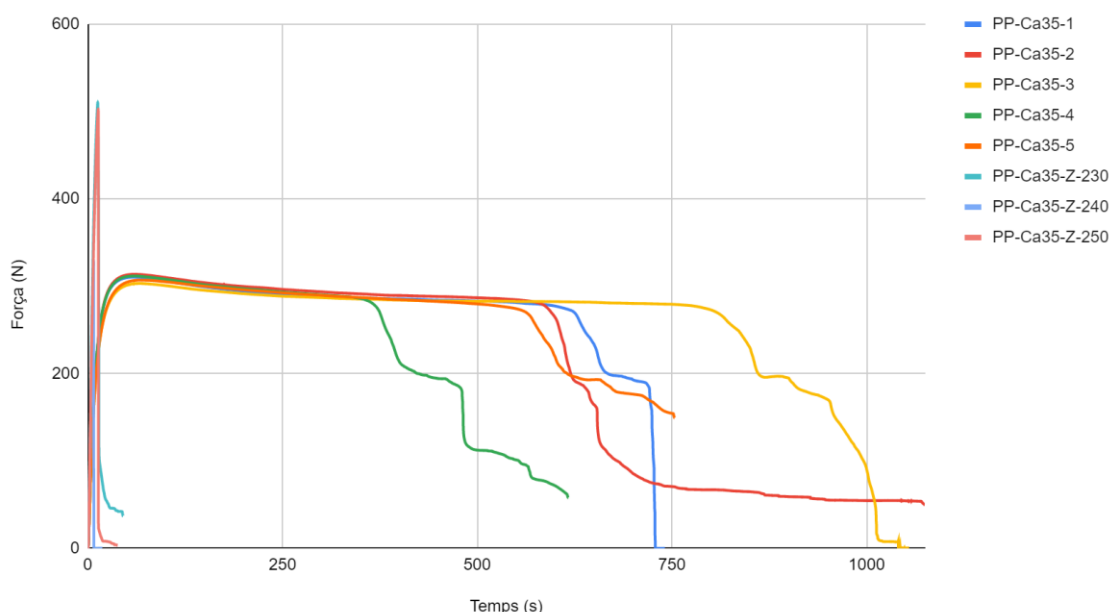


Figura 51: Evolució de la força respecte al temps.

Mirant la llegenda veiem que les cinc primeres proves representen els assajos a tracció de les cinc provetes impreses en direcció perpendicular a l'eix de la proveta, mentre que les tres últimes són els assajos d'adhesió de les impreses en direcció paral·lela. Podem veure clarament doncs com les cinc primeres suporten menys newtons de força però la seva ruptura dura més en el temps. Es deformen ràpidament de forma elàstica però plàsticament perduren molt fins a arribar a la ruptura. Per contra, les tres últimes provetes suporten molta més força però pateixen ruptura molt abans, no arriben a tenir deformació plàstica. A simple vista podem entendre que aguantin forces més elevades degut al fet que la secció de la

proveta és molt superior però a continuació s'estudiarà aquest efecte.

Podem veure un gràfic només dels tres assajos d'adhesió per veure de forma més clara el seu comportament en la Figura 52.

Evolució en el temps de les forces suportades per les provetes impresses en paral·lel

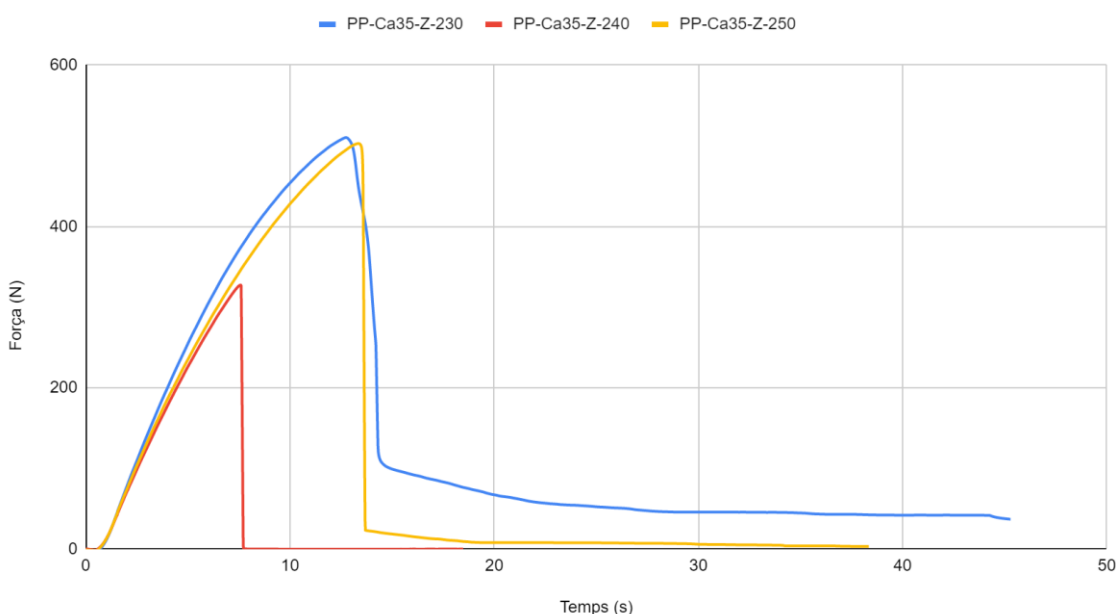


Figura 52: Evolució de la força respecte al temps per les tres provetes impresses en paral·lel.

Veiem com hem comentat anteriorment, que tenim deformació elàstica i després directament la ruptura, és a dir no pateix deformació plàstica. Sembla que hi ha hagut algun petit defecte d'impressió que ha fet que la proveta impresa a 240°C hagi trencat molt abans, ja que no existeix gaire diferència amb les forces suportades per les provetes impreses a 230 i 250 graus centígrads. Per tant, tot fa pensar que la proveta impresa a 240°C tenia algun defecte d'impressió que ha fet que la ruptura arribés abans de l'esperat.

A la Taula 13 veiem els valors de les forces màximes per cadascun dels assajos.

Taula 13: Forces màximes suportades per cada assaig.

Assaig	F <sub>màx</sub> (N)
PP-Ca35-1	310,52
PP-Ca35-2	313,80
PP-Ca35-3	303,33
PP-Ca35-4	311,84
PP-Ca35-5	307,16
PP-Ca35-Z-230	510,25
PP-Ca35-Z-240	327,44
PP-Ca35-Z-250	502,88

S'ha mesurat una a una les provetes per poder tenir les seccions reals i per tant, a partir de les forces màximes i les seccions poder calcular les tensions màximes suportades. Es van mesurar les provetes amb un peu de rei elèctric tal com es veu en la Figura 53 prenent tres mesures llarg de la proveta i fent la mitja per tenir un valor més acurat. Pel cas de les cinc primeres la secció ideal és de  $4 \times 10 = 40 \text{ cm}^2$  mentre que per les últimes tres provetes és  $8 \times 14 = 112 \text{ cm}^2$ , tal com s'ha comentat anteriorment, tenim una secció major per ajudar a la impressió de la proveta.



Figura 53: Mesura de les dimensions de la proveta amb peu de rei.

Una vegada preses les mesures reals podem trobar la tensió màxima suportada dividint la força màxima entre la secció. Podem veure els resultats de tots els assajos en la Taula 14.

Taula 14: Forces màximes, seccions i tensions màximes dels assajos realitzats.

Assaig	Fmàx (N)	Secció (mm <sup>2</sup> )	Tensió màx (N/mm <sup>2</sup> )
PP-Ca35-1	310,52	42,09	7,38
PP-Ca35-2	313,80	42,59	7,37
PP-Ca35-3	303,33	42,47	7,14
PP-Ca35-4	311,84	42,28	7,38
PP-Ca35-5	307,16	42,44	7,24
PP-Ca35-Z-230	510,25	113,15	4,51
PP-Ca35-Z-240	327,44	114,64	2,86
PP-Ca35-Z-250	502,88	114,06	4,41

Podem observar com les provetes impreses en direcció perpendicular a l'eix absorbeixen tensions superiors, de l'ordre de 7 N/mm<sup>2</sup> mentre que les provetes impreses en direcció de l'eix només absorbeixen uns 4 N/mm<sup>2</sup>, obviant el cas de la proveta que ha fallat abans del normal. En l'anàlisi de l'adhesió per tant, es pot veure que al tenir la direcció d'impressió paral·lela a la del eix de la proveta i a l'aplicar-li un esforç de tracció aquestes suporten menys tensió degut al fet que les capes es separen més fàcilment en aquesta direcció.

No es veu una clara actuació de la temperatura en els resultats trobats en aquesta anàlisi, però s'haurà de seguir estudiant amb més profunditat si es vol assegurar amb claredat.

## 7. Impacte ambiental

L'impacte ambiental és l'efecte que produeix una determinada acció humana sobre el medi ambient [32]. Les accions humanes, motivades per la consecució de diverses finalitats, provoquen efectes col·laterals sobre el medi natural o social. Mentre els efectes perseguits solen ser positius, els efectes secundaris poden ser positius o, el que sorgeix més sovint, negatius.

Per analitzar aquest impacte es realitza un estudi amb l'objectiu de determinar quins components del medi ambient es veuen afectats per aquest projecte, les causes i les conseqüències. Totes les activitats són susceptibles de provocar un impacte sobre el medi ambient.

Els diferents impactes produïts al llarg d'aquest treball els estudiarem separant-los en tres punts: les emissions produïdes, els sorolls i els residus generats.

### 7.1. Emissions

Degut a la gran quantitat d'aparells utilitzats en les diferents fases del treball, el consum elèctric és elevat. Aquest impacte es troba en forma d'emissions.

Per altra banda, el PP barrejat amb  $\text{CaCO}_3$  no desprèn gasos tòxics, és un dels motius principals pels quals s'ha escollit aquest material enfront d'altres.

### 7.2. Sorolls

L'impacte auditiu de la impressora Sigma s'ha tingut en compte. En la fitxa tècnica s'especifica que la impressora quan es troba en funcionament produeix un màxim de 50dB. Cal tenir en compte que l'OMS aconsella no estar sotmès a un soroll de més de 80dB durant 8 hores o més [33], ja que una exposició d'aquestes característiques pot tenir efectes

negatiu pel sistema auditiu de l'operari. Tenint en compte aquesta informació es pot considerar que l'impacte auditiu no és perjudicial i que per tant es pot treballar amb normalitat en aquest aspecte.

### 7.3. Residus

El PP és un material termoplàstic molt versàtil, és a dir, compatible amb moltes tècniques de processament. És un material que produeix menys residus que d'altres molt similars, com el PET, PS o PVC [34], per tant genera menys CO<sub>2</sub> que altres opcions de material.

Es tracta d'un material amb temps de degradació bastant elevat. Aquest aspecte, tot i que a simple vista és negatiu, depenent de l'ús que se li doni podria ser positiu. Per exemple, per nosaltres, en el cas de fer peces per a ús quirúrgic, es desitjarà que aquestes tinguin una vida llarga i no hagin de ser rebutjades al cap de poc temps.

Es podria intentar reduir el consum d'aquest material en el procés de FFF reutilitzant el PP, tornant-lo a fondre per reciclar-ho o usant valors d'*infill* i de *shells* que minimitzin el material utilitzat.

## 8. Costos associats al projecte

En el càlcul del pressupost s'ha considerat tots els aspectes com les hores de recursos humans dedicats, les hores d'ús dels programes de pagament que s'han usat, el material emprat...

Com es pot veure a la Taula 15 major part dels costos del projecte ve del cost del personal qualificat. És un projecte extens, en el que s'han involucrat moltes persones i totes elles qualificades. En l'apartat de cost personal, es veu de forma desglossada les hores que es van dedicar al laboratori: dissenyant les peces, fent les proves preliminars, imprimint-les i mesurant-les. Per fer això s'ha comptabilitzat les hores de l'enginyer junior Elisabeth Carreras, la tutora Irene Buj, l'operari del laboratori Ramón Casado i l'auxiliar de laboratori Àlex Domínguez. També es veuen les hores dedicades al laboratori de la EEBE per part del professor Jordi Lluma per tal de dur a terme els assajos de tracció i adhesió. A més a més, també es veuen les hores utilitzades en fer la memòria, que en aquest cas només hi ha participat l'enginyer junior i la tutora del projecte Irene Buj. De totes les persones involucrades, s'ha mirat les hores de treball i el salari aproximat d'aquestes per poder calcular el cost associat al personal.

El cost de la material prima s'ha calculat amb l'ajuda dels *G-codes* en els quals s'indica la quantitat de material que s'ha utilitzat per cada peça. En aquest valor també s'ha contemplat les peces fabricades com a proves preliminars i tot el material purgar per una correcta impressió de les peces. També s'ha sumat el material utilitzar per tal de fer les provetes per a l'assaig de tracció i d'adherència. Entendre que la quantitat de material usada és un valor aproximat ja que, és difícil de calcular i a més a més el preu de la bobina és aproximat degut al fet que al ser una barreja concreta per a aquest estudi s'ha demanat al laboratori i no és una bobina que estigui a l'abast de tothom i amb un rang de preus fixats.

Per últim, s'han de sumar als costos les despeses en software dels diferents programaris utilitzats i de la maquinària necessària. Pel que fa al programari aquests han estat: SolidWorks, Minitab, CURA i Pack Office. Amb aquests programes, s'ha dissenyat la peça, s'han escollit els paràmetres d'impressió i s'han preparat els *G-codes*, s'han estudiat estadísticament les respostes i s'ha dut a terme la memòria entre d'altres coses. S'ha vist la vida útil aproximada i amb les hores d'ús que s'ha donat i el preu de la maquinària s'ha

pogut calcular el preu associat al projecte. També s'ha de sumar les hores treballades amb tota la maquinària del laboratori i el cost associat a elles tenint en compte la vida útil i el preu de compra igualment.

Taula 15: Resum dels costos associats al projecte.

<b>Cost de personal</b>				
<b>Concepte</b>	<b>Hores laboratoris (h)</b>	<b>Hores memòria (h)</b>	<b>Preu unitari (€/h)</b>	<b>Preu total (€)</b>
Enginyer Junior	80	90	25	4250
Operari de laboratori UPC	40	0	50	2000
Auxiliar laboratori	5	0	40	200
Operari de laboratori EEBE	20	0	50	1000
Tutora del projecte	20	20	50	2000

<b>Cost de materia prima</b>				
<b>Concepte</b>	<b>Usat (g)</b>	<b>Pes bobina (g)</b>	<b>Preu bobina (€)</b>	<b>Preu total (€)</b>
PP amb CaCO <sub>3</sub>	5000	700	50	357

<b>Cost de software i maquinària</b>				
<b>Concepte</b>	<b>Hores d'ús (h)</b>	<b>Vida útil (h)</b>	<b>Preu compra (€)</b>	<b>Preu total (€)</b>
SolidWorks	5	1500	6600	22
Cura	15	1500	0	0
Minitab	20	1500	1498	20
Pack Office	60	1500	139	6
Sigma	100	14600	2475	17
Rugosímetre	5	29200	70000	12
Màquina universal d'assajos	10	29200	5000	2

<b>Preu total sumant tots els costos (€)</b>	9885
<b>Preu total + IVA sumant tots els costos (€)</b>	11961

En total, tots els costos associats a aquest projecte sumen una quantitat de 11.961€.





## 9. Planificació i organització

A continuació es mostra una planificació de tot el projecte mitjançant un diagrama de Gantt en la Figura 54. El diagrama de Gantt serveix per a proporcionar una vista general de les tasques programades i de la duració que té cadascuna d'elles.

Setmana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Estat de l'art</b>	■	■	■	■	■	■										
<b>Models</b>				■	■	■	■	■								
<b>Optimització multiobjectiu</b>							■	■	■	■						
<b>Anàlisi adhesió</b>										■	■	■				
<b>Impacte ambiental</b>														■		
<b>Costos associats al projecte</b>														■		
<b>Conclusions</b>														■	■	
<b>Redacció memòria</b>		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figura 54: Diagrama de Gantt de la planificació del projecte.

En ella es pot veure com la duració total del projecte és de setze setmanes que equival a tot el quadrimestre universitari. Es poden veure en blau les setmanes en les que s'han fet cada tasca. Pel que fa a l'estudi de l'estat de l'art s'ha destinat un total de sis setmanes ja que, és necessari entendre el context en el que ens trobem de la matèria per poder dur a terme l'anàlisi. Simultàniament s'ha començat l'anàlisi estadística primerament amb la cerca de models i posteriorment amb l'optimització multiobjectiu. Conjuntament, s'ha destinat un total de set setmanes a aquesta anàlisi. Una vegada acabat, s'ha realitzat les proves d'adhesió durant tres setmanes. Durant les últimes tres setmanes s'ha fet l'estudi de l'impacte ambiental, dels costos associats al projecte i s'han extret les conclusions. Paral·lelament, s'ha anat redactant la memòria actual on es recull tota la informació i documentació del treball.



## Conclusions

A continuació es presenten les conclusions extretes durant la realització d'aquest projecte.

Inicialment en aquest treball s'ha investigat sobre les diferents tecnologies de fabricació additiva, fent especial èmfasi en el procés d'extrusió emprant materials plàstics. En aquest estudi s'ha pogut entendre l'estat de l'art de la matèria i s'ha pogut endinsar-se en aquest món.

Posteriorment, s'ha escollit les variables d'impressió (temperatura, velocitat, diàmetre de broc i alçada de capa) i les respostes a estudiar (error dimensional, porositat i rugositat) i s'ha iniciat l'impressió de les provetes. S'ha decidit fer l'estudi per dues barreges de diferent concentració de polipropilè i carbonat de calci per poder analitzar els seus efectes. I un cop impreses s'han mesurat les respostes.

S'ha dut a terme una anàlisi estadística analitzant els models extrets i posteriorment s'ha fet una optimització multiobjectiu de les respostes. És a dir, inicialment s'ha buscat el rang de les variables que és millor per a cada resultat i posteriorment, s'ha analitzat quin rang interessa si tenim en compte les tres respostes alhora.

Quasi tots els models trobats tenen un ajust a la realitat elevat, és a dir representen el comportament real d'una manera prou acurada. Per tant, podem extreure conclusions de l'anàlisi posterior. Amb aquest estudi s'ha vist la importància d'alguns paràmetres com l'alçada de capa i el diàmetre de broc, ja que aquests estaven presents en la major part dels models trobats.

En tots els casos s'ha vist la gran importància de tenir una l'alçada de capa baixa per tal de reduir la rugositat i l'error dimensional en el pla xy. Certament, l'error dimensional en el pla vertical es comporta de forma diferent i depen en gran part de la temperatura del material extrudit tot i que els models trobats són els que menys s'ajusten a la realitat, per aquest motiu es podria ampliar l'estudi per entendre millor el comportament en aquest eix.

Posteriorment s'ha entrat en una temàtica que es troba en estudi actualment i es tracta d'un estudi de l'adhesió entre capes. S'ha proposat fer un assaig de resistència a tracció de manera que la força s'aplica de forma perpendicular a la impressió de les capes. Sabem que és una de les problemàtiques abundants en el món de la impressió 3D i que té un gran potencial d'estudi i de descobriment. Fent les proves s'ha volgut avaluar com afecten els paràmetres d'impressió a l'adhesió, en especial la temperatura. S'ha vist que la resistència d'aquestes provetes és inferior a les impreses en horitzontal.

Podríem ampliar aquest estudi d'adhesió entre capes continuant els assaigs d'adhesió entre

capas amb més rèpliques per poder tenir en compte la variabilitat i també afegir com a resposta del disseny d'experiments la resistència a tracció com la adhesió entre capes. Al laboratori del GRABI de la EEBE amb l'ajuda del professor Jordi Lluma i de la tutora Irene Buj es seguirà estudiant aquestes provetes per poder extreure'n més informació i resultats d'elles.

S'ha efectuat també un estudi econòmic del projecte i s'ha vist que té un cost aproximat d'uns dotze euros i també una anàlisi de l'impacte ambiental que pot arribar a tenir el portar endavant un projecte com aquest.

Respecte a futurs treballs, es proposa millorar els mètodes de mesura de les diferents respostes per tal d'obtenir valors més acurats que potser signifiquen elevar els costos del projecte però que aportin una major seguretat sobre les mesures preses. També es suggereix centrar-se en el dos paràmetres que s'han vist que influeixen més en aquest treball que són l'alçada de capa i el diàmetre de broc.

## Agraïments

Primer de tot, voldria agrair a la meva tutora, la Irene Buj per suggerir-me aquest projecte, per la seva dedicació, temps i consells donats, sense els quals no s'hagués pogut fer aquest treball ni tampoc el Treball de Final de Grau en el que també vaig tenir el plaer de fer-lo amb ella. També voldria agrair al Ramón Casado i a l'Àlex Domínguez pel seu suport durant tot el projecte des del laboratori de la universitat UPC. I finalment, al professor Jordi Lluma per l'ajuda durant els assajos d'adhesió entre capes entre altres parts del projecte.

I per últim, voldria agrair tot el suport, l'ajuda i l'interès a tota la meva família i a la meva parella, sense els quals molts projectes tant personals, com acadèmics haguessin sigut molt més difícils de dur a terme.

## Bibliografia

- [1] Eurecat Centro Tecnológico de Cataluña - Innovando para las empresas. (2021, 30 agosto). Eurecat. <https://eurecat.org/es/>
- [2] Sant Joan de Déu. Hospital. Barcelona. <https://www.sjdhospitalbarcelona.org/es>
- [3] Wikipedia contributors. (2008, 31 enero). Chuck Hull. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Chuck\\_Hull](https://en.wikipedia.org/wiki/Chuck_Hull)
- [4] impresoras3d.com. (2021, 14 junio). Breve Historia de la impresión 3D. <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>
- [5] colaboradores de Wikipedia. (2021, 16 junio). Fotopolímero. Wikipedia, la enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Fotopol%C3%ADmero>
- [6] Wikipedia contributors. (2021, 25 enero). Carl R. Deckard. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Carl\\_R.\\_Deckard](https://en.wikipedia.org/wiki/Carl_R._Deckard)
- [7] colaboradores de Wikipedia. (2020, 7 diciembre). Sinterizado selectivo por láser. Wikipedia, la enciclopedia libre. [https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado\\_selectivo\\_por\\_l%C3%A1ser](https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser)
- [8] impresoras3d.com. (2019, 15 mayo). Caducidad de Patentes en el mercado de la impresión 3D. <https://www.impresoras3d.com/caducidad-de-patentes-en-el-mercado-de-la-impresion-3d/>
- [9] Wohlers, T. (2019). Wohlers Report 2019 (p. 3D Printing and Additive Manufacturing).
- [10] 7 Ventajas y Desventajas de las Impresoras 3D. <https://impresora-3d.online/7-ventajas-y-desventajas/>
- [11] J. (2017, 3 julio). Las ventajas y desventajas de la impresión 3d. Imprime3dbarato. <https://imprime3dbarato.com/las-ventajas-y-desventajas-de-la-impresion-3d/>
- [12] STEELFILL. (s. f.). ColorFabb. <https://colorfabb.com/steelfill>
- [13] BCN3D Technologies. (2021, 5 febrero). BCN3D Sigma R19 3D Printer. <https://www.bcn3d.com/bcn3d-sigma-r19/>
- [14] Impresoras3d.com. (2021, 21 diciembre). Impresora 3D BCN3D SigmaX R19

- [Outlet]. <https://www.impresoras3d.com/producto/bcn3d-sigma-r19/>
- [15] impresoras3d.com. (2018, 13 septiembre). BCN3D SIGMA R19 y SIGMAX R19. <https://www.impresoras3d.com/bcn3d-sigma-r19-y-sigma-r19/>
- [16] colaboradores de Wikipedia. (2021b, diciembre 22). Polipropileno. Wikipedia, la enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Polipropileno>
- [17] colaboradores de Wikipedia. (2021b, diciembre 17). Carbonato de calcio. Wikipedia, la enciclopedia libre. [https://es.wikipedia.org/wiki/Carbonato\\_de\\_calcio](https://es.wikipedia.org/wiki/Carbonato_de_calcio)
- [18] Consejos para imprimir en 3D: Menor velocidad para mayor calidad (2016). <https://trimaker.com/consejos-imprimir-3d-velocidad/>
- [19] Altura de capa. (2014) <https://createc3d.com/altura-de-capa/>
- [20] Montgomery, D. C. Diseño y análisis de experimentos. 2ª ed. México: Limusa-Wiley, 2002. ISBN 9789681861568. Capítulo 6: The 2<sup>k</sup> factorial design
- [21] Derringer-Suich. Desirability function.
- [22] impresoras3d.com. (2021b, septiembre 8). Guía de boquillas para impresoras 3D. <https://www.impresoras3d.com/guia-de-boquillas-para-impresoras-3d/>
- [23] S. (2020, 20 junio). Que es la altura de capa. impresion 3d Concepción. <https://trokilab.cl/que-es-la-altura-de-capa/>
- [24] Elisabeth Carreras Sanz. 2020. Influència dels paràmetres d'impressió sobre l'error dimensional, la rugositat i la porositat en processos de fabricació per filament fos (FFF)
- [25] David Perez. 2021. Influència dels paràmetres d'impressió 3D per extrusió sobre l'error dimensional, la rugositat i la resistència mecànica de peces de plàstic amb càrrega metàl·lica
- [26] impresoras3d.com. (2019b, julio 22). La adhesión entre capas en impresión 3D. Problemas y soluciones. <https://www.impresoras3d.com/la-adhesion-entre-capas-problemas-soluciones-impresion-3d/>
- [27] colaboradores de Wikipedia. (2021b, septiembre 8). Ensayo de tracción. Wikipedia, la enciclopedia libre. [https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo\\_de\\_tracci%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_tracci%C3%B3n)
- [28] Cloudflare. (s. f.). Instron. <https://www.instron.com/en/testing-solutions/by-standard/astm/astm-d412?region=Global%20Site>

- [29] Sergi Roig Lopez. Influencia del ángulo de trama de impresión en el comportamiento a tracción de probetas de PLA impresas mediante FFF. Simulación por EF de su estructura.
- [30] Zwickroell.com. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/ensayo-de-traccion-iso-527-1-2/>
- [31] Zwickroell.com. <https://www.zwickroell.com/es/productos/maquinas-de-ensayos-de-segunda-mano/z005-allroundline-de-segunda-mano-5-kn/#c69417>
- [32] Impacto ambiental. De Ana Zita, doctora en Bioquímica. <https://www.todamateria.com/impacto-ambiental/>
- [33] Escuchar sin riesgos. De Organización mundial de la Salud, OMS. [www.who.int/pbd/deafness/activities/MLS\\_Brochure\\_Spanish\\_lowres\\_for\\_web.pdf](http://www.who.int/pbd/deafness/activities/MLS_Brochure_Spanish_lowres_for_web.pdf)
- [34] M. (2020a, septiembre 2). ¿Por qué Polipropileno? mingjimachine. <https://www.mingjimachine.com/es/por-que-polipropileno/>