

## Treball final de màster

**Estudi:** Màster en Enginyeria Industrial

**Títol:** Disseny i estudi de motlles impresos en fabricació additiva per a la injecció de peces de plàstic per ultrasons

**Document:** Memòria i Annexos

**Alumne:** Carles Sala Jurado

**Tutor:** Inés Ferrer Real

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Enginyeria de Processos de Fabricació

**Convocatòria (mes/any):** Juny 2020



## AGRAÏMENTS

A la Doctora Inés Ferrer Real, tutora del treball final de màster, per la seva exigència, suport i dedicació al projecte tot i les dificultats que ha comportat la crisi del COVID-19.

*Al Grup de Recerca en Enginyeria de Procés, Producte i Producció (GREP) per donar-me l'oportunitat de realitzar aquest estudi.*

A la meva família i amistats pel seu recolzament i estima en tot moment.

# ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ.....	7
1.1.	Antecedents.....	7
1.2.	Objecte.....	7
1.3.	Abast.....	8
2.	FABRICACIÓ ADDITIVA (FA).....	9
2.1.	Introducció.....	9
2.2.	Fabricació de motlles/inserts amb FA.....	11
2.3.	Precisió dimensional en la FA.....	13
2.4.	Emmotllament per ultrasons.....	14
3.	DESCRIPCIÓ DEL MOTLLE.....	17
3.1.	Descripció del motlle actual.....	17
3.2.	Estratègia de disseny del nou motlle.....	19
3.3.	Disseny del marc exterior (MUD).....	19
3.4.	Disseny de la placa base i placa aïllant inferior.....	22
3.5.	Disseny de l'insert.....	23
4.	INSERT DEL MOTLLE.....	25
4.1.	Pla experimental.....	25
4.2.	Geometria i material amb una cavitat.....	26
4.3.	Paràmetres de procés.....	27
4.4.	Caracterització dimensional.....	28
4.4.1.	Dimensions exteriors de la peça.....	29
4.4.2.	Dimensions i forma dels forats.....	31
4.4.3.	Estudi de la superfície.....	33
5.	RESULTATS.....	35
5.1.	Dimensions exteriors: Llargada i amplada.....	35
5.1.1.	Anàlisi dimensional amb l'escàner 3D.....	35
5.1.2.	Llargada de la peça.....	39
5.1.3.	Amplada de la peça.....	40
5.1.4.	Comparatiu d'amplada i llargada.....	42
5.2.	Dimensional i forma dels forats.....	43

5.2.1.	Diàmetre dels forats .....	44
5.2.2.	Posició dels forats.....	46
5.2.3.	Anàlisi de forma dels forats .....	48
5.3.	Estudi de la superfície .....	50
5.4.	Estudi comparatiu de dades .....	53
5.4.1.	Anàlisi de mides exteriors.....	53
5.4.2.	Anàlisi de forats .....	57
6.	RESUM DEL PRESSUPOST .....	60
7.	CONCLUSIONS .....	61
7.1.	Treballs futurs .....	62
8.	RELACIÓ DE DOCUMENTS .....	63
9.	BIBLIOGRAFIA .....	64
Annex A:	EQUIPAMENT .....	66
A.1	Impressora SLA <i>Form 2</i> .....	66
A.2	Cambrà de curat <i>Form Cure</i> .....	67
A.3	Escàner 3D <i>EinScan Pro 2X Plus</i> .....	68
A.4	Peu de rei digital <i>Mitutoyo Digimatic ABSOLUTE</i> .....	69
A.5	Micròmetre digital <i>Mahr Micromar 40 EWV</i> .....	69
A.6	Màquina de coordenades <i>Mitutoyo Crysta Apex 544</i> .....	70
Annex B:	RESINES.....	71
B.1	Reina <i>High Temp V1 (FLHTAM01)</i> .....	71
Annex C:	RESULTATS.....	72
C.1	Dimensions exteriors .....	72
C.2	Dimensions i forma dels forats .....	77
C.3	Uniformitat de la cara superior .....	83
Annex D:	ANÀLISI ESTADÍSTIC DELS RESULTATS.....	89
D.1	Llargada .....	89
D.2	Amplada.....	90
D.3	Comparatiu d'amplada i llargada .....	93
D.4	Diàmetre dels forats .....	95
D.5	Posició dels forats.....	96
D.6	Forma dels forats.....	97

---

D.7 Anàlisi amb dades d'estudis anteriors.....	99
Annex E. ESTAT D'AMIDAMENTS.....	104
E.1 Peces de compra .....	104
E.2 Peces de fabricació.....	104
Annex F. PRESSUPOST .....	107
F.1 Pressupost del motlle.....	107
F.2 Pressupost del projecte.....	110
F.3 Pressupost total .....	111
Annex G. PLÀNOLS.....	112

# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. Antecedents

La fabricació de peces de plàstic mitjançant processos d'injecció, és àmpliament utilitzada a la indústria en la fabricació de sèries massives de components. Normalment s'utilitzen motlles fabricats de metall o aliatges metàl·lics per així tenir una vida útil molt llarga i garantir la repetibilitat de les peces produïdes.

Aquestes característiques fan que els motlles tinguin uns costos de fabricació molt elevats i temps de fabricació llargs. L'ús de motlles metàl·lics fa insostenible, tant per cost com per temps, el seu ús per a sèries de fabricació curtes de prototips. En aquests casos es solen utilitzar altres mètodes de fabricació com processos de mecanitzat amb Control Numèric per Computador (CNC) o de Fabricació Additiva (FA) mitjançant impressores 3D. Aquest últim mètode permet fabricar una o unes poques peces en unes hores i a un cost molt inferior del que suposaria fabricar un motlle. Amb la fabricació additiva es pot aconseguir fabricar una peça amb les característiques geomètriques semblants a la peça injectada en motlle, no obstant les propietats mecàniques entre les dues, són notablement diferents degut als materials utilitzats i al propi procés de fabricació.

En els últims anys algunes tecnologies de fabricació additiva han millorat les seves prestacions, desenvolupant nous materials amb majors resistències mecàniques i tèrmiques, ampliant el ventall d'aplicacions d'aquestes tecnologies. En aquest sentit, l'ús de materials més resistents s'han començat a utilitzar per fabricar motlles destinats injectar peces prototip o per sèries curtes de fabricació (unes desenes o centenars d'unitats). L'ús d'aquests motlles permet obtenir un nombre limitat de peces injectades a un cost econòmic i en un temps molt reduït comparat amb l'ús de motlles metàl·lics. Alhora, l'ús d'aquests motlles permet obtenir peces amb unes característiques geomètriques i mecàniques molt més pròximes a les peces fabricades amb motlles de sèries productives.

En aquest sentit, l'ús de la fabricació additiva esdevé una gran oportunitat per projectes amb un nombre limitat de peces a produir o en etapes de desenvolupament de motlles per a grans produccions.

## 1.2. Objecte

L'objectiu principal d'aquest treball és dissenyar un motlle per fabricar peces de plàstic mitjançant la tecnologia d'emmotllament per ultrasons, considerant les tecnologies de fabricació additiva (FA) com una alternativa per reduir els costos per la fabricació de sèries curtes. A partir d'un motlle d'acer existent amb una geometria definida, es vol dissenyar una rèplica amb fabricació additiva per tal que, en un futur, es pugui fabricar i utilitzar per injectar peces de plàstic.

### **1.3. Abast**

Aquest projecte inclou dissenyar un motlle realitzat amb tecnologia de fabricació additiva, concretament estereolitografia (SLA), i valorar la seva viabilitat tecnològica per l'ús en sèries curtes de fabricació.

Durant el projecte es realitzaran diferents tests per valorar la millor estratègia de fabricació del motlle. Durant la realització del projecte es diferenciaran diferents blocs on es realitzaran unes tasques concretes:

- En una primera part es dissenyarà el motlle, definint les diferents parts i components que el formaran. Es farà una adaptació dels components actuals del motlle per adaptar la seva fabricació a processos additius.
- Paral·lelament al disseny del motlle s'estudiarà la viabilitat de fabricar l'insert amb tecnologia SLA. Consultant diferents estudis sobre la fabricació de motlles i tecnologia SLA combinat amb proves que es realitzaran sobre peces de mostra, es definiran els paràmetres de fabricació que poden influir a l'insert del motlle.
- Un cop analitzades totes les dades es definirà la configuració més adequada de fabricació de l'insert. També es valoraran els beneficis i inconvenients de la tecnologia SLA com a substituït dels mètodes tradicionals de fabricació de motlles d'injecció de plàstic.
- Finalment s'elaboraran unes conclusions finals per definir un conjunt de recomanacions per a la fabricació del motlle amb tecnologia additiva.



## 2. FABRICACIÓ ADDITIVA (FA)

### 2.1. Introducció

La fabricació additiva (FA), és un conjunt de tecnologies de fabricació amb les quals es deposita material (plàstic, resina, metall, etc.) capa a capa, que amb la seva superposició s'aconsegueix obtenir objectes tridimensionals. Aquests processos també es solen anomenar tecnologies d'impressió 3D.

Aquest conjunt de tecnologies han agafat una gran rellevància els darrers anys, en part degut a l'abaratiment de les tecnologies que el formen i als nombrosos estudis en diferents camps d'aplicació que s'estan realitzant. Les tecnologies de FA també han proliferat degut a la demanda canviant del consumidor, on cada cop necessita productes més personalitzats a un cost proper als productes fabricats en sèrie [1].

La primera de les tecnologies FA que va sorgir va ser l'estereolitografia (*Stereolithography*, SLA), comercialitzada per primer cop a la dècada dels 80 per la companyia *3D Systems*. Actualment hi ha una gran varietat de tecnologies i processos que engloben la fabricació additiva [14]. Alguns exemples dels més utilitzats avui dia entre d'altres es descriuen a continuació:

- **Estereolitografia (SLA):** és el procés de fabricació que utilitza resines fotosensibles que curen i solidifiquen quan hi incideix a una llum ultraviolada. Aquesta llum, normalment projectada amb un díode làser o projector, defineix una secció transversal de l'objecte, formant una fina capa de material solidificat. L'objecte final s'aconsegueix a partir de la successió de capes solidificades que queden unides entre si sobre la plataforma de fabricació. Un cop fabricat el component, és necessari aplicar un tractament de post-curat amb llum ultraviolada si es vol obtenir les màximes prestacions mecàniques de la resina utilitzada.
- **Modelat per Extrusió Fosa (*Fused Deposition Modelling*, FDM):** Aquest sistema es basa en el procés de deposició de material a partir d'un procés d'extrusió. L'extrusor del material sol anar muntat sobre un capçal, el qual es mou transversalment sobre la plataforma d'impressió fabricant una capa de l'objecte. Un cop acabada una capa, la plataforma es desplaça seguint l'eix Z de la màquina per imprimir la següent capa de l'objecte. Aquests sistemes de fabricació solen utilitzar materials en format bobina, el qual va entrant dins l'extrusor durant el procés d'impressió. Actualment aquests sistemes són els més utilitzats i estesos a nivell domèstic, ja que és una de les tecnologies de FA més assequibles i fàcils d'utilitzar.
- **Sinteritzat Selectiu per Làser (*Selective Laser Sintering*, SLS):** Aquest sistema utilitza un làser per fondre material que es troba en forma de pols. Aquesta pols és dipositada capa a capa durant el procés de fabricació, solidificant només la que hi ha incidit el raig del làser. A l'igual que amb les altes tecnologies FA, l'objecte es fabrica capa a capa i s'aconsegueix el resultat final amb la superposició de successives capes de material que s'uneixen durant el procés de sinteritzat. El procés SLS permet

obtenir objectes amb uns bons acabats i formes complexes sense la necessitat de cap post-procés, a diferència de l'estereolitografia.

- **Impressió *Inkjet*:** Els sistemes *Inkjet* tenen un funcionament similar al d'una impressora de paper. Durant el moviment del capçal, aquest diposita micro-partícules de resina formant una capa de material sobre la plataforma d'impressió. En el mateix capçal, una font de llum, normalment ultraviolada, cura la resina solidificant el material imprès. La plataforma d'impressió va baixant a mesura que s'imprimeixen les capes de material formant la peça final. Les tecnologies *Inkjet* també proporcionen uns bons acabats i permeten crear objectes que combinen varis materials i colors.

Un altre punt destacat de les tecnologies de fabricació additiva és la varietat de materials amb els quals es pot treballar. Els polímers són la família de materials àmpliament més utilitzada per aquest tipus de tecnologies però també es poden utilitzar materials com ceràmiques i metalls. Aquests últims estan prenent gran rellevància els últims anys i s'estan aplicant en diferents tecnologies de FA [17] degut a les propietats mecàniques superiors que ofereixen les peces respecte les fabricades amb polímers. En alguns àmbits industrials específics, l'ús de FA amb materials metàl·lics està permetent millorar processos de fabricació més tradicionals com la injecció de plàstic, permetent utilitzar components amb geometries complexes que ofereixen un millor rendiment [6] o millorant el desenvolupament de nous productes en Injecció Metàl·lica (*Metal Injection Moulding, MIM*) [13].

El conjunt de tecnologies de fabricació additiva estan estretament lligades al concepte *Rapid X (RX)*, que engloba els termes *Rapid Prototyping (RP)*, *Rapid Tooling (RT)* i *Rapid Manufacturing (RM)* [10]. Aquests termes fan referència a la capacitat de fabricar prototips, utilitatges o peces finals amb un temps i cost reduïts. Aquesta capacitat juntament amb la complexitat geomètrica i varietat de materials que poden utilitzar-se, han fet que les tecnologies additives s'estenguin en molts camps d'aplicació i recerca diferents.

El camp de la medicina és un dels que s'estan realitzant més avenços amb tecnologies FA [9]. L'alta precisió que ofereixen algunes tecnologies com SLA o *PolyJet* juntament amb nous materials bio-compatibles [16] permeten reproduir parts del cos humà amb una gran qualitat, amb els quals es poden fabricar pròtesis, òrgans o utilitatges personalitzats per un pacient concret. La possibilitat d'imprimir un òrgan o part del cos a partir d'una ressonància magnètica o termografia computeritzada permet adaptar el component al pacient, facilitant la seva implantació dins el cos i reduint el temps de recuperació post-operació.

Les tecnologies FA tenen multitud d'avantatges respecte les tecnologies de fabricació tradicionals [8], però l'avantatge que destaca en tots els camps on s'estan aplicant és la reducció de temps i cost de desenvolupament. A diferència d'altres processos, les tecnologies additives permeten el pas directe entre el disseny de l'objecte en un entorn de Disseny Assistit per Ordinador (*Computed Aided Design, CAD*) i la seva fabricació.

Aquesta connexió permet realitzar ràpidament canvis en el disseny i prototipar l'objecte de nou sense la necessitat d'utilitzar nous utilitatges.

No obstant les tecnologies de fabricació additiva també presenten una sèrie d'inconvenients en comparació a mètodes de fabricació tradicionals:

- La capacitat productiva es veu limitada en sèries llargues de producció. Actualment les tecnologies tradicionals com processos d'injecció de plàstic o estampació permeten cicles de treball molt més ràpid, optimitzades per produccions llargues.
- Els materials i processos que utilitzen les tecnologies FA no permeten obtenir les mateixes propietats tèrmiques i mecàniques que s'aconsegueixen amb mètodes de fabricació tradicionals. Aquest fet comporta que la vida útil dels components es trobi limitada a un ús reduït. Actualment amb la majoria de tecnologies FA només es poden obtenir components per prototipatge o d'ús en pre-sèries o sèries curtes de producció, quedant molt limitat el seu ús en sèries de producció massives.
- El fet que hi hagi multitud de tecnologies, processos i materials diferents comporta que no hi hagi un mètode estàndard per mesurar les peces i assegurar la seva precisió dimensional i propietats mecàniques [8]. Actualment una de les incerteses més importants dels fabricants de tecnologies de FA és saber amb exactitud les propietats dels seus components, ja que aquestes poden variar notablement degut al material utilitzat per la seva fabricació, les impureses que hi pugui haver o les condicions climàtiques de l'entorn.

## 2.2. Fabricació de motlles/inserts amb FA

L'ús de les tecnologies FA està molt lligat al prototipatge de productes durant el seu desenvolupament. No obstant aquesta fase només permet obtenir objectes amb una geometria igual o molt similar, sense poder representar les característiques mecàniques o tèrmiques del producte final.

La possibilitat de fabricar utilitatges o motlles a partir d'aquestes tecnologies obre un nou ventall de possibilitats per a les tecnologies d'impressió 3D, podent ser utilitzades per fabricar components totalment funcionals. Els fabricants de màquines i materials d'impressió 3D són conscients d'aquesta oportunitat i des de fa uns anys ja ofereixen materials específics per ser utilitzats per aquestes finalitats. Alguns d'aquests fabricants fins i tot tenen elaborades guies que mostren els resultats que ells mateixos han obtingut fabricant motlles o utilitatges per diferents processos industrials [3] [4] [5].

Paral·lelament, i veient les oportunitats tecnològiques que representa crear elements funcionals a partir de tecnologies FA, s'estan fent nombrosos estudis per estudiar la seva viabilitat en diferents camps [1] [2] [10] [11] [12]. Les avantatges que representa l'ús de tecnologia de fabricació additiva per fabricar motlles o utilitatges són els següents:

- Una reducció de temps de fabricació del component d'entre el 80% [4] i el 95% [5] respecte mètodes de fabricació tradicionals com el CNC.
- Una reducció del cost de fabricació superior al 80% [5] respecte utilitatges fabricants mitjançant CNC.
- La possibilitat de fabricar geometries complexes o unificar varis components en un de sol, gràcies a les capacitats de fabricació de les tecnologies FA.

Tot i els avantatges que s'han presentat, els utilitatges fabricats amb fabricació additiva també presenten alguns inconvenients:

- Tenen una durabilitat limitada. Això és degut tant pels mètodes de fabricació com els materials emprats per fabricar-los. Normalment els motlles fabricats en FA serveixen per funcionar fins a uns pocs centenars de cicles de treball, degut al seu desgast. A diferència dels motlles metàl·lics, que solen estar fabricats amb CNC, els motlles fabricats amb FA no poden ser utilitzats en processos de fabricació massives.
- Un segon fet destacat per aquests components és la limitació de materials amb els quals es poden provar. En el cas d'un motlle d'injecció de plàstic, normalment l'ús d'aquests motlles queda limitat amb plàstics més tous com polietilè de baixa densitat [1]. L'ús de plàstics més durs, com l'ABS, també és possible però a costa d'escurçar la vida útil de l'utilitatge.
- Un altre dels problemes d'aquests components és la precisió dimensional i acabat superficial de les peces. Tot i l'alta precisió d'algunes de les tecnologies FA, aquestes no poden arribar a les toleràncies que s'aconsegueixen avui dia amb mecanitzats CNC o fabricació amb electroerosió. L'altre aspecte notable és la qualitat superficial de les peces, normalment es poden arribar a apreciar les marques de les capes o partícules amb les que s'ha fabricat l'utilitatge amb impressió 3D.

Tots aquests aspectes fan que la fabricació additiva pugui participar en totes les fases de desenvolupament d'un producte, no només en el prototipatge inicial sinó també en les fases on es prova el procés de fabricació o el funcionament i assemblatge dels components. Aquesta possibilitat fa que diferents sectors industrials s'interessin cada cop més per aquests nous mètodes de fabricació, incorporant-los en les seves cadenes de desenvolupament de nous productes.

Dintre del nombrós grup de tecnologies de FA, n'hi ha 3 que destaquen per ser utilitzades per fabricar utilitatges o motlles de fabricació [2]:

- Estereolitografia (SLA): fabricants d'aquesta tecnologia disposen de resines especials dissenyades per aguantar esforços mecànics a temperatures superiors a les resines estàndard. En el cas de l'empresa *Formlabs*, es poden utilitzar resines com la *High Temp*, dissenyada per aguantar una temperatura de deflexió de fins a 238°C sota una pressió de 0,45MPa.

- Sinterització Làser (SL): La sinterització làser permet fabricar motlles amb polímers o metalls. És la tecnologia FA que més es pot implementar a nivell productiu degut a la capacitat de fabricar objectes metàl·lics, amb una resistència i durabilitat majors.
- Polyjet: a l'igual que amb l'SLA, fabricants de tecnologia Polyjet, han dissenyat materials específics per aplicacions com la fabricació de motlles. Un exemple és la companyia *Stratasys*, la qual disposa del material *Digital-ABS*, utilitzat en la fabricació de motlles de sèries curtes per injecció de plàstic.

Com s'ha comentat, la possibilitat d'imprimir peces metàl·liques permet la seva utilització en motlles de producció. A part de la tecnologia de SL, altres com la Fusió per Feix Làser (*Laser Beam Melting, LBM*), Fusió per Feix d'Electrons (*Electron Beam Melting, EBM*) o Deposició de Metall amb Làser (*Laser Metal Deposition, LMD*) [17] poden fabricar aquest tipus de components metàl·lics. El gran interès per aquest tipus de peces, és la possibilitat de fabricar canals o sistemes de refrigeració pels motlles d'injecció amb geometries molt més complexes i eficients que les fabricades fins ara amb altres mètodes de fabricació. Aquest augment de la capacitat de dissipació es tradueix directament amb una reducció de temps de refredament del motlle, reduint el temps de cicle de les màquines d'injecció. Aquesta reducció de temps implica una producció major en el mateix temps degut a l'augment de refrigeració obtingut.

### 2.3. Precisió dimensional en la FA

Tal com s'ha comentat, la precisió dimensional de les peces de FA és un dels factors que genera més incertesa d'aquestes tecnologies. La gran varietat de processos i màquines amb prestacions diferents fa difícil, o quasi impossible, determinar unes toleràncies generals que es puguin aplicar en diferents processos.

Així doncs l'únic mecanisme viable per determinar la precisió que ofereix una màquina de FA sol basar-se en la fabricació d'un component estàndard i realitzar un seguit de mesures sobre la peça.

Aquest procés ja s'ha realitzat en algun estudi [21], on es van fabricar peces amb geometries pre-definides utilitzant diferents màquines de tecnologies com SLS o Polyjet. L'objectiu principal de l'estudi es basava en comparar paràmetres com distàncies, angles, radis o diàmetres de les peces i determinar quina de les màquines oferia una millor precisió en cada un dels d'aquests punts.

L'estudi va concloure que no sempre s'obtenia el millor resultat amb la mateixa màquina. Depenent de la geometria fabricada, s'obtenien millors o pitjors resultats dimensionals en cada màquina. També es va observar a partir de les mesures que la mateixa màquina tampoc obtenia un error dimensional semblant en els eixos X,Y,Z de la peça. Finalment també es van detectar diferències segons els paràmetres mesurats. Mentre que una màquina obtenia els millors valors en amplada o llargada d'una peça, no s'obtenien els angles o radis tant precisos com els obtinguts amb altres tecnologies.

Finalment com a recomanació s'indica que si es vol obtenir una peça més ajustada dimensionalment, amb qualsevol dels mètodes de fabricació utilitzats, es fabriquï una peça de prova i a partir de les mesures realitzades es modifiquin els paràmetres necessaris en el model CAD per compensar les desviacions obtingudes, obtenint així un model més ajustat al teòric.

Si s'estudia la precisió dimensional en la tecnologia SLA, utilitzada en aquest treball, hi ha diferents causes que poden afectar a la precisió de les peces [22]:

- El format digital de la peça. Normalment en fabricació additiva s'utilitza el format stl (*stereolitography*) el qual genera una malla de l'objecte 3D dividit en multitud de triangles. Tot i poder configurar mallats amb un gran nombre de triangles, aquest procés comporta una pèrdua de precisió sobretot en superfícies corbes i radis.
- El gruix del punt làser de la màquina SLA. Aquest pot variar en diferents màquines o fins i tot en la mateixa màquina al llarg del temps degut al seu ús.
- La contracció del material. Aquesta és degut al propi procés de curat que s'utilitza en l'estereolitografia.
- Els propis paràmetres de la impressió. Normalment les màquines de FA permeten ajustar algun dels paràmetres de fabricació, fent que variï la precisió dimensional de les peces.
- El post-curat de les peces. De la mateixa manera que durant el procés de fabricació, durant el post-curat també es pot generar una contracció del propi material de la peça.

Finalment també s'ha de tenir en compte el temps de fabricació, estretament lligat a la precisió dimensional. Si es configura una màquina de FA per obtenir la màxima precisió possible, es solen obtenir temps de fabricació molt més elevats, degut al gran nombre de capes que amb que es divideix el component a fabricar. Molts cops caldrà trobar un equilibri que permeti obtenir peces amb una precisió acceptable a un cost (temps de fabricació) ajustat al projecte.

## 2.4. Emmotllament per ultrasons

L'emmotllament per ultrasons és una nova tecnologia de fabricació amb la qual es poden obtenir micro-parts amb materials com polímers. A l'igual que en la injecció de plàstics convencional, aquesta tecnologia utilitza material en format pèl·let el qual es fon a partir de l'energia ultrasònica [18].

Tot i ser una tecnologia poc aplicada i estudiada al llarg de la història, en la darrera dècada s'han publicat diversos articles de recerca relacionats amb l'emmotllament per ultrasons [19]. L'interès per aquesta tecnologia recau en la capacitat de fabricar peces

petites en sèries curtes o mitjanes amb un temps de cicle relativament curt i una flexibilitat major als motlles d'injecció tradicionals.

Les parts principals d'una màquina d'emmotllament per ultrasons són les següents:

- La unitat acústica. Aquesta està formada pel generador, el transductor, l'amplificador i el sonotrode. El transductor transforma l'energia elèctrica del generador en vibracions, les quals es poden amplificar o atenuar amb l'amplificador. Finalment les vibracions arriben al sonotrode, el qual transmet aquestes sobre el material a fondre.
- El motlle de la peça. Aquest sol estar format per dos parts i conté les cavitats d'injecció de les peces.
- La cambra de plastificació. És la zona on s'introdueix el material i es fon abans no es comprimeix cap a les cavitats d'injecció.
- El *plunger*. És un element de forma cilíndrica que es desplaça en el mateix eix que el sonotrode. Aquest s'encarrega de compactar i pressionar el material cap a les cavitats d'injecció un cop aquest ha plastificat.

El procés de fabricació amb aquesta tecnologia segueix els següents passos (Figura 2.1):

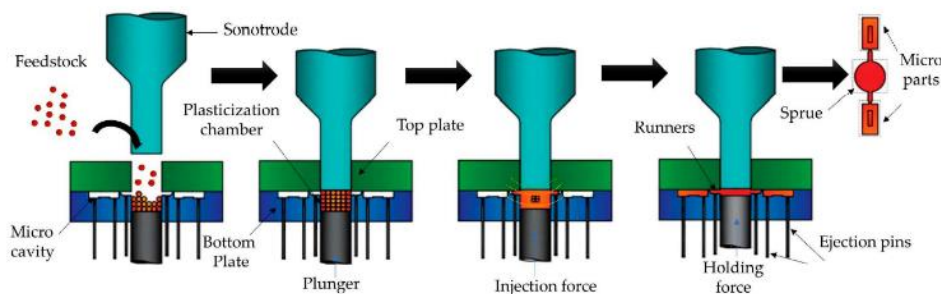


Figura 2.1 Procés d'emmotllament per ultrasons. (Font: HEREDIA-RIVERA, U. , FERRER, I. , VÁZQUEZ, E. Ultrasonic Molding Technology: Recent Advances and Potential Applications in the Medical Industry)

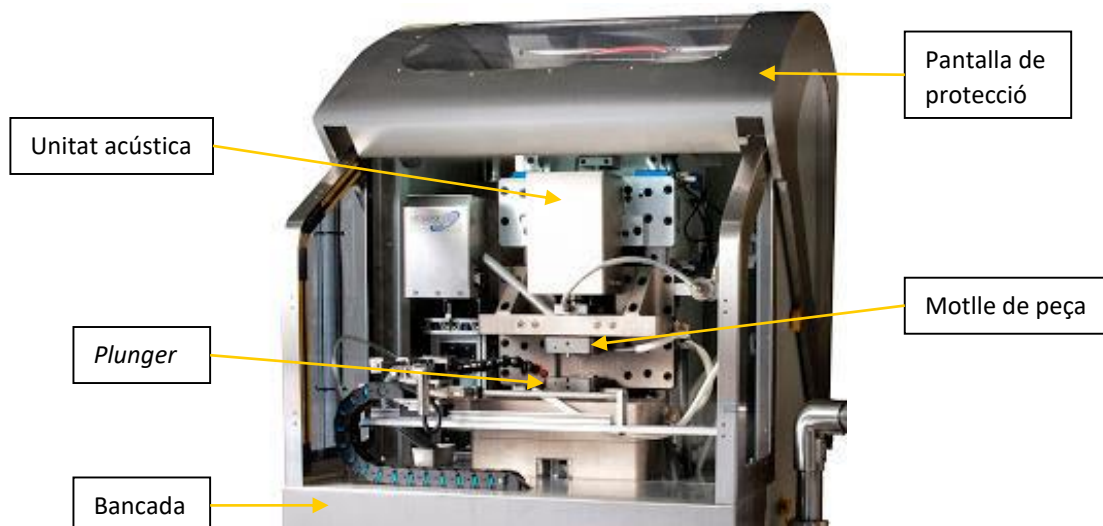
1. Primerament s'introdueixen els pèllets de material dins la cambra de plastificació del motlle.
2. El sonotrode baixa fins arribar a l'alçada de les cavitats d'injecció i comença a plastificar el material que es troba dins la cambra de plastificació.
3. Quan el material es s'ha plastificat el plunger ascendeix comprimint i empenyent el material dins les cambres d'injecció.
4. Quan s'han omplert les cambres d'injecció es refreda el motlle fins solidificar les peces fabricades.

5. Finalment el sonotrode torna a la posició inicial i s'obre el motlle.

Aquesta tecnologia ofereix un seguit d'avantatges importants respecte les tecnologies de fabricació d'injecció de plàstic convencionals:

- Un major aprofitament del material. La quantitat necessària de material per cada cicle de treball és únicament el necessari per omplir la cavitat d'injecció i la cambra de plastificació, oferint un estalvi considerable de material.
- Un consum energètic menor. Al necessitar fondre menys material, també es requereix menys energia per cada part produïda.
- Una major flexibilitat entre proves de diferents materials o peces, ja que el material utilitzat és extret completament en cada peça fabricada. Normalment en els motlles d'injecció tradicionals és necessari realitzar varis cicles d'injecció entre diferents motlles per netejar les parts on el plàstic fos hagi pogut quedar adherit.
- Una menor degradació del material injectat. Al focalitzar l'energia de les vibracions directament sobre el material, aquest plastifica ràpidament. Normalment el material es troba fos menys de 5 segons, un temps molt menor que en la injecció convencional.

La màquina d'emmotllament per ultrasons que s'utilitza actualment al *Grup de Recerca en Enginyeria de Procés, Producte i Producció (GREP)* és la *Sonorus 1G* de la companyia *Ultrason S.L.* Les principals parts de la màquina queden indicades a la Imatge 2.1.



Imatge 2.1 Parts principals de la màquina Sonorus 1G (Font: <http://ultrason.eu/portfolio/dapibus-euismod-tristique-vestibulum/>)



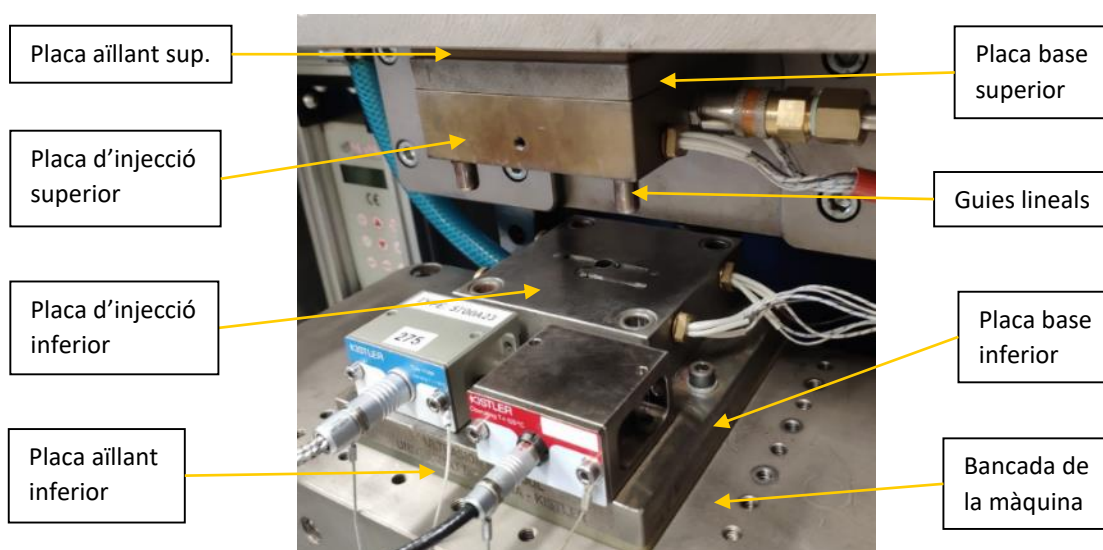
### 3. DESCRIPCIÓ DEL MOTLLE

#### 3.1. Descripció del motlle actual

El motlle de partida d'aquest treball s'utilitza actualment al GREP per a la fabricació de peces de plàstic mitjançant el procés d'emmotllament per ultrasons. Una de les cavitats del motlle correspon a una proveta estàndard (UNE-EN ISO 20753:2008 amb designació A15 però amb  $1\pm 0,1$  mm de gruix) a escala 1:5, utilitzada per caracteritzar les propietats mecàniques dels materials que s'injecten. Les dos cavitats restants corresponen a provetes que s'utilitzen per veure el comportament de diferents materials durant el procés d'injecció.

El motlle està format per un conjunt de plaques metàl·liques que allotgen els sistemes de guiatge, elements calefactors i elements de muntatge. Aquestes peces estan aïllades tèrmicament de la resta de la màquina amb unes plaques aïllants. A nivell funcional el motlle presenta dos conjunts diferenciats (Imatge 3.1):

- La part inferior del motlle es troba fixa a la bancada de la màquina. En aquest conjunt s'hi troba una placa aïllant tèrmica, una placa base de suport i la placa d'injecció inferior. En aquesta part del motlle també es troba el sistema d'expulsió, compost per un guiatge independent, els expulsors de les cavitats i un conjunt de plaques internes de suport i muntatge.
- La part superior del motlle és la part mòbil. Aquesta va muntada sobre un sistema de guiatge lineal que permet obrir i tancar les cavitats d'injecció. Aquest conjunt està format per una placa aïllant tèrmica, una placa base de suport i la placa d'injecció superior.

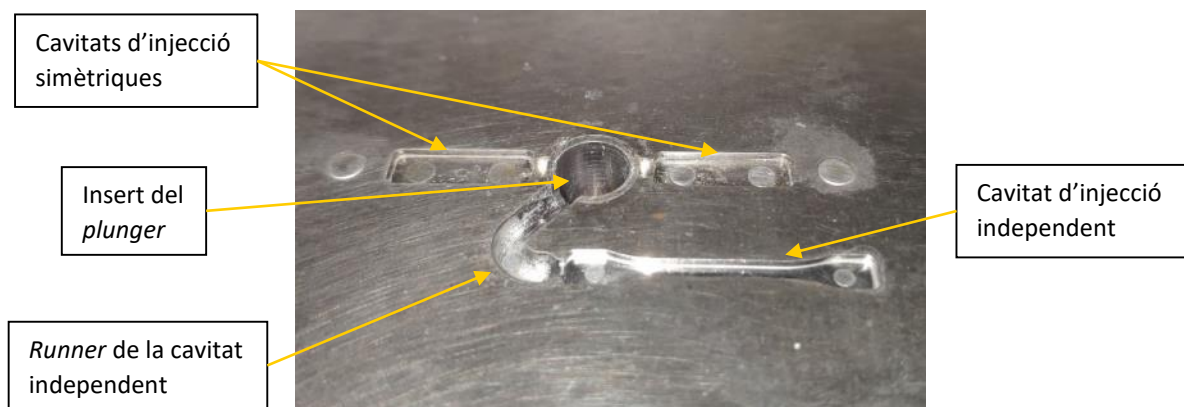


Imatge 3.1 Motlle d'injecció actual (Font pròpia)

Tant la placa d'injecció superior com la inferior tenen un sistema de resistències elèctriques que permeten escalfar el motlle durant el procés d'injecció. Addicionalment la placa d'injecció superior porta una entrada d'aire a pressió. Aquest aire s'utilitza pel centrament del presoner intern que guia el sonotrode. A més dels components citats aquest motlle disposa d'uns sensors que s'utilitzen actualment pel control de temperatura i pressió del motlle. Aquests sensors es troben inserits dins de les plaques base i d'injecció del conjunt inferior.

Respecte les cavitats d'injecció del motlle, aquestes estan formades per les dos plaques d'injecció. La placa superior d'injecció és totalment llisa, fent la funció de tapa durant el procés d'injecció. Es creu que substituir aquest element per un altre fabricat amb processos additius no aportaria una gran millora de cost i temps respecte l'estat actual. A més la precisió ens els processos FA és menor que amb CNC. Fabricar la placa superior amb processos additius podria afectar negativament amb el guiatge del motlle.

La placa d'injecció inferior té mecanitzades les tres cavitats d'injecció, juntament amb els allotjaments dels coixinets de les guies i un forat central per on entra l'èmbol impulsor, conegut generalment pel *plunger* (Imatge 3.2). Les cavitats d'injecció estan distribuïdes de la següent manera: dos de les cavitats estan col·locades simètricament respecte el centre i una tercera cavitat en un lateral. A partir d'un insert central es pot seleccionar manualment quina de les cavitats es vol injectar, deixant pas al plàstic que es fon cap als diferents canals d'alimentació (*runners*) de les respectives cavitats.



Imatge 3.2 Cavitats d'injecció del motlle actual (Font pròpia)

Aquest treball, es centrarà en l'estudi i modificació de la placa d'injecció inferior ja que és on hi ha la geometria de les cavitats i on aplicar-hi les noves tecnologies de fabricació additiva podria aportar més beneficis.

### 3.2. Estratègia de disseny del nou motlle

Per iniciar el disseny del motlle en FA s'ha agafat com a punt de partida la placa d'injecció inferior del motlle actual. Per simplificar el disseny del nou motlle, aquest només inclourà les dos cavitats d'injecció distribuïdes simètricament (Figura 3.1). També s'ha simplificat el motlle eliminant les resistències calefactores i els sensors de temperatura i pressió actuals.

Seguint l'exemple de diferents estudis i experimentacions consultades [1] [2] [3] i [5] s'ha seguit l'estratègia de dividir la placa del motlle en dos parts diferenciades:

- Un insert modular central fabricat amb processos FA on hi haurà les cavitats d'injecció, l'allotjament del *plunger* i els expulsors del motlle.
- Un marc exterior de fabricació CNC on s'hi muntarà el guiatge de les guies lineals i els cargols de muntatge amb la resta de la màquina. A partir d'ara s'anomenarà aquest component amb les sigles MUD (*Master Unit Die*), tal com és àmpliament conegut en el sector de la injecció de plàstic [1] i [3].

Seguint aquesta estratègia, s'ha dividit el treball en dos desenvolupaments en paral·lel: el disseny del MUD i el disseny de l'insert per a fabricació additiva.

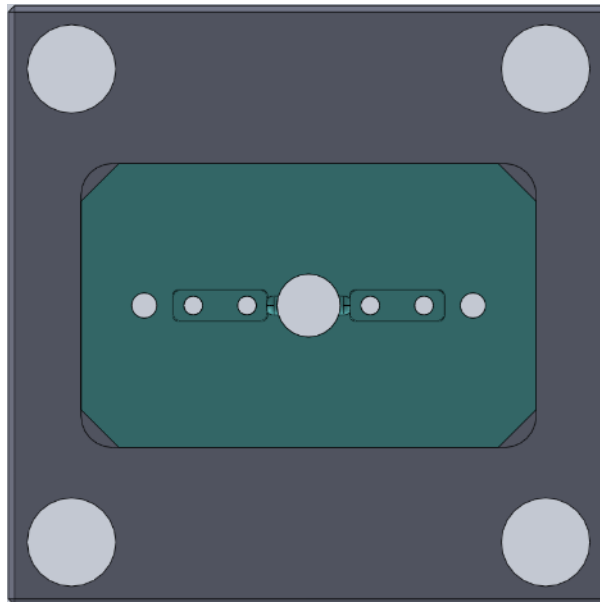


Figura 3.1. Divisió del motlle actual en dos parts: en verd l'insert central i en gris el MUD (Font pròpia)

### 3.3. Disseny del marc exterior (MUD)

El marc exterior serà l'element que envoltarà l'insert de fabricació additiva. Aquest element serà l'enllaç que permeti el muntatge entre les cavitats d'injecció a la màquina.

També serà la peça encarregada de guiar el motlle, ja que allotjarà els coixinets lineals de guiatge.

Els avantatges principals que té la utilització d'un MUD combinat amb un insert modular intercanviable fabricat en FA, en comptes de fabricar tot el motlle (inclosa la cavitat d'injecció) amb fabricació additiva, són els següents:

- Ofereix protecció al motlle durant la seva manipulació i muntatge en màquina.
- Reforça i protegeix el motlle durant els cicles d'injecció, repartint millor els esforços de compressió. També evita que l'insert es deformi en excés durant els cicles d'injecció degut a la menor duresa dels materials utilitzats processos additius.
- Ofereix una major precisió en el posicionament i alineació del guiatge amb la resta de la màquina d'injecció.
- Simplifica l'intercanvi de motlles diferents en una mateixa màquina, fent només necessari el canvi d'insert central sense manipular altres elements. Això també comporta no haver d'alinejar de nou el motlle ja que el guiatge resta muntat i fix en tot moment.

L'ús d'un marc fabricat amb control numèric va en contraposició amb el concepte *Rapid Tooling* [10], amb el qual es basen les tecnologies de fabricació additiva ja que comporta un cost de fabricació elevat i un temps de fabricació més llarg. No obstant, al ser un marc sense la geometria de cavitats d'injecció, permet el seu ús en múltiples projectes i repartint el seu cost. A més, al no tenir geometries complexes, es redueix en part el temps de fabricació d'aquest element si es compara amb el mateix marc original fabricat completament amb metall.

Com s'ha comentat, el motlle parteix de l'actual placa d'injecció inferior. Seguint com a referència aquest component, el MUD tindrà unes mides exteriors de 95mm de llargada, 95mm d'amplada i 27mm de gruix (Figura 3.2). Les modificacions principals del MUD respecte al model original es centren a la part central de la peça, on s'han eliminat les cavitats d'injecció. En el seu lloc s'ha dissenyat una caixa on s'allotjarà l'insert de fabricació additiva. Les mides de la caixa corresponen a 72mm de llargada, 45mm d'amplada i 10mm de profunditat amb un radi de 5mm a les cantonades. A la Figura 3.2 es mostra el model CAD i la vista en planta del MUD. A l'Annex G es pot consultar el plànol de detall d'aquest component.

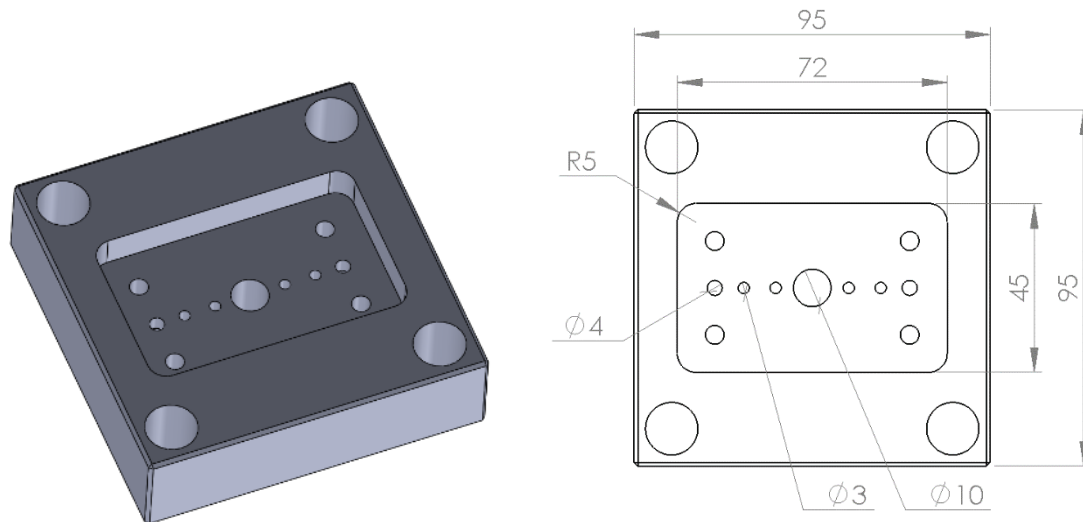


Figura 3.2 Esquerra: Model CAD del MUD. Dreta: Vista en planta del MUD (Font pròpia)

A la part central del MUD s'ha deixat els forats de guiatge ja existents pel *plunger* i expulsors. Aquests corresponen al forat central del MUD de 10mm de diàmetre, 4 forats de 3mm de diàmetre i dos més de 4mm de diàmetre. Aquests forats faciliten el centratge de tots aquests elements abans que tinguin contacte amb l'insert central. Per realitzar el muntatge dels inserts amb el MUD, s'utilitzaran 4 cargols de mètrica 5. Aquests aniran roscats als 4 forats situats prop de les cantonades de la caixa del MUD.

El sistema de guiatge del MUD consisteix en 4 guies lineals situades al seus extrems, seguint el model actual del motlle. Als quatre extrems del MUD hi ha un forat de 14mm de diàmetre on hi aniran muntats els guiatges lineals de la marca *Hasco* (model Z10/27x9). Aquest sistema lineal va en conjunt amb les columnes del mateix fabricant amb referència Z03/27/9x30, muntades a la placa d'injecció superior del motlle.

De cara a treballs futurs seria interessant plantejar la següent estratègia de fabricació del MUD :

- En una primera fase es podria fabricar el MUD amb un material tou com podria ser un polímer o tauler de fibra de densitat mitjana (MDF). L'objectiu d'aquest primer prototip seria la verificació de les mides de la peça així com les proves de muntatge i toleràncies amb els altres elements del motlle. En aquesta primera fase es podria realitzar la fabricació de forma interna a la Universitat de Girona utilitzant el centre de mecanitzat CNC Deckel Maho 64V Linear. D'aquesta manera es podria reduir el cost i temps de fabricació del MUD.
- En una segona fase i amb la verificació dels primers prototips, es podria fabricar el MUD definitiu amb un aliatge metàl·lic. En aquesta segona fase es recomana externalitzar la fabricació a un taller mecànic amb maquinària més especialitzada degut als requisits de tolerància que permetin un muntatge ajustat amb el sistema de guiatge del motlle i altres elements com el *plunger* i expulsors. Normalment els

motlles d'injecció es fabriquen en acer, degut a que han d'aguantar forces molt altes durant la injecció i han d'assegurar una vida útil llarga (normalment de milers de cicles de treball). En aquest cas però, degut a que la força que genera la màquina d'injecció Sonorus 1G és relativament baixa per un procés d'injecció de plàstic (30 kN), i que el motlle s'utilitzarà en recerca i no processos de producció massiva, es podria contemplar la fabricació del MUD en alumini, tal com es realitza en alguns estudis [1,3,4]. Fabricar el marc d'alumini facilitaria la seva mecanització i reduiria els seus costos de fabricació.

### 3.4. Disseny de la placa base i placa aïllant inferior

Tant per la placa base i placa aïllant inferior del motlle s'ha agafat com a punt de partida els models que estan muntats en el motlle original. L'objectiu principal de les modificacions en aquestes peces és facilitar el seu ús en diferents projectes, sent peces estàndard que es puguin adaptar a diferents motlles i no haver de dedicar-hi temps de desenvolupament en un futur.

La placa base del motlle és el component encarregat de suportar els diferents elements del motlle situats a la part inferior (part fixa). En el motlle d'estudi, la placa base serveix com a suport del motlle i també dels elements accessoris com són els sensors que s'han citat anteriorment.

La placa base per aquest treball té unes mides exteriors de 140mm de llargada, 95mm d'amplada i 15mm de gruix. La principal modificació respecte el model original és la caixa central, de 70mm de longitud i 35mm d'amplada (Figura 3.3).

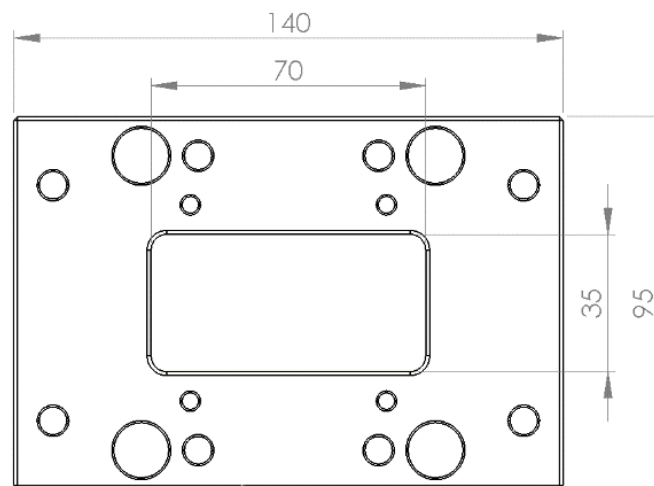


Figura 3.3 Vista en planta de la placa base (Font pròpia)

A la part central del motlle hi recorre el conjunt d'expulsors que van a joc per a cada motlle. La caixa central permetrà utilitzar aquest component sense interferir amb els punxons del motlle que es vulgui provar. A l'Annex G es pot consultar el plànol de detall d'aquest component.

La placa aïllant inferior s'utilitza per aïllar tèrmicament el motlle de la resta de la màquina. En el motlle del present treball no es contempla utilitzar resistències calefactades però en un futur es podrien incorporar per millorar el procés d'injecció. La placa aïllant té unes mides exteriors de 140mm de llargada, 95mm d'amplada i 5mm de gruix. Seguint el model de la placa base s'ha afegit una caixa central de 70mm de llarg i 35mm d'amplada (Figura 3.4). El plànol de detall de la peça es pot consultar a l'Annex G.

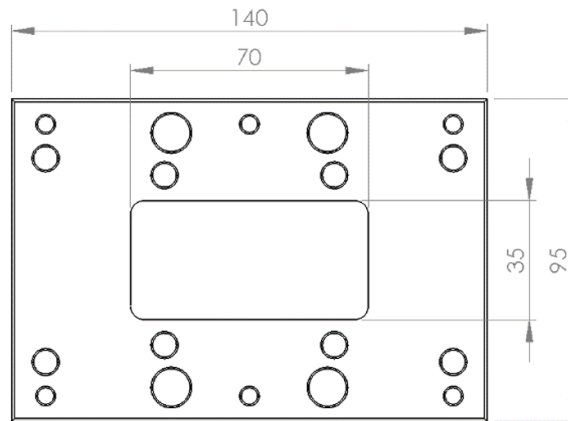


Figura 3.4 Vista de planta de la placa aïllant (Font pròpia)

### 3.5. Disseny de l'insert

L'insert és la peça central del conjunt del motlle. Aquest té unes mides de 72mm de llarg, 45mm d'ample i 10mm de gruix (Figura 3.5). El muntatge de l'insert amb el MUD es farà a partir de 4 cargols de mètrica 5. Aquests cargols quedaran allotjats dins l'insert per no col·lidir amb la placa d'injecció superior quan es tanqui el motlle. Als 4 extrems de l'insert s'ha deixat un xamfrà de 6mm a 45° per facilitar el muntatge amb el MUD. Respecte als expulsors del motlle, s'han deixat els dos actuals per a cada cavitat i els dos pivots de guiatge ubicats a un lateral de cada cavitat.

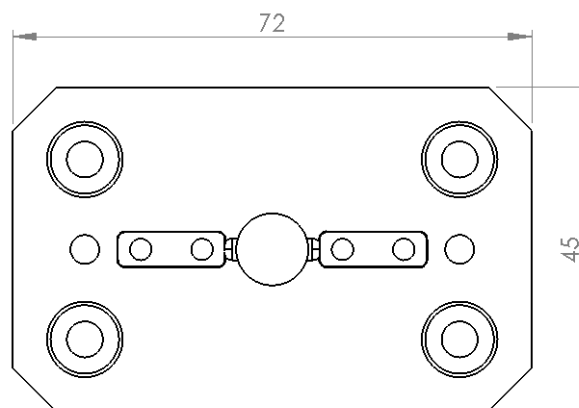


Figura 3.5 Vista de planta de l'insert (Font pròpia)

Els avantatges d'utilitzar un insert pel motlle d'estudi són els següents:

- Permet realitzar canvis entre motlles de forma ràpida. Tal com s'ha dissenyat es pot muntar l'insert un cop obert el motlle sense haver de manipular cap altre component.
- Minimitza la fabricació de recanvis. Un cop es desgasti o malmeti l'insert, es pot substituir per un de nou sense haver de fabricar tota la peça que forma el motlle actual.
- Al dividir el motlle actual en dos peces, la part d'estereolitografia és molt més petita, reduint considerablement el temps d'impressió i volum de resina consumit en la seva fabricació. D'aquesta manera també es facilita la fabricació de recanvis.

Per veure amb més detall les característiques de l'insert, es pot consultar el plànol a l'Annex G.



## 4. INSERT DEL MOTLLE

### 4.1. Pla experimental

Com s'ha vist en l'estat de l'art, hi ha varies tecnologies de fabricació additiva amb la capacitat per fabricar diversos utilatges i parts de motlles destinats a la injecció de plàstics, com l'SLS, SLA o *Polyjet*. Actualment el *GREP* disposa d'una màquina d'estereolitografia (SLA), la *Form 2* de l'empresa *Formlabs*. Algunes de les característiques principals d'aquesta màquina queden recollides a la Taula 4.1. La resta de paràmetres de la *Form 2* es poden trobar a l'annex A.

Taula 4.1 Característiques principals de la màquina *Form 2*

Paràmetre	Valor
Volum d'impressió	145x145x175 mm
Alçada de capa	25,50 o 100 µm
Llargada d'ona del làser	405 nm (ultraviolat)
Diàmetre del punt làser	140 µm

Degut a la disponibilitat d'aquesta màquina *Form 2* al taller del *GREP*, s'ha decidit utilitzar la tecnologia SLA com a mètode de fabricació per l'insert del motlle.

A continuació es defineixen, de forma genèrica, els principals paràmetres de la tecnologia que poden afectar al resultat de les peces fabricades amb la màquina *Form 2*:

- **Alçada de capa:** és el valor de l'alçada entre capes de la impressió de les peces. Com més petit sigui aquest valor, major serà la resolució de la peça final. En aquest treball s'ha definit l'alçada de capa de les peces que es fabricaran en 25µm, la mínima que permet la *Form 2*. S'ha escollit aquesta configuració ja que les cavitats d'injecció necessiten tenir la màxima resolució possible i cal assegurar que el motlle tingui la màxima precisió per assegurar el correcte muntatge amb la resta d'elements.
- **Posició d'impressió:** és la posició X,Y respecte la plataforma d'impressió on es fabricarà la peça. En aquest treball s'imprimiran les peces sempre a la posició central de la plataforma d'impressió de la màquina *Form 2*.
- **Orientació d'impressió:** és l'angle d'inclinació amb el qual la peça es fabrica respecte la plataforma d'impressió. Considerant les conclusions extretes d'un treball previ realitzat al *GREP* [20], en aquest projecte es realitzaran proves amb orientació plana (amb la cara més gran de l'insert paral·lela a la plataforma d'impressió) i orientació recomanada pel software de *Formlabs*.
- **Suports:** és el material utilitzat per subjectar la peça a la plataforma d'impressió durant el procés de fabricació de les peces. En aquest treball s'utilitzaran els suports recomanats automàticament pel software. Durant el procés d'eliminació dels

suports, es poden crear imperfeccions a la peça que podrien afectar al seu muntatge o funcionament. Per aquest motiu s'eliminaran aquells suports que recomani el programa però puguin estar en contacte amb les parets laterals de l'insert així com els diferents forats i cavitats que hi ha distribuïts per la peça.

- Temps de curat: és el temps durant el qual es realitzarà el curat amb llum ultraviolada un cop impresa i netejada la peça. Aquest paràmetre dependrà de la resina utilitzada per fabricar l'insert. El curat de les peces es realitzarà amb la màquina *Form Cure* (vegeu l'Annex A per veure les seves especificacions).
- Temperatura de curat: la temperatura a la qual es realitzarà el curat de la peça impresa. A l'igual que amb el temps de curat, aquesta dependrà de la resina emprada.
- Resina: és el material fotopolimèric amb el qual s'imprimirà l'insert. *Formlabs* té actualment una gamma ampla de resines amb aplicacions variades: estàndard, mèdica, elevada resistència, elevada temperatura, etc. També és possible utilitzar resines de tercers o utilitzar composicions pròpies compostes de resines amb altres materials de reforç [2].

## 4.2. Geometria i material amb una cavitat

Per poder determinar els paràmetres de fabricació més favorables per l'insert FA, s'han realitzat un seguit de proves preliminars a la fabricació de la peça final.

Per realitzar aquestes proves s'ha adaptat l'insert per fabricar unes peces de mostra. Els objectius d'estudi d'aquestes mostres són els següents:

- Determinar la precisió dimensional exterior de les peces (amplada i llargada).
- Comprovar la mida i forma dels forats del *plunger* i expulsors.
- Estudiar la regularitat superficial de la cara superior de l'insert (on hi ha ubicades les cavitats).

S'han definit aquests paràmetres d'estudi ja que són factors que podrien afectar al funcionament del motlle i al resultat final de les peces injectades.

A partir dels requisits esmentats s'ha definit una peça parcial de l'insert amb unes dimensions exteriors de 37mm de llargada, 14mm d'amplada i 10mm de gruix on hi ha el forat central del *plunger*, una de les cavitats d'injecció i els forats dels respectius expulsors. A la Figura 4.1 es pot veure la vista de planta de la peça de mostra de l'insert.

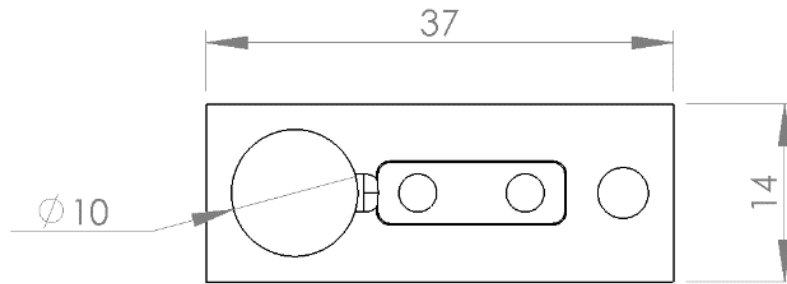


Figura 4.1 Vista de planta de la peça de mostra amb 1 cavitat (Font pròpia)

La resina que s'utilitzarà per fabricar l'insert del motlle és la *High Temp V1* de *Formlabs*, la qual ofereix una temperatura de deflexió relativament alta en comparació a la resta de resines (289°C a 0,45MPa). Un dels usos recomanats d'aquesta resina és la de fabricació de motlles per a processos industrials de sèries curtes. Es poden consultar les característiques principals d'aquesta resina a l'Annex B.

### 4.3. Paràmetres de procés

El principal paràmetre de procés que es vol analitzar en aquest treball és l'orientació de la peça durant la seva fabricació. A partir de les conclusions d'un estudi previ realitzat dins del grup de recerca *GREP* [20] es pretén saber si aquest paràmetre pot influir notablement al resultat final de les peces fabricades en SLA.

Considerant els resultats de l'estudi citat anteriorment s'ha decidit provar les inclinacions d'impressió plana i recomanada (Figura 4.2) degut a que les dues ofereixen diferents avantatges. Mentre que una orientació plana ofereix un millor acabat superficial de la cara superior de la peça, l'orientació recomanada obté millors resultats a nivell dimensional. S'ha descartat l'orientació vertical (amb la cara més gran de la peça a 90° de la plataforma d'impressió) degut a que obté els pitjors resultats comparatius tant a nivell dimensional com d'acabat respecte les dos altres orientacions.

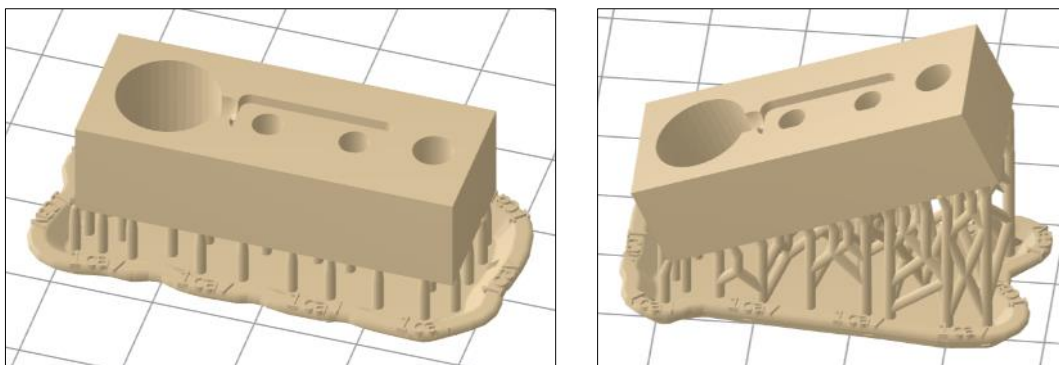


Figura 4.2 Orientacions d'impressió a la plataforma de la Form 2. Esquerra: plana. Dreta: recomanada

(Font pròpia)

Finalment les dos configuracions que s'utilitzaran per fabricar les peces de mostra queden descrites a la Taula 4.2. A partir de les diferents proves es determinarà quina d'aquestes dos configuracions és la més avantatjosa per fabricar l'insert final.

Taula 4.2 Paràmetres de fabricació de les peces

Nom peça	Mostra plana	Mostra recomanada
Alçada de capa d'impressió	25 µm	25 µm
Posició d'impressió	Central	Central
Orientació d'impressió	Plana [P]	Recomanada [R]
Suports d'impressió	Recomanats	Recomanats
Resina	Hi-temp V1	Hi-temp V1
Temps de curat <sup>1</sup>	30 min	30 min
Temperatura de curat <sup>1</sup>	60 °C	60 °C
Temps d'impressió	≈ 2h 10min	≈ 4h

Per cada una de les configuracions descrites s'ha imprès un total de 3 peces, que serviran per comparar les dos configuracions però també la seva repetibilitat sota els mateixos paràmetres.

#### 4.4. Caracterització dimensional

Els paràmetres que s'estudiaran amb les peces fabricades s'han dividit en 3 blocs principals:

- Anàlisi de les dimensions exteriors de la peça: es mesuraran les llargades i amplades de les diferents peces per comprovar la precisió i repetibilitat de les mostres.

En aquest treball no es contempla l'estudi del gruix de les peces ja que els suports utilitzats durant la fabricació generen moltes irregularitats a la cara posterior de les peces. Un cop es fabriqui l'insert final, es planejarà la cara posterior amb una fresadora o màquina CNC.

- Estudi de les dimensions i de la forma dels forats: s'analitzarà la precisió dimensional dels forats i la seva forma per les diferents orientacions d'impressió i diàmetres de forat.
- Anàlisi de la superfície de la cavitat principal: es prendran mesures al llarg de la cara superior del model per analitzar la seva regularitat.

<sup>1</sup> Pels valors de temps i temperatura de curat s'han pres els recomanats pel fabricant (*Formlabs*).

#### 4.4.1. Dimensions exteriors de la peça

El primer bloc de mesures consisteix en l'obtenció de la llargada i amplada de les peces de mostra fabricades. Dins d'aquesta fase s'han realitzat mesures amb dos mètodes diferents: mesures sense contacte i mesures amb contacte.

- **Mesures sense contacte:**

Per aquesta prova s'ha realitzat un escanejat d'una peça de mostra, en orientació recomanada, amb l'escàner 3D *EinScan Pro 2X Plus* de l'empresa *Shining 3D* (vegeu les seves característiques a l'Annex A).

L'objectiu principal d'aquesta prova és validar la viabilitat de mesurar les peces de mostra mitjançant un escàner 3D. Aquest tipus de mesura pot resultar molt interessant ja que permet obtenir informació molt completa de tota la superfície del model, no només les dimensions exteriors. Per aquest motiu es compararan els valors obtinguts utilitzant l'escàner amb altres instruments de metrologia del *GREP*.

Per poder realitzar l'escanejat amb la màxima resolució de l'instrument, s'ha utilitzat la taula giratòria automàtica de *Shining 3D* i l'escàner en el mode de funcionament fix, utilitzant un trípode (Figura 4.3). En aquesta configuració, l'escàner té un funcionament automàtic i escaneja l'objecte a mesura que la taula giratòria completa un gir de 360° a intervals prèviament programats. Per escanejar la peça de mostra s'ha configurat en intervals de 5°, fent un total de 72 passos.

L'escàner de l'empresa *Shining 3D* utilitza la projecció de diferents patrons de llum i dos càmeres que capten la seva projecció sobre l'objecte d'estudi. A partir de càlculs trigonomètrics i la deformació de les projeccions sobre l'objecte, l'escàner pot obtenir informació sobre la superfície del model. A mesura que es va escanejant el model, el software de l'instrument genera un núvol amb els diferents punts captats dins un entorn tridimensional (Figura 4.4).

Un cop generat el núvol de punts, s'ha utilitzat el mateix software de *Shining 3D* per realitzar el mallat de la peça a partir del conjunt de punts. El mallat consisteix en generar superfícies geomètriques, en el cas d'aquest estudi triangles, fent unions de diferents punts del núvol generat. També s'han eliminat punts innecessaris que no formen part de la superfície de la mostra i s'han corregit alguns error generats durant el procés d'escanejat, com algun punt mort al qual no ha pogut arribar l'escàner.

L'última part del procés s'ha realitzat amb el programa *Geomagic Essentials* (Figura 4.5) de l'empresa *3d Systems*. Aquest programa permet treballar sobre models escanejats en un entorn tipus CAD, permetent editar el model per reparar imperfeccions, definir plans i eixos de referència o exportar superfícies parcials del model. Un cop importada la malla de punts, s'han definit els eixos principals X,Y,Z del model digital. També s'han definit els eixos centrals dels forats com a referència per processos que es realitzaran més endavant. Amb les referències del model s'han

pogut fer mesures d'amplada i llargada de la peça. En total s'han fet 5 mesures per cada cota.

Finalment s'ha exportat la malla del model en format *stl* (*stereolithography*) per poder importar-se al programa de disseny utilitzat, en aquest treball el *Solidworks 2018*. A partir dels eixos de referència i els eixos centrals dels forats, s'ha muntat la malla escanejada sobre el model CAD original, podent observar les diferències entre el model teòric i les dades generades per l'escàner.



Figura 4.3 Escàner Einscan Pro 2X en funcionament fix (Font pròpia)



Figura 4.4 Visualització del model escanejat al software de Shining 3D (Font pròpia)

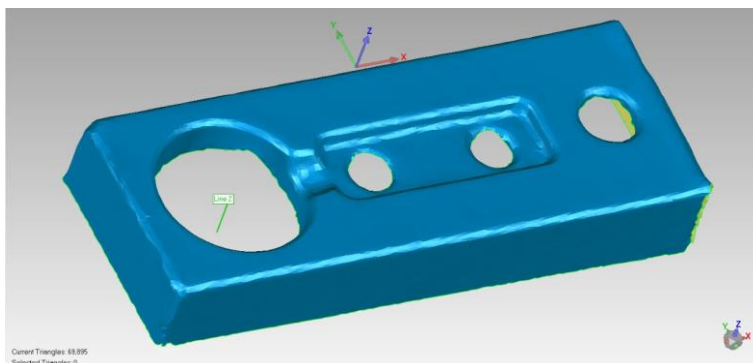


Figura 4.5 Visualització del model amb el programa Geomagic Essnetials (Font pròpia)

- **Mesures de contacte<sup>2</sup>**

En aquest estudi s'han utilitzat instruments de mesura de contacte del laboratori del GREP per mesurar la llargada i amplada de les mostres. S'han mesurat un total de 3 mostres fabricades amb orientació plana i 3 mostres en orientació recomanada.

- Llargada: s'ha mesurat la llargada de les peces amb el peu de rei digital *Mitutoyo Digimatic ABSOLUTE* (Annex A). Degut a que és difícil realitzar mesures d'aquesta cota en punts diferenciats de la peça a causa de la seva geometria i de les característiques del peu de rei, s'han realitzat 5 mesures consecutives de la llargada per cada una de les peces i s'ha calculat la mitjana dels 5 punts per a cada una de les mostres analitzades.
- Amplada: s'ha mesurat l'amplada de les peces amb el micròmetre digital *Mahr Micromar 40 EWW* (Annex A). Per a cada peça s'ha realitzat una mesura en cinc posicions diferenciades (P1, P2, P3, P4 i P5). A partir de d'aquestes mesures s'estudiarà la uniformitat de l'amplada al llarg de les peces en les diferents orientacions d'impressió. Les posicions de mesura es troben indicades a la Figura 4.6.

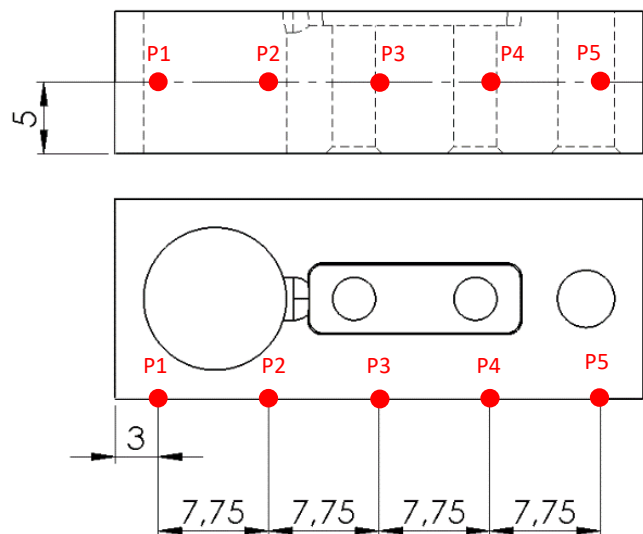


Figura 4.6 Posicions de mesura de l'amplada de les mostres (Font pròpia)

#### 4.4.2. Dimensions i forma dels forats

El segon bloc de mesures consisteix en l'anàlisi dels diferents forats de les peces de mostra. En aquest estudi també s'han mesurat 3 peces per a cada configuració, fent un total de 6 mostres. Totes les mesures d'aquest estudi s'han realitzat amb la màquina de

<sup>2</sup> Degut a la llargada de les peces de mostra, no s'han pogut realitzar les mesures de llargada i amplada amb el micròmetre. Per aquest motiu s'ha utilitzat el peu de rei per mesurar la llargada de les peces.

coordenades *Mitutoyo Crysta Apex 544* (Annex A) i un palpador esfèric de 2mm de diàmetre.

Per poder ordenar millor les dades de les diferents mesures s'ha definit la nomenclatura i cotes de referència per als diferents forats de l'insert. Aquesta informació es troba indicada a la Figura 4.7.

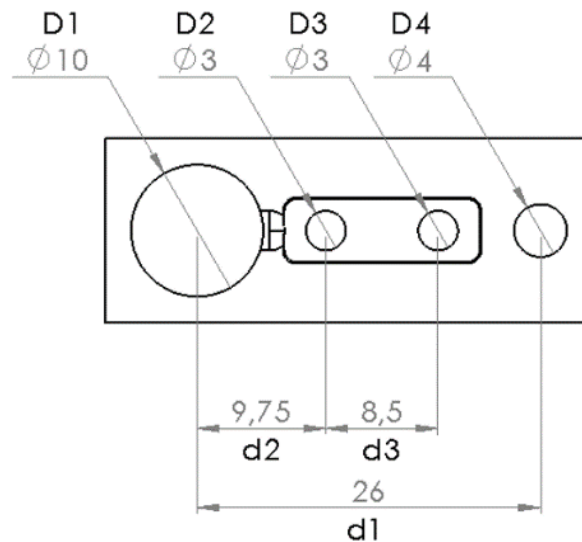


Figura 4.7 Cotes i nomenclatura dels forats mesurats (Font pròpia)

L'anàlisi dels forats s'ha separat en 3 parts diferents:

- Estudi dimensional dels forats: aquesta primera part consisteix en mesurar els diàmetres dels forats de les diferents mostres amb la màquina de coordenades. En aquest procés es posiciona la peça de referència a la taula de mesura de la màquina de coordenades i es realitzen 4 mesures de la cara superior de la peça per tal de crear el pla de referència que s'utilitzarà per fer la resta de mesures. Les mesures de diàmetre es realitzen a partir de 6 punts de contacte realitzats manualment dins de cada un dels forats que es vol estudiar. Un cop realitzats els punts, el software de la màquina de coordenades interpola els valors per obtenir el diàmetre de cada forat.
- Estudi dimensional de la distància entre forats: Un cop mesurats els forats d'una peça, es pot trobar la distància entre centres dels forats. Al tenir la posició X,Y,Z dels centres dels forats ja calculada en el procés d'interpolació, el càlcul de les distàncies és directe a partir del software de la màquina de coordenades.
- Estudi de forma dels forats: En aquest cas s'ha realitzat un escombrat de perfil de cada forat amb un pas de 0,5mm obtenint molts més punts per a cada forat (en lloc dels 6 punts de contacte obtinguts anteriorment). Aquest estudi aporta informació complementària als dos punts anteriors ja que d'aquesta manera es podrà veure si els forats tenen forma regular o hi ha imperfeccions que no s'han pogut detectar en les mesures de diàmetre. En aquesta part de l'estudi només s'han realitzat proves



amb els forats D1 i D4 (Figura 4.7) d'una sola peça per cada orientació degut a que no es disposava d'una bola de palpador prou petita per realitzar aquest escombrat en els forats D2 i D3.

Tots els punts de contacte mesurats s'han exportat tant en una fulla de càlcul com en un arxiu IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*). D'aquesta manera es podran analitzar de forma paral·lela les dades, per una banda a partir de les dades numèriques i per l'altra introduint els punts dins del *Solidworks 2018*, permetent observar les diferències respecte el model CAD original.

#### 4.4.3. Estudi de la superfície

El tercer bloc de mesures té com a objectiu determinar la regularitat de la cara superior de les peces (cara on hi ha les cavitats d'injecció). Aquest aspecte és fonamental en les peces que formen un motlle d'injecció ja que les irregularitats en les seves cares pot impedir el tancament complet del motlle i produir escapaments de material durant la injecció. Aquest efecte també es conegut com *flash* en el món de la injecció de plàstic [1]. En aquest apartat s'han analitzat dos peces de mostra, una de cada orientació d'impressió fabricades.

Per realitzar l'anàlisi superficial s'ha utilitzat la màquina de coordenades *Mitutoyo Cysta Apex* i la punta esfèrica de 2mm de diàmetre. Per cada una de les dos mostres estudiades s'ha seguit el procediment descrit a continuació:

1. S'ha muntat la mostra a la taula de mesura col·locant la cara on hi ha la cavitat mirant amunt.
2. S'ha realitzat un conjunt de punts de mesura manualment amb els quals s'han definit els eixos principals X,Y,Z de la peça i el centre de coordenades. El centre de coordenades s'ha ubicat coincidint amb el centre del forat D1 de 10mm (Figura 4.7) i a una alçada de 10mm respecte la taula de mesura, coincidint amb la cara superior de la mostra.
3. S'ha carregat un arxiu CAD de la peça en format IGES al software de control de la màquina. A partir d'uns moviments de referència amb la màquina de coordenades s'ha validat que tant el centre de coordenades de la peça com el model digital es troben alineats i orientats correctament.
4. A continuació s'ha definit un escombrat de punts sobre el model digital per tota la cara superior de la peça. Aquest escombrat s'ha configurat per realitzar 20 punts de mesura seguint l'eix X (llargada de la peça) i 10 punts en l'eix Y (amplada de la peça) realitzant un total de 200 punts de mesura. Un cop definits els punts, el software ha descartat automàticament aquells que no formen part de la cara superior, que corresponen als que queden sobre algun forat o la cavitat d'injecció. Finalment han quedat un total de 144 punts de mesura.

5. Un cop acabada la configuració s'ha executat l'escombrat. La màquina de coordenades realitza aquestes mesures de forma automàtica seguint la trajectòria de zig-zag definida a la Figura 4.8.

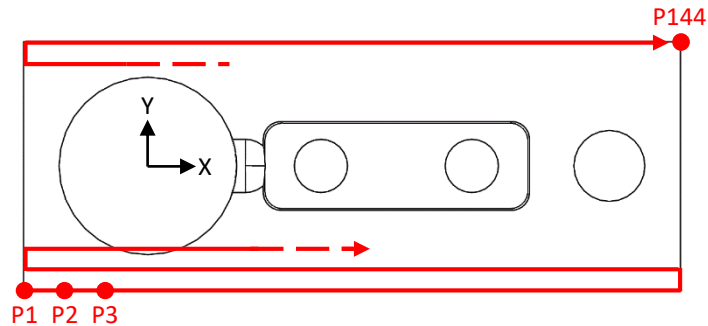


Figura 4.8 Trajectòria de l'escombrat de mesures de superfície (Font pròpia)

6. Al finalitzar l'escombrat es recullen tots els punts mesurats. Seguint l'estratègia utilitzada en l'estudi de forats, s'han exportat les dades en una fulla de càlcul pel seu estudi i en format IGES per poder superposar el núvol de punts de mesura amb el model CAD original.

## 5. RESULTATS

### 5.1. Dimensions exteriors: Llargada i amplada

En aquest apartat es mostren els resultats obtinguts en els estudis de les dimensions exteriors realitzat amb les peces de mostra. Tal i com s'ha comentat en l'apartat 4.4.1, en un primer apartat s'analitzen les dades obtingudes amb l'escàner 3D, per així determinar la seva precisió en comparació als instruments de mesura de contacte. En un segon bloc s'analitza per separat la llargada i amplada de les mostres. En aquesta part es combina l'anàlisi numèric de les dades amb mètodes estadístics per determinar paràmetres com la dispersió de les mesures o l'influència dels paràmetres de procés estudiats vers els resultats obtinguts amb les peces fabricades.

#### 5.1.1. Anàlisi dimensional amb l'escàner 3D

En aquest apartat es mostra un resultat comparatiu de les mesures d'amplada i llargada obtingudes amb la malla de punts generada amb l'escàner i les mesures realitzades amb el micròmetre i peu de rei.

Per escanejar una mostra cal que aquesta tingui un color opac, per així evitar reflexions de llum que poden donar mesures falses als sensors de l'escàner. Com que les mostres no són 100% opaques s'ha aplicat una capa d'imprimació amb pintura especial per escanejar en 3D. Aquesta capa de pintura té un gruix que genera un error en les mesures de l'escàner. Per saber amb exactitud el gruix de la capa de pintura s'han realitzat les mesures de contacte abans i després d'aplicar la imprimació.

Aquest anàlisi només s'ha realitzat sobre una de les mostres. Les mitjanes de valors obtingudes abans de pintar, després i amb l'escàner es troben a la Taula 5.1. El conjunt total de mesures realitzades es pot consultar a l'Annex C.

*Taula 5.1 Valors d'amplada i llargada de l'anàlisi amb escàner 3D*

Mitjana de l'amplada			
Instrument de mesura	Micròmetre	Micròmetre	Escàner 3D
Mesura	Abans de pintar	Després de pintar	Després de pintar
Valor (mm)	13,887	13,907	14,070
Mitjana de la llargada			
Instrument de mesura	Peu de rei	Peu de rei	Escàner 3D
Mesura	Abans de pintar	Després de pintar	Després de pintar
Valor (mm)	36,88	36,96	37,096

Si s'analitzen les dades numèriques es pot veure un seguit de diferències entre els diferents escenaris estudiats:

- En primer lloc s'observen les mesures realitzades abans de pintar. En aquest cas s'obtenen resultats inferiors al valor teòric de cada cota (Figura 4.1). En l'amplada, el valor teòric de la peça correspon a 14mm. Les mesures obtingudes donen una mitjana de 13,887mm, sent 0,113mm inferior. En el cas de la llargada s'observa un resultat semblant, mentre que la cota nominal correspon a 37mm els valors obtinguts amb peu de rei donen una mitjana de 36,88mm, 0,12mm inferior.
- Si s'analitzen les mesures de contacte realitzades després de pintar la mostra s'obtenen uns valors superiors als obtinguts anteriorment (Figura 5.1 i Figura 5.2). Un augment del gruix és esperat degut a la capa de pintura aplicada. Si es calcula la diferència entre els valors obtinguts abans i després de pintar s'obté un gruix 20µm major en amplada i 80µm a la llargada.

Normalment les imprimacions per escàner 3D tenen un gruix comprès entre 2µm i 15µm depenent de la marca o model utilitzat. També s'ha de considerar que es sol aplicar més d'una capa de pintura per assegurar que tota la peça quedi opaca, augmentant el gruix de pintura sobre la peça. Les diferències observades en les mostres tenen una magnitud major al rang especificat pels fabricants (sobretot en la llargada). Aquest augment de gruix s'atribueix a l'excés de pintura degut a la superposició de múltiples capes de pintura ja que el procés es realitza manualment.

- Si ara s'observen les mesures obtingudes amb l'escàner s'obté valors per sobre de les cotes nominals. Els valors obtinguts són de 14,070 mm i 37,096 mm en amplada i llargada respectivament. Si es comparen amb les mesures inicials, realitzades abans de pintar, s'obté un augment en amplada de 0,183mm i de 0,216mm a la llargada. La mitjana de valors obtinguts en cada un dels casos es poden visualitzar a la Figura 5.1 i Figura 5.2.

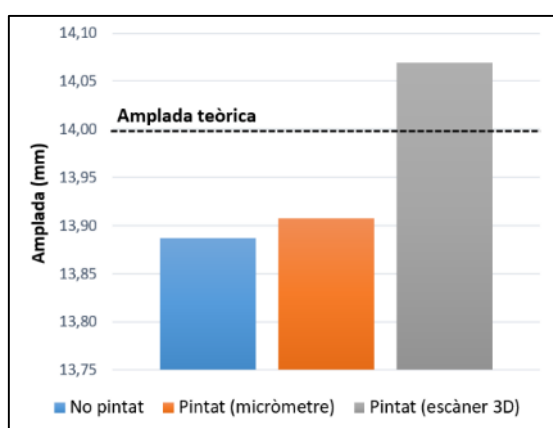


Figura 5.1 Mitjanes obtingudes d'amplada

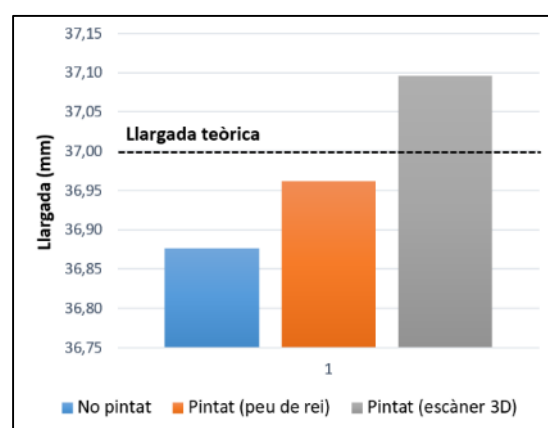


Figura 5.2 Mitjanes obtingudes de llargada

Com es pot observar a les dades, l'error obtingut amb les mesures de l'escàner 3D és significatiu tant en l'amplada com la llargada. Segons les especificacions del fabricant de

l'escàner 3D, l'exactitud de les mesures en configuració estàtica, la utilitzada per fer les proves, és de 0,04mm. La diferència entre les dades de mesura amb mètodes de contacte un cop pintada la peça i les de l'escàner 3D són de 0,163mm per l'amplada i 0,136mm per la llargada, valors força més grans al valor d'exactitud que especifica el fabricant.

Per altra banda s'ha considerat interessant fer un comparatiu de la forma obtinguda amb l'escàner i el model 3D teòric de la mostra. Com que s'ha utilitzat l'escàner en la seva màxima resolució, el nombre de punts que s'ha generat amb la superfície de la mostra és molt nombrós. Per aquest motiu s'ha hagut d'eliminar part de la informació del model per poder-se manipular de forma més ràpida i adaptant-se als recursos computacionals dels equips de treball disponibles.

Com ja s'ha estudiat de forma numèrica l'amplada i llargada de la peça, s'ha centrat aquest comparatiu en la forma dels forats i cavitat de la mostra. Un cop eliminada tota la malla que no forma part de les zones d'interès, s'ha importat al programa *Solidworks 2018*. Aprofitant els eixos de coordenades i els eixos centrals dels forats generats amb el programa *Geomagic Essentials*, s'ha posicionat la malla sobre el model teòric. A la Figura 5.3 es pot veure la superposició dels dos models.

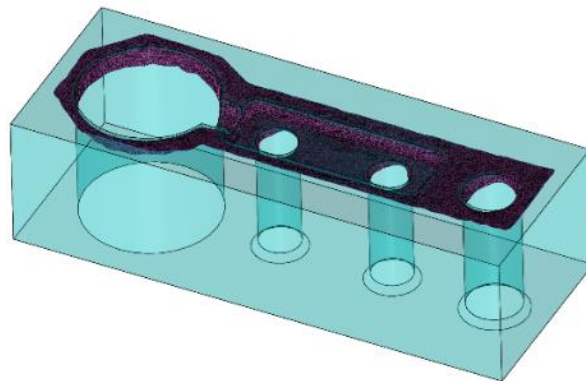


Figura 5.3 Vista de la superposició de la malla amb el model teòric (Font pròpia)

Si s'analitza la malla amb més proximitat podem veure algunes diferències respecte el model original. A la Figura 5.4 (esquerra) hi ha ampliat la zona del *runner* d'entrada a la cavitat d'injecció. Si es compara el model escanejat (en color lila) amb el model CAD teòric (en gris) es pot apreciar com les arestes vives de la cara superior estan arrodonides. No obstant, per poder apreciar les diferències del mallat respecte la peça física fabricada, s'ha fet una foto de la mateixa zona de la mostra. Per ressaltar millor els contorns de la mostra s'ha passat la fotografia a escala de grisos. Finalment s'ha modificat el contrast i brillantor fins obtenir el resultat que es mostra a la Figura 5.4.

Comparant les dos imatges es pot veure clarament com la mostra real té una semblança molt més pròxima al model CAD que no la malla obtinguda amb l'escàner. La diferència es fa més evident si es comparen les arestes vives de les dos imatges.

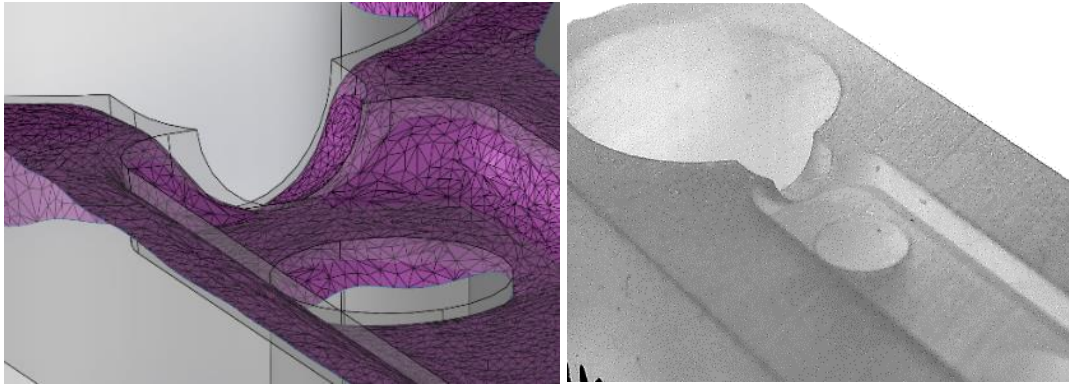


Figura 5.4 Vista de detall del runner: Esquerra: malla de l'escàner 3D. Dreta: Foto real de la mostra (Font pròpia)

Si es mira amb detall la cavitat d'injecció, també es poden apreciar diferències importants. La Figura 5.5 mostra una vista de secció de la cavitat d'injecció. Si es compara la malla (en violeta) i el model teòric (en gris) s'observa com clarament s'han arrodonit les arestes inferiors i superiors de la cavitat.

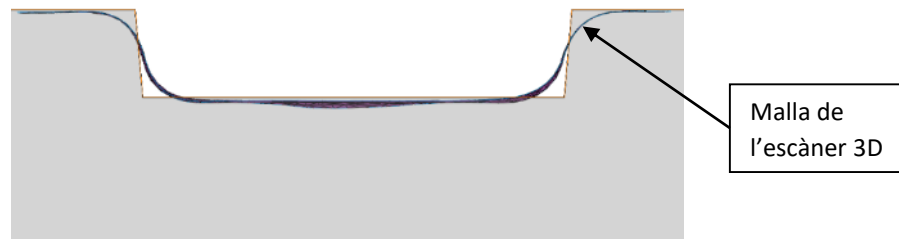


Figura 5.5 Vista de secció de la malla en la cavitat d'injecció (Font pròpia)

Finalment també s'observen diferències en els forats de la peça. Els forats més afectats són els de menor diàmetre, corresponent als dos forats interiors de la cavitat. A la Figura 5.6 es mostra la superposició de la malla en un dels forats interiors de la cavitat i el model original, remarcat en blau.

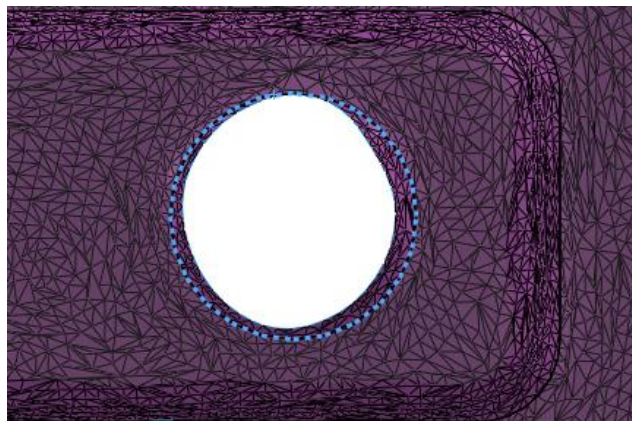


Figura 5.6 Vista de detall de la malla en un dels forats (Font pròpia)

A partir de la comparativa entre els valors numèrics i en l'entorn CAD, s'ha descartat l'ús de l'escàner 3D en els propers estudis de les mostres. Com s'ha pogut comprovar numèricament, els mètodes de contacte ofereixen uns resultats molt més precisos que l'escàner. En el cas d'aquest treball, on s'està dissenyant un motlle, es necessita una precisió dimensional de les peces molt alta, sent insuficient un error de més d'una dècima de mil·límetre, tal com s'ha obtingut en aquest estudi.

Pel que fa a les geometries internes de la peça, on l'escàner podria ser un gran avantatge respecte els altres instruments de mesura, ha resultat altre cop poc precís, perdent molt detall en les zones de la peça on hi ha canvis de geometria o arestes vivies.

Un altre inconvenient que presenta l'ús de l'escàner és la necessitat de pintar les peces, fent implícit un error degut al gruix de la pintura i que no sempre és homogeni en tota la peça.

### 5.1.2. Llargada de la peça

En aquest apartat s'analitzen les dades obtingudes de les mesures de llargada de les peces de mostra, considerant les 3 mostres fabricades per cada orientació d'impressió. Les mesures s'han realitzat amb el peu de rei digital.

A la Figura 5.7 es mostren les mitjanes de llargada de les peces analitzades, agrupades segons l'orientació d'impressió. El conjunt de dades de llargada es troba a l'Annex C.

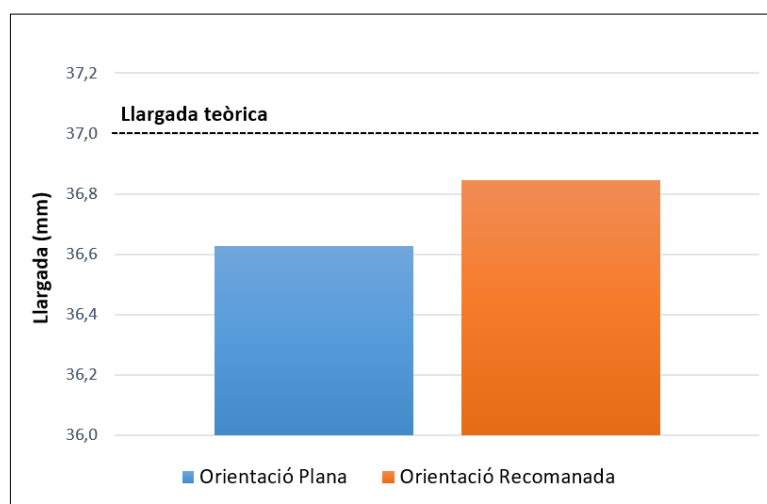


Figura 5.7 Mitjanes de llargada per orientacions Plana i Recomanada

Com es pot observar a la Figura 5.7, tant les peces d'orientació plana com recomanada obtenen una mitjana inferior a la llargada teòrica. En el cas de les peces amb orientació plana, la mitjana obtinguda és de 36,63mm mentre que per les d'orientació recomanada és de 36,84mm, sent aquestes més aproximades a la cota nominal.

A continuació s'ha realitzat un anàlisi estadístic dels resultats amb el programa *Minitab 18* per observar com afecta el paràmetre orientació d'impressió a la llargada de les mostres. En l'anàlisi estadístic s'ha utilitzat també l'error de les mesures, calculat prèviament respecte la cota nominal de llargada. La Figura 5.8 mostra el diagrama d'efectes principals en funció de l'orientació d'impressió i els intervals de confiança de l'error de les mesures.

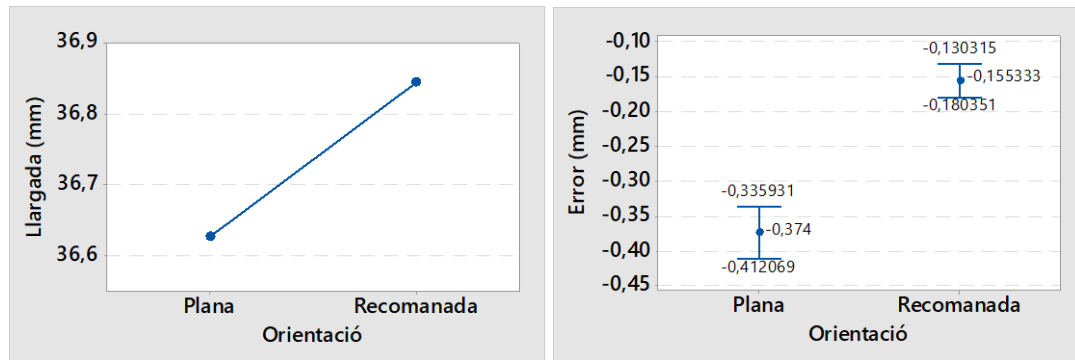


Figura 5.8 Comparatiu de la llargada de les mostres. Esquerra: Diagrama d'efectes principals. Dreta: Diagrama d'intervals de l'error

Com es pot observar, l'orientació d'impressió té una influència significativa en la llargada de les peces. A partir de l'anàlisi de variància del conjunt de dades de llargada respecte l'orientació, s'obté un p-valor molt proper a 0. Pel que fa a la desviació, l'orientació plana obté un valor de 0,0687mm i la recomanada un valor de 0,0452mm, sent aquesta última la que té una dispersió de valors inferior. Aquest aspecte també es pot observar al diagrama d'intervals de confiança de l'error, on l'orientació recomanada té un interval menor a la plana.

### 5.1.3. Amplada de la peça

En aquest apartat s'analitza, de forma similar a l'anterior, l'amplada de les mostres en orientació plana i recomanada. A l'igual que amb la llargada, s'han mesurat 3 mostres per cada una de les configuracions. En aquest cas s'ha utilitzat el micròmetre en els mesuraments.

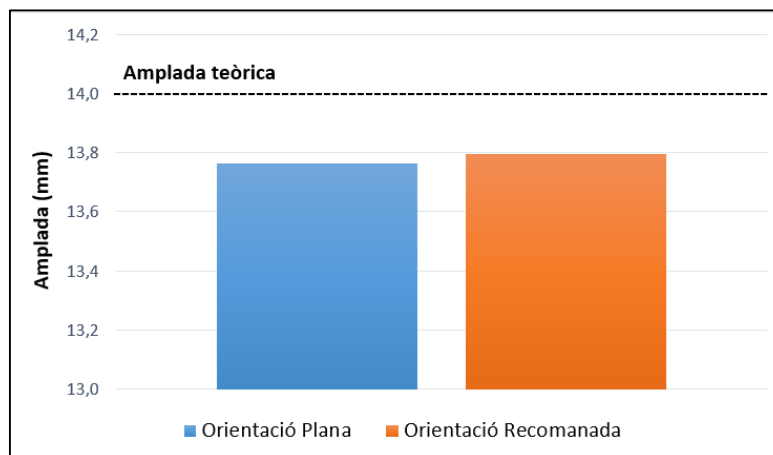


Figura 5.9 Mitjanes d'amplada per orientacions Plana i Recomanada



La Figura 5.9 mostra un comparatiu amb les mitjanes d'amplada per les peces d'orientació plana i recomanades. El conjunt de dades de l'estudi d'amplada es troben a l'Annex C.

Observant les mitjanes es pot veure com, a l'igual que l'amplada, les mesures resulten inferiors a la cota teòrica de les peces. L'orientació recomanada presenta una mitjana lleugerament més pròxima a la cota nominal, amb un valor de 13,796mm. La mitjana per orientació plana correspon a 13,764mm.

L'estudi estadístic de l'amplada s'ha dividit en dos apartats. En la primera part s'ha estudiat la precisió dimensional de l'amplada respecte l'orientació d'impressió. En una segona part s'ha estudiat la influència del punt de mesura en la precisió de les mostres.

- Precisió dimensional de l'amplada respecte l'orientació d'impressió. Tal com s'ha vist en la llargada, l'orientació d'impressió de les peces pot influir a la seva precisió dimensional. Amb el programa *Minitab 18* s'han analitzat les dades de les mesures d'amplada. A la Figura 5.10 es mostra el diagrama d'efectes principals en funció de l'orientació d'impressió i els intervals de confiança de l'error de les mesures.

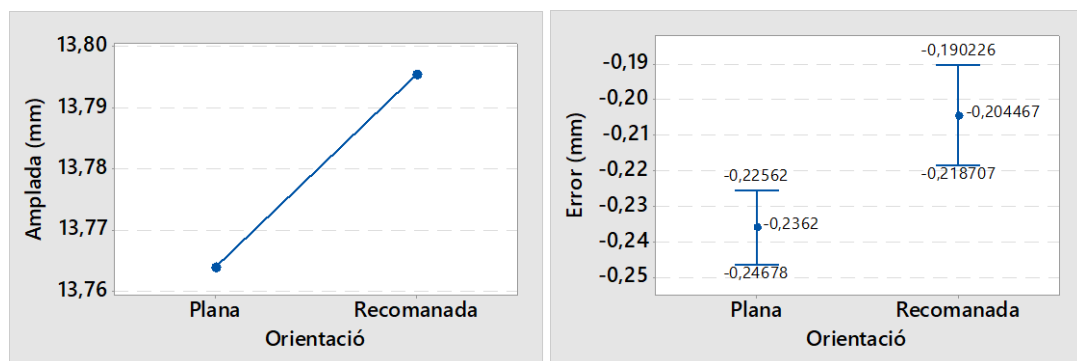


Figura 5.10 Comparatiu de l'amplada de les mostres. Esquerra: Diagrama d'efectes principals. Dreta: Diagrama d'interval·ls de l'error

Si es realitza l'anàlisi de variància de l'amplada respecte l'orientació d'impressió s'obté un p-valor de  $0,001 < 0,05$ . Com es pot observar l'orientació d'impressió també és paràmetre significatiu en la precisió de l'amplada de les peces. Pel que fa a la dispersió de valors, la desviació en les mostres d'orientació plana és de 0,0191mm mentre que amb les d'orientació recomanada s'obté una desviació de 0,0257mm. De forma contrària a la llargada, l'orientació plana té una dispersió de valors menor en l'amplada de les peces.

- Precisió dimensional de l'amplada pels diferents punts de mesura. En aquesta part de l'estudi s'han agrupat les dades de totes les mostres per classificar-se pels punts 1 a 5 realitzats amb el micròmetre (indicats a la Figura 5.11).

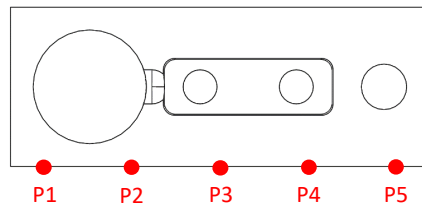


Figura 5.11 Punts de mesura de l'amplada (Font pròpia)

A la Figura 5.12 es mostra el diagrama d'interval de confiança de l'amplada per cada un dels punts de mesura. Amb l'anàlisi de variància en funció als punts de mesura s'obté un p-valor de 0,791. Aquest valor és molt superior al valor  $\alpha = 0,05$  de l'anàlisi, indicant que el punt de mesura no és una variable significativa en l'amplitud de les mesures. (veure l'anàlisi complet a l'Annex D)

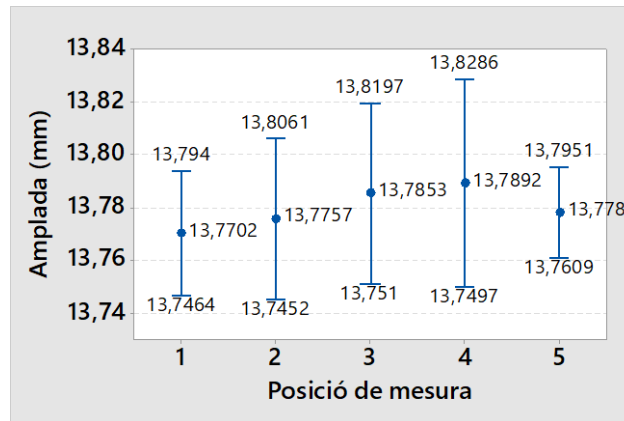


Figura 5.12 Diagrama d'interval de confiança per cada punt per l'amplada

### 5.1.4. Comparatiu d'amplada i llargada

En l'última part d'aquesta secció s'han comparat les dades de llargada i amplada de les peces. L'objectiu d'aquest estudi és determinar l'efecte de la magnitud de la mesura en la precisió dimensional de les peces indiferentment de l'orientació d'impressió. Per aquest motiu s'han agrupat les dades de les 6 mostres utilitzades.

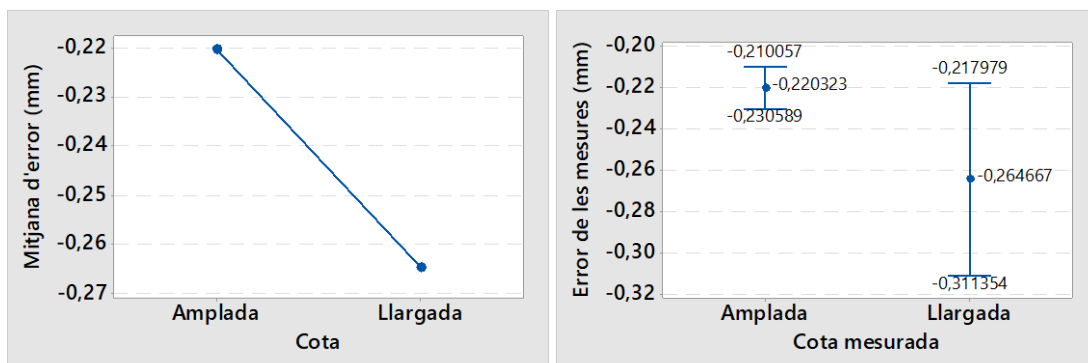


Figura 5.13 Comparatiu de llargada i amplada. Esquerra: Diagrama d'efectes principals. Dreta: Diagrama d'interval de confiança de l'error

Com que les dos cotes a comparar tenen valors nominals diferents en aquest apartat s'ha treballat directament amb l'error de les mesures respecte els valors teòrics. A la Figura 5.13 es mostra el diagrama d'efectes principals de la mitjana d'error respecte la cota de mesura i el diagrama d'interval de confiança de l'error de les mesures.

L'anàlisi de variància de les dades ens indica un p-valor de 0,063. Aquest valor tot i ser major al  $\alpha = 0,05$  és molt proper a ell. Considerant que s'analitza la tecnologia de fabricació additiva com és l'SLA, on hi ha més variabilitat que en altres processos tradicionals com pot ser el mecanitzat per CNC, podem considerar significatiu l'efecte de la magnitud de la mesura en la precisió de la peça.

Per altra banda les desviacions típiques obtingudes són de 0,0275mm en amplada i 0,1250mm per la llargada. Com ja s'intuïa en apartat anteriors, la variabilitat de valors de llargada és molt major a l'amplada. El motiu d'aquesta diferència és el fet que la llargada de la peça és molt més sensible a l'orientació de fabricació, fent la mostra de dades molt més àmplia que en el cas de l'amplada.

## 5.2. Dimensional i forma dels forats

En aquest apartat s'analitzen les dades recollides de la geometria dels quatre forats de les peces de mostra. Aquest forats estan indicats a la Figura 5.14. L'estudi s'ha fet amb les 6 peces de mostra utilitzant la màquina de coordenades.

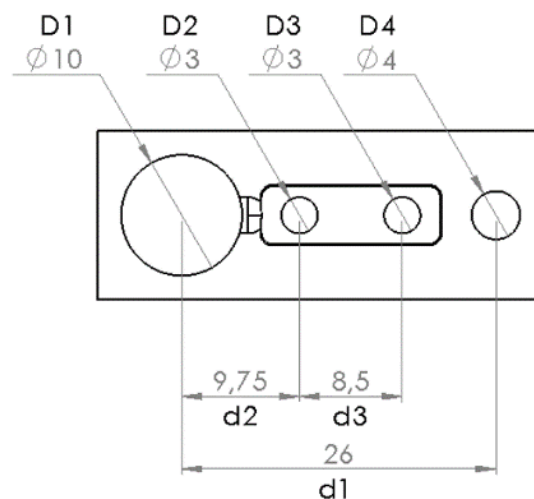


Figura 5.14 Forats d'estudi (Font pròpia)

L'estudi de forats s'ha dividit en 3 subapartats on s'analitzarà un aspecte diferent en cada un d'ells: el diàmetre, la posició i la forma.

### 5.2.1. Diàmetre dels forats

En aquest apartat s'ha analitzat el diàmetre obtingut per a cada un dels forats respecte l'orientació d'impressió de les mostres. A la Figura 5.15 es poden veure les mitjanes obtingudes per cada un dels forats amb les orientacions estudiades.

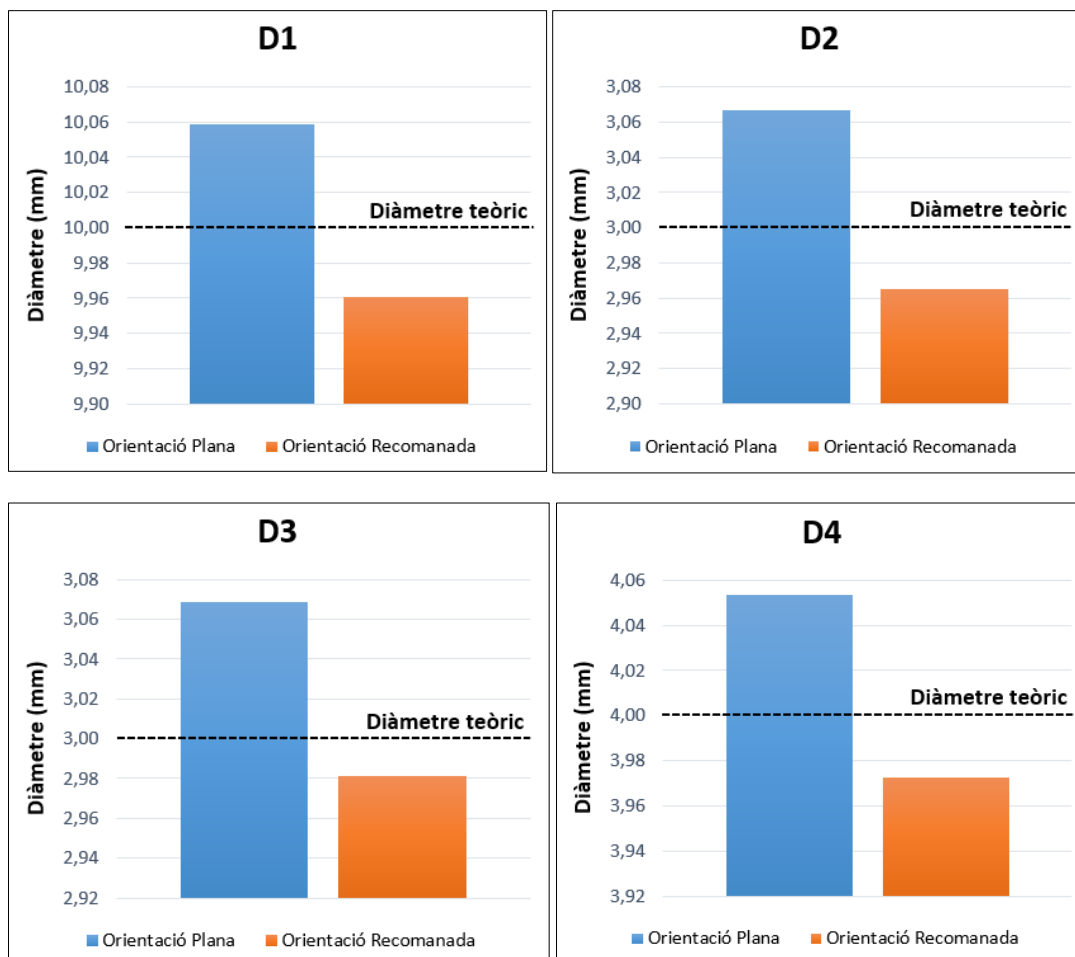


Figura 5.15 Mitjanes de diàmetre per cada un dels forats

A partir dels gràfics dels 4 forats s'observa com les peces amb orientació plana tenen diàmetres superiors al nominal. Les peces amb orientació recomanada en canvi, obtenen valors inferiors a la cota de referència. Els valors per a cada forat s'indiquen a la taula Taula 5.2.

Taula 5.2 Valors de les mitjanes dels forats

	Mitjanes de diàmetre (mm)			
	D1	D2	D3	D4
<b>Orientació Plana</b>	10,0586	3,0669	3,0685	4,0537
<b>Orientació Recomanada</b>	9,9609	2,9651	2,9814	3,9723

Si s'analitza l'error dels 4 forats en paral·lel s'observa com les peces amb orientació plana obtenen un valor mitjà d'error de 0,0619mm mentre que les peces d'orientació recomanada tenen un error al voltant de -0,0301 mm. Aquesta diferència es fa més evident en els forats petits: D2, D3 i D4. La Figura 5.16 mostra l'error de mitjana per cada un dels forats estudiats.

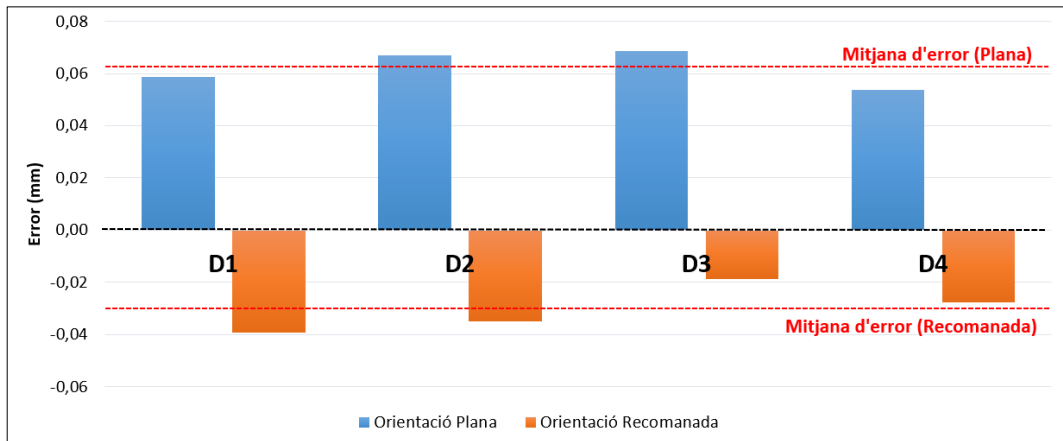


Figura 5.16 Mitjana d'error dels forats

Analitzant estadísticament es comprova com realment l'orientació de les peces és un factor determinant pel diàmetre dels forats, tal com indica el p-valor obtingut, molt proper a 0. La Figura 5.17 mostra el diagrama d'efectes principals de l'error respecte l'orientació.

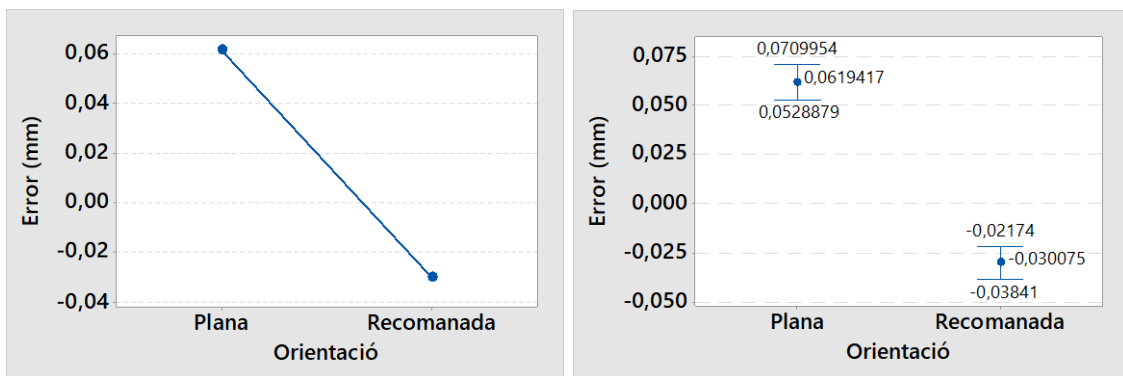


Figura 5.17 Comparatiu d'error de diàmetre. Esquerra: Diagrama d'efectes principals. Dreta: Diagrama d'interval·ls de l'error

Respecte la dispersió de les dades, les dos orientacions obtenen valors similars, sent la desviació típica en orientació plana 0,01425mm i 0,01312mm per la recomanada. Al gràfic d'interval·ls de confiança es pot comprovar com els rangs de valors de les dos orientacions són similars.

En un segon anàlisi estadístic s'han agrupat les dades segons el diàmetre nominal del forat, per observar si aquesta variable té un efecte important en la precisió dimensional. En aquest cas l'anàlisi de variància de l'error respecte el diàmetre mesurat obté un p-valor de 0,962 indicant que no hauria de ser un factor crític en l'error dimensional dels forats. Les desviacions típiques per a cada diàmetre no presenten tampoc diferències importants entre forats. Aquestes queden indicades a la Taula 5.3.

Taula 5.3 Desviacions típiques dels forats respecte el seu diàmetre

Desviacions típiques (mm)			
D1	D2	D3	D4
0,0563	0,0560	0,0482	0,0469

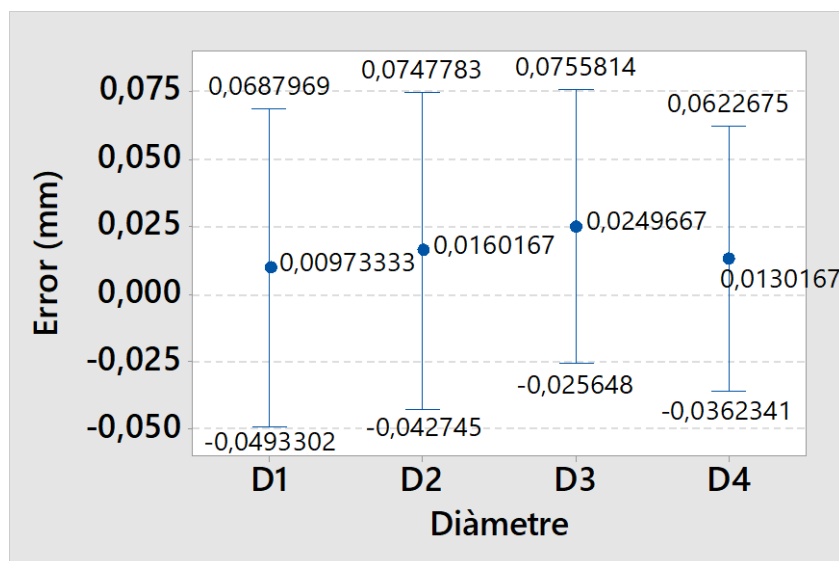


Figura 5.18 Diagrama d'interval de l'error segons diàmetre de forat

### 5.2.2. Posició dels forats

Un cop analitzats els diàmetres s'ha estudiat la posició dels forats, a partir de la distància entre centres. S'ha agafat com a referència el centre del forat D1 i a partir d'aquest s'han definit les distàncies d1, d2 i d3, tal com es mostra a la Figura 5.14.

Un cop analitzades les dades de les mesures s'ha donat compte que tal com s'ha definit la cota d3, no es contempla l'error de d2 (el punt de referència canvia). Per aquest motiu s'ha descartat d3 al no ser comparable amb d1 i d2. La Figura 5.19 mostra la mitjana de l'error obtingut en les distàncies d1 i d2. S'observa com tant en orientació plana com recomanada les distàncies són inferiors a la cota nominal respectiva. La distància d1 presenta la major desviació, amb un error al voltant de -0,2mm en ambdues orientacions. Les distàncies d2 té un error menor a 0,1mm però presenta una diferència més important entre l'orientació plana i recomanada. Tot i que de l'error de d1 és molt superior a d2, cal tenir present que la cota d1 també és més gran, unes tres vegades

major que d2. A la Taula 5.4 s'expressa per les dues distàncies l'error relatiu de la mitjana de mesures.

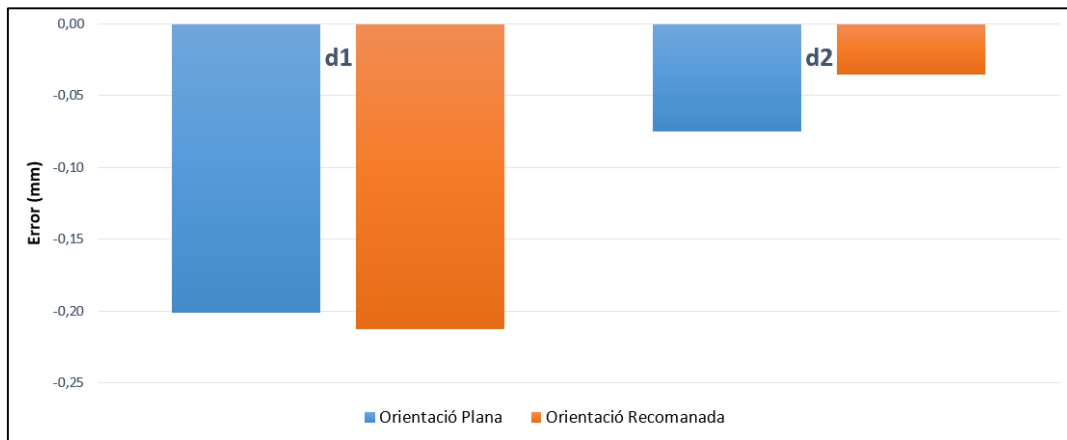


Figura 5.19. Mitjanes d'error de la distància entre forats

Taula 5.4 Error relatiu de la mitjana de distàncies entre forats

	Error relatiu (%)	
	d1	d2
<b>Orientació Plana</b>	-0,775%	-0,771%
<b>Orientació Recomanada</b>	-0,817%	-0,363%

Durant el procés de curat de les peces SLA es pot generar una contracció de la peça, degut a la solidificació del material. Aquestes diferències d'error de posició dels forats observada, podrien indicar que les peces en orientació plana tenen un comportament molt més homogeni durant la contracció del material que les peces d'orientació recomanada.

Per finalitzar l'estudi de posició dels forats s'han analitzat les dades estadísticament segons l'orientació.

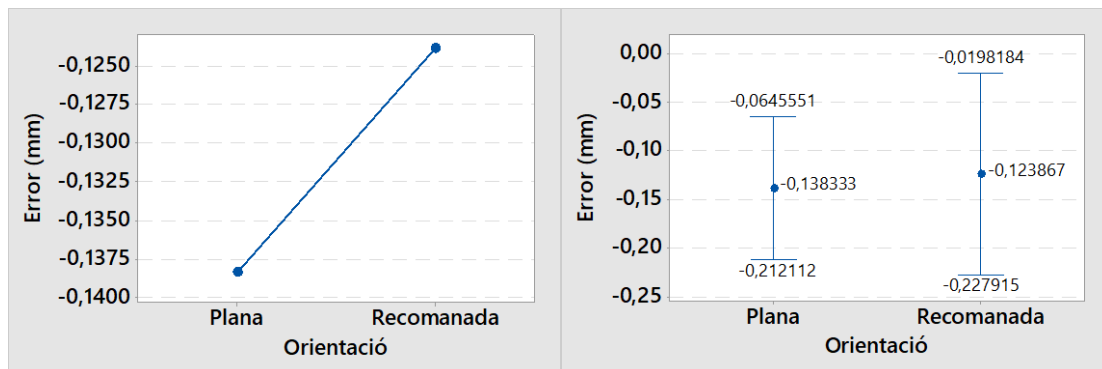


Figura 5.20 Comparatiu d'error de posició. Esquerra: Diagrama d'efectes principals. Dreta: Diagrama d'intervals de l'error

El p-valor obtingut en aquest cas és de 0,777. L'orientació de les peces no sembla un factor important en l'error de posició dels forats tal com es veia a la Figura 5.19, on ja s'observava com no hi havia una tendència clara per les cotes d1 i d2. On si s'observa diferència és en la dispersió de valors. Les desviacions típiques d'aquest anàlisi ha resultat de 0,0703mm en el cas de la plana i de 0,0991 per la recomanada. La diferència del rang de dades es pot apreciar a la Figura 5.20.

### 5.2.3. Anàlisi de forma dels forats

El tercer estudi referent als forats té com objectiu determinar la regularitat de la seva forma. Amb l'escombrat per punts, s'han obtingut una mitjana 50 punts pel forat D1 i 18 punts pel forat D4. Per cada escombrat, s'ha agafat com a punt de referència el centre del seu forat. Així, el valor obtingut X,Y,Z de cada punt, correspon al radi del forat per cada una de les mesures. En aquest estudi s'estudia el radi dels forats en comptes del diàmetre, així doncs les referències corresponen a un radi de 5mm pel forat D1 i un radi de 2mm per D4.

A partir de les dades de cada punt, s'ha calculat la mitjana i el rang de les dades a partir de la diferència entre el valor més alt i més baix per a cada cas. La mitjana i el rang de valors per cada un dels forats segons l'orientació es mostren a la Taula 5.5.

Taula 5.5 Mitjanes i rangs de valors dels forats D1 i D4

<b>D1</b>		
<b>Mostra</b>	<b>Mitjana (mm)</b>	<b>Rang (mm)</b>
<b>Plana</b>	5,0233	0,0793
<b>Recomanada</b>	4,9871	0,3171
<b>D4</b>		
<b>Mostra</b>	<b>Mitjana (mm)</b>	<b>Rang (mm)</b>
<b>Plana</b>	2,0206	0,0741
<b>Recomanada</b>	1,9913	0,1189

Tal com s'observa els forats amb orientació plana obtenen valors majors de mitjana al nominal mentre que en orientació recomanada passa el contrari (tal com s'havia vist a l'apartat 5.1.2. El rang en canvi, presenta diferències importants, sobretot en D1. Per analitzar millor el rang de dades es farà un estudi estadístic de la dispersió de dades respecte l'orientació per cada un dels forats (Taula 5.6).

Taula 5.6 Desviacions típiques de D1 i D4

<b>Mostra</b>	<b>Desviació típica (mm)</b>	
	<b>D1</b>	<b>D4</b>
<b>Plana</b>	0,01493	0,01841
<b>Recomanada</b>	0,1092	0,03834



Les dades ens indiquen que la desviació de D1 en orientació recomanada és unes 7 vegades més gran que la plana. En el cas de D4 la diferència no és tant gran però la recomanada segueix tenint un valor que duplica el de la plana. Aquestes diferències també es poden observar a la Figura 5.21 i Figura 5.22, on hi ha els gràfics dels rangs de valors per cada forat.

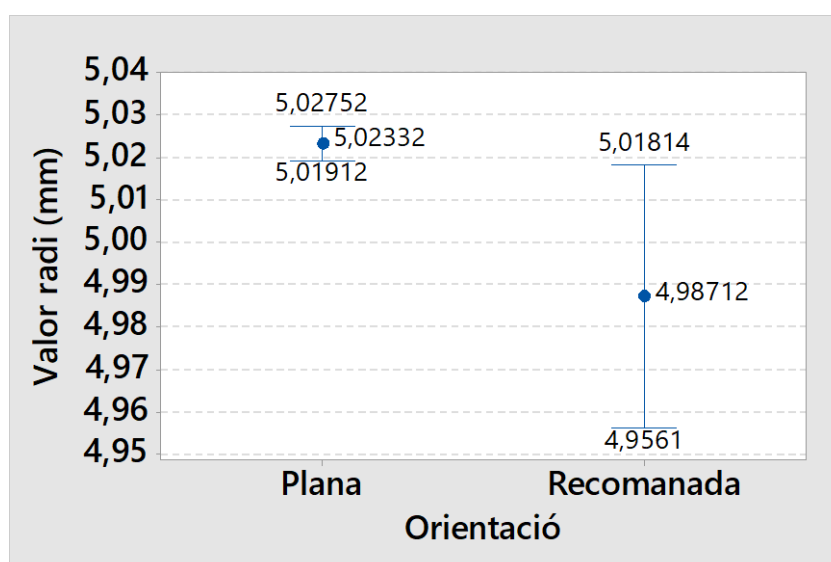


Figura 5.21 Diagrama d'interval del radi de D1

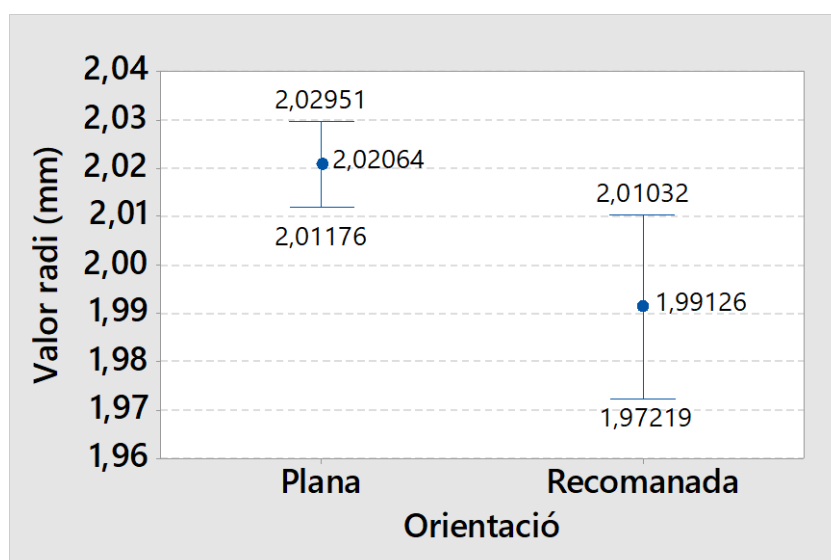


Figura 5.22 Diagrama d'interval del radi de D1

Com s'ha vist amb les dades, tant en D1 com D4, hi ha una dispersió de valors important en la mostra d'orientació recomanada. Si es superposen els punts de mesura obtinguts sobre el model CAD, també es poden apreciar diferències notables en la forma dels

forats (Annex C). On aquestes es fan més evidents és en el forat D4 de la mostra d'orientació recomanada (Figura 5.23) on es pot veure la vista en planta del forat nominal i el perfil del forat real (en vermell), que presenta una forma lleugerament el·líptica.

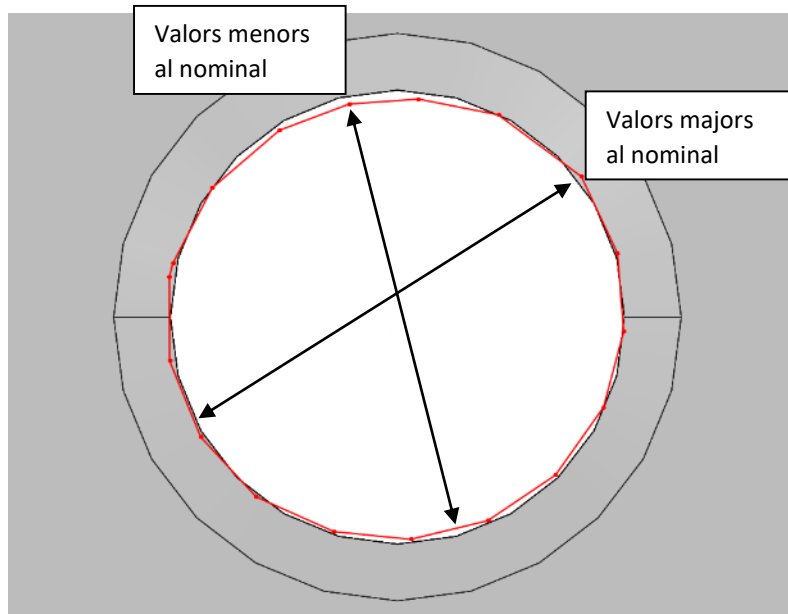


Figura 5.23 Vista en planta dels valors d'escombrat de D4 (Font pròpia)

### 5.3. Estudi de la superfície

En aquest tercer anàlisi s'estudia la regularitat superficial de la cara superior de les mostres. A partir de les mesures realitzades amb la màquina de coordenades s'han obtingut l'error en l'eix Z dels punts per a una peça d'orientació plana i recomanada. Els punts mesurats s'han exportat i superposat sobre el model CAD de la peça (Figura 5.24).

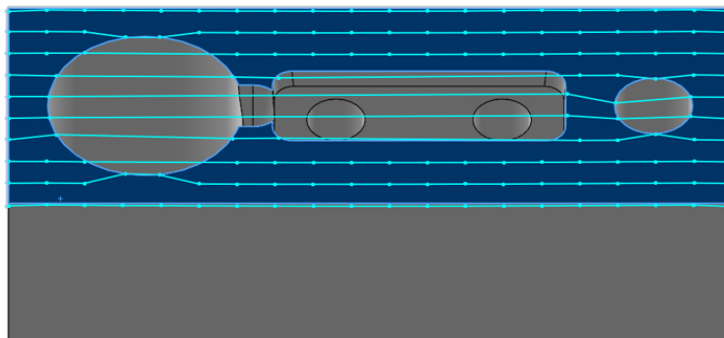


Figura 5.24 Superposició dels punts de la superfície al CAD (Font pròpia)

Al ser difícil apreciar les diferències entre els punts de mesura i el model original, s'han introduït les dades en l'eix Z de cada punt en una fulla de càlcul i s'han mostrat en uns gràfics 3D (Figura 5.25 i Figura 5.26).

Punts de la superfície de la mostra en orientació plana:

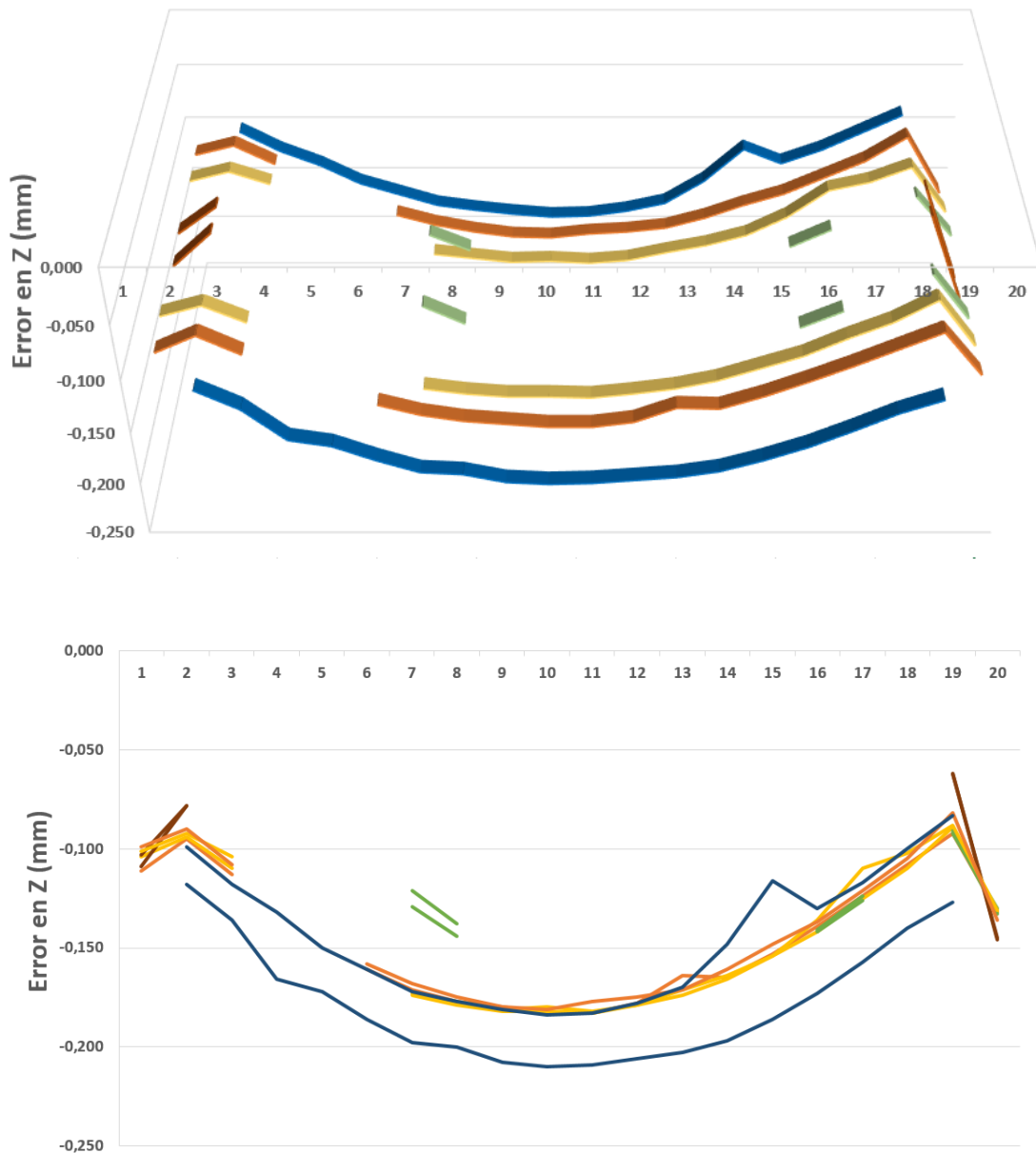


Figura 5.25 Punts mesurats de la superfície per la peça plana. A dalt: vista en perspectiva. A baix: vista 2D (Font pròpia)

A partir dels gràfics es pot veure clarament com la superfície de la mostra té una curvatura convexa, sent la part central la més allunyada en l'eix Z respecte el pla de

referència (ordenada 0). També es pot apreciar certa regularitat en la superfície, ja que no s'aprecien salts sobtats, llevat d'algun cas, entre les dades.

Punts de la superfície de la mostra en orientació recomanada:

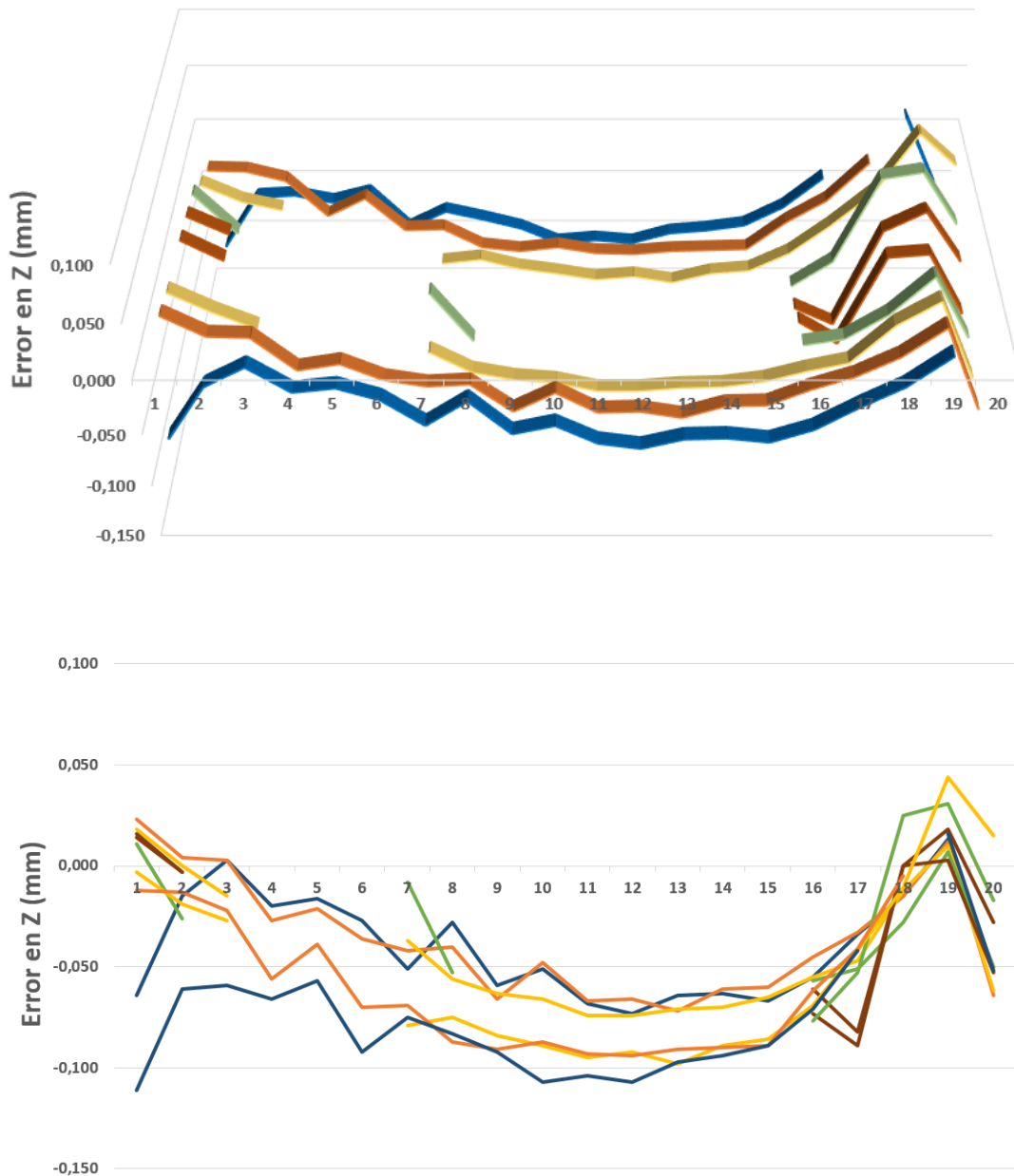


Figura 5.26 Punts mesurats de la superfície per la peça recomanada. A dalt: vista en perspectiva. A baix: vista 2D (Font pròpia)

A l'igual que amb la mostra plana, la recomanada presenta una forma convexa sent a més, molt més irregular ja que presenta nombrosos salts entre dades.

La forma convexa que presenten les dos mostres pot ser degut a la contracció de les peces. Aquest fenomen és molt important en el cas d'un motlle ja que una contracció massa gran podria provocar pèrdues de material fora de les cavitats d'injecció.

En referència a la regularitat de les superfícies, el comportament més homogeni de la peça plana és esperat ja que en aquesta orientació la rugositat superficial és menor [20] pel fet que tots els punts formen part d'una mateixa capa de resina de la peça. En canvi en la recomanada els punts de la cara superior formen part de capes diferents de la mostra.

A la Taula 5.7 s'indiquen la mitjana, valors màxim i mínim (referents a la cresta superior i inferior de les peces) i el rang de valors per les dos mostres.

*Taula 5.7 Mitjanes i rang de l'error en Z de la superfície de les mostres*

Mostra	Mitjana error Z (mm)	Valor màxim (mm)	Valor mínim (mm)	Rang (mm)
Plana	-0,144	-0,062	-0,210	0,148
Recomanada	-0,045	0,044	-0,111	0,155

Com es pot observar, les dos mitjanes obtenen errors negatius, indicant que la superfície de les peces es troba a una cota Z per sota del pla de referència, coincident amb la peça nominal. D'entre les dos, la peça recomanada obté una mitjana més pròxima. Per altra banda el rang de valors de les dos peces és semblant, al voltant de 0,15mm.

#### 5.4. Estudi comparatiu de dades

En aquest últim apartat de resultats s'han combinat les dades recollides en aquest treball juntament amb les recollides en un estudi anterior [20]. L'objectiu principal d'aquest anàlisi és comparar amb una mostra de dades major, els resultats obtinguts fins aquest punt de l'estudi. Observant les dades de ambdós treballs s'ha valorat fer dos estudis de dades conjuntes:

- Anàlisi de mides exteriors, on s'analitzarà la precisió dimensional respecte l'orientació d'impressió i la magnitud de la mesura.
- Anàlisi de diàmetre de forats respecte l'orientació d'impressió de les peces.

La totalitat de les dades obtingudes en aquest estudi es poden trobar a l'Annex D d'aquest treball.

##### 5.4.1. Anàlisi de mides exteriors

En aquest estudi s'han utilitzat les dades d'amplada i llargada recollits en el present treball. Addicionalment s'han utilitzat les mesures d'amplada d'una proveta fabricada

amb la impressora *Form 2* al taller del *GREP* (aquests es poden consultar al document [20]).

A la Figura 5.27 es pot veure un croquis de la proveta i els punts on es van realitzar les mesures d'amplada en l'estudi previ. Aquestes mesures es van realitzar amb la màquina de coordenades *Mitutoyo Crysta Apex 544*.

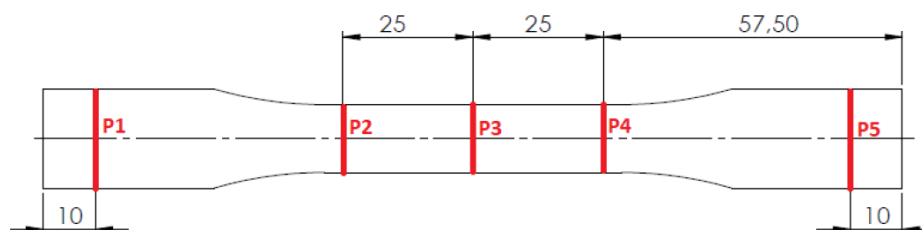


Figura 5.27 Croquis de la proveta mesurada

Les cotes nominals per a cada punt es troben indicats a la Taula 5.8.

Taula 5.8 Valors nominals de les cotes de les provetes

Amplada nominal (mm)				
P1	P2	P3	P4	P5
19	13	13	13	19

Per tal de comparar les dades amb uns paràmetres més pròxims, s'han utilitzat només les mesures que es van obtenir amb peces d'orientació plana i recomanada. En total es van mesurar 5 provetes per a cada orientació.

Els paràmetres de fabricació de les provetes queden indicats a la Taula 5.9:

Taula 5.9 Paràmetres de fabricació de les provetes

Nom peça	Proveta plana	Proveta recomanada
Alçada de capa d'impressió	50 $\mu$ m	50 $\mu$ m
Posició d'impressió	Central	Central
Orientació d'impressió	Plana [P]	Recomanada [R]
Suports d'impressió	Recomanats	Recomanats
Resina	White V3	White V3
Temps de curat	30 min	60 min
Temperatura de curat	60 $^{\circ}$ C	60 $^{\circ}$ C

Les principals diferències respecte les peces del present estudi són l'alçada de capa i el post-curat de les peces, que cal tenir en compte que no es va realitzar en la cambra *Form Cure* ja que en aquell moment no es disposava d'ella. En el cas de les provetes es va utilitzar una cambra climàtica *Heraeus Vötsch VTRK500* amb una font de llum ultraviolada per realitzar el post-curat.

### Precisió dimensional de les peces respecte l'orientació d'impressió

Per analitzar les dades conjuntament s'han calculat prèviament l'error de les mesures respecte les seves cotes nominals. A la Figura 5.28 es mostra el diagrama d'efectes principals de l'error de les mesures i el diagrama d'interval de valors respecte les orientacions de fabricació.

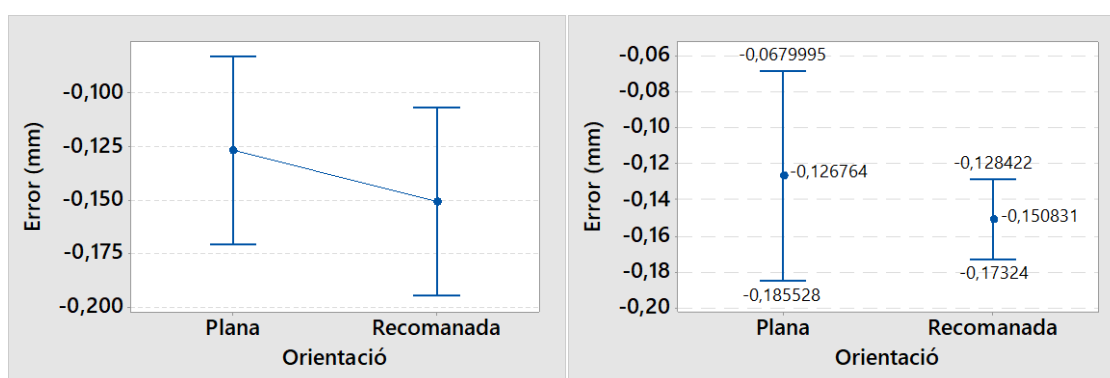


Figura 5.28 Comparatiu d'error dimensional segons orientació. Esquerra: Diagrama d'efectes principals. Dreta: Diagrama d'interval de l'error

Tal com s'observa a diagrama d'efectes principals, l'orientació plana obté una mitjana d'error més propera a la cota nominal, contràriament als resultats obtinguts en el present estudi. Per altra banda s'observa com la dispersió de valors és molt major en l'orientació plana, amb una desviació típica de 0,2174mm mentre que la recomanada obté una desviació de 0,0829mm.

A l'observar diferències notables en aquest anàlisi respecte els resultats anteriors s'han separat les dades dels dos estudis a la Figura 5.29. Els valors amb l'etiqueta "Insert" corresponent als del present estudi mentre que l'etiqueta "Proveta" indica els valors de l'estudi anterior.

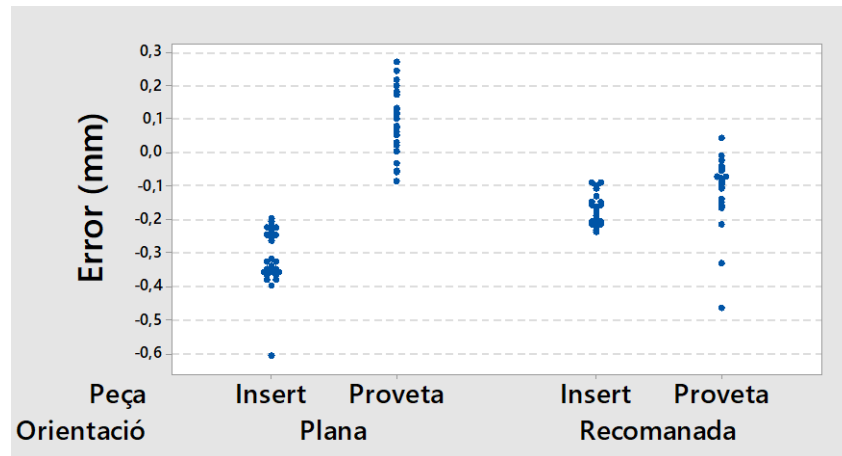


Figura 5.29 Valors de l'error de les mesures exteriors dels dos estudis

Les dades mostren distribucions molt diferents entre els dos estudis. Per una banda, la dispersió de valors és molt major en el cas de les provetes mentre que les mostres de l'insert obtenen uns rangs de valors menors. També es pot apreciar una diferència important en el cas de les dades de l'orientació plana, explicant la gran dispersió de valors que s'ha obtingut en els gràfics anteriors. En el cas de l'orientació recomanada les diferències no són tant importants, trobant-se la majoria de valors entre la cota nominal i un error de -0,2mm. Aquestes diferències observades poden indicar que la fabricació amb orientació recomanada pot ser un procés molt més estable a nivell dimensional indiferentment de la geometria de la peça impresa.

Per altra banda es poden atribuir les diferències entre els dos estudis a dos factors principals. Per una banda el gruix de capa de les provetes és el doble que el dels inserts. Aquesta diferència pot influir en la dispersió de valors que s'observa en el darrer gràfic. El procés de curat també pot tenir una influència dimensional important en les peces. En el cas de les provetes, no es va seguir un procés de curat tant adequat per la resina de *Formlabs* com s'ha fet en el present estudi pels inserts. Això pot comportar que les peces no curessin tant bé i homogèniament com es podria esperar. Com a conseqüència les peces podrien presentar propietats mecàniques i dimensionals diferents, podent afectar tant a la dispersió com la mitjana de les dades.

### Precisió dimensional de les peces respecte la magnitud de la mesura

En aquest segon comparatiu s'han classificat els valor d'error calculats per les diferents cotes mesurades. A la Figura 5.30 s'indica el diagrama d'efectes principals i la distribució de mesures obtingudes per a cada grup.



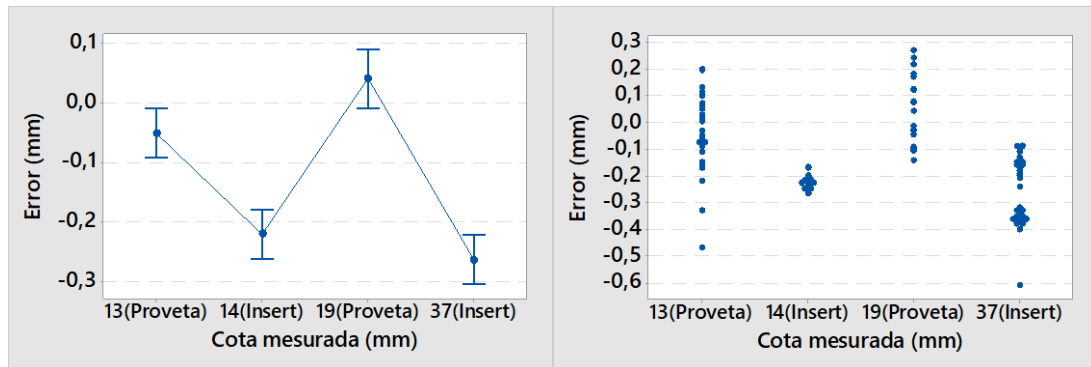


Figura 5.30 Comparatiu d'error segons la magnitud de mesura. Esquerra: Diagrama d'efectes principals. Dreta: Valors d'error de mesures dels dos estudis

A l'igual que amb l'anàlisi anterior, s'observa una gran diferència en la distribució de punts dels dos estudis, obtenint altre cop rangs de valors majors en les provetes. En el diagrama d'efectes principals tampoc s'observa una tendència clara de les dades, degut a les diferències dels resultats per a cada estudi.

#### 5.4.2. Anàlisi de forats

En aquest segon anàlisi s'han utilitzat les mesures realitzades als diàmetres de les peces del present treball i mesures obtingudes de forats de peces fabricades en l'estudi anterior (Geometria 1 i Geometria 2). La Figura 5.31 mostra les geometries i les cotes nominals dels forats que es van mesurar.

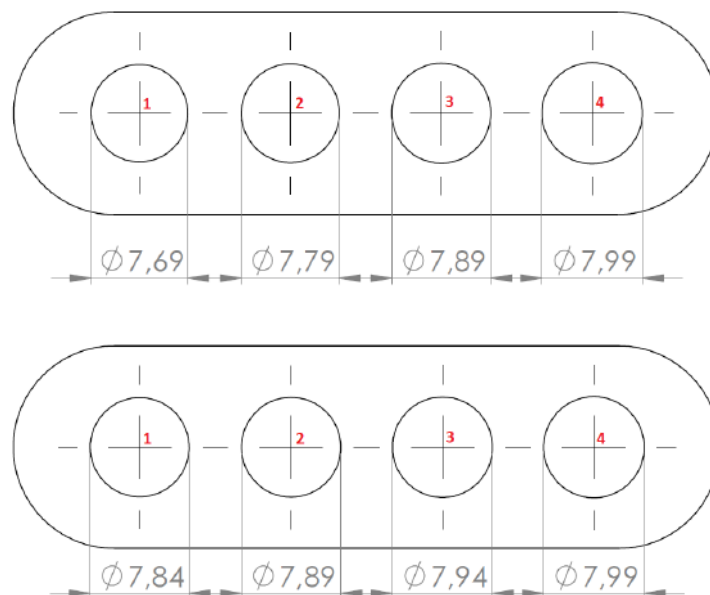


Figura 5.31 Mides nominals dels forats d'estudi. A dalt: Geometria 1. A baix: Geometria 2

En aquest cas es van fabricar un total de 2 peces de cada geometria. Els paràmetres de fabricació que es van seguir s'indiquen a la Taula 5.10.

Taula 5.10 Paràmetres de fabricació de la Geometria 1 i 2

Nom peça	Geometria 1/2 plana	Geometria 1/2 recomanada
Alçada de capa d'impressió	50 µm	50 µm
Posició d'impressió	Central	Central
Orientació d'impressió	Plana [P]	Recomanada [R]
Suports d'impressió	Recomanats	Recomanats
Resina	White V4	White V4
Temps de curat	30 min	30 min
Temperatura de curat	60 °C	60 °C

A l'igual que amb les provetes cal considerar que la capa d'impressió utilitzada va ser major que les peces mostra de l'insert i el curat es va realitzar a la cambra climàtica en comptes de la *Form Cure*.

Un cop calculat l'error de les diferents mesures s'han analitzat les dades i agrupat segons l'orientació de les peces (Figura 5.32).

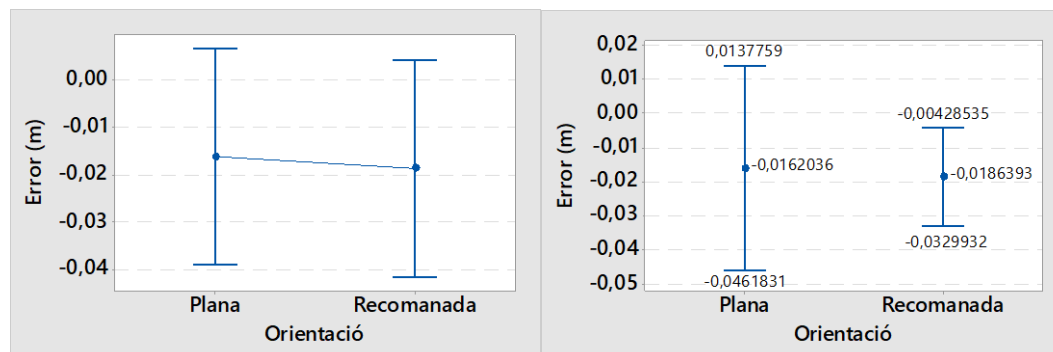


Figura 5.32 Comparatiu d'error de diàmetre segons orientació. Esquerra: Diagrama d'efectes principals. Dreta: Diagrama d'interval de l'error

A diferència del que s'havia observat fins ara, l'orientació plana obté una mitjana inferior a la nominal. Si s'analitza el rang de valors per a cada orientació es pot veure com l'orientació plana també obté un rang molt major que la recomanada, indicant que pot haver diferències importants entre els dos estudis. A l'igual que amb l'apartat anterior, s'han tornat a representar les dades classificades segons la peça mesurada per poder analitzar amb més detall els resultats obtinguts (Figura 5.33).

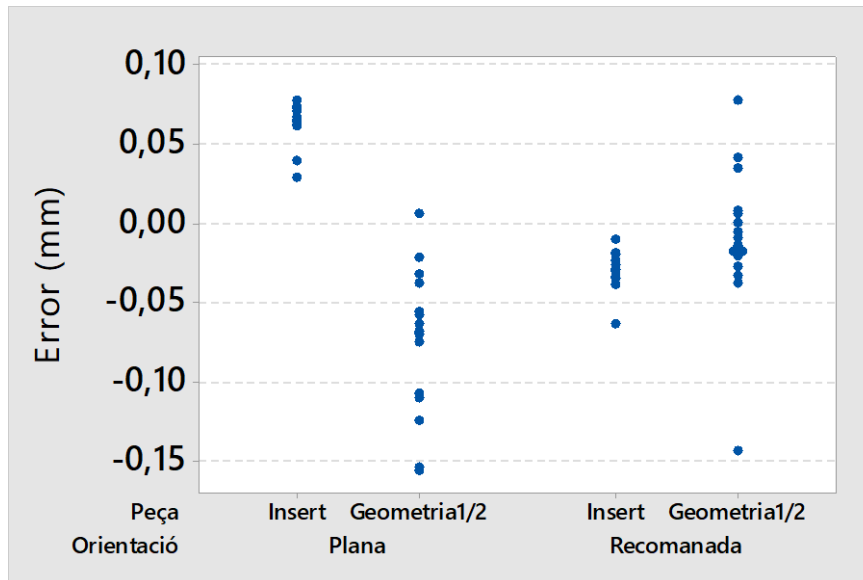


Figura 5.33 Valors de l'error de les mesures de diàmetre dels dos estudis

A l'igual que amb les mides exteriors s'observa com les dades obtingudes de les geometries 1 i 2 tenen un rang de valors molt major. A més es veuen diferències clares entre les dos peces en orientació plana, causant la diferència de rangs observada al gràfic anterior. A l'igual que en l'anàlisi de mides exteriors també s'observa com les peces recomanades obtenen resultats més similars entre peces, indicant que aquesta orientació ofereix resultats més estables. A l'igual que amb l'apartat anterior, s'atribueixen els resultats obtinguts a les diferències entre els paràmetres de fabricació de les peces analitzades, mostrant un millor comportament les peces de l'insert al ser fabricades amb una capa d'impressió inferior i un post-curat més adequat.

## 6. RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost pel disseny i estudi de motlles impresos en fabricació additiva per a la injecció de peces de plàstic per ultrasons ascendeix a 6.458,52 € (sis mil quatre-cents cinquanta-vuit euros amb cinquanta-dos cèntims).

Per altra banda el pressupost estimat per la fabricació i muntatge del motlle amb insert de fabricació additiva ascendeix a 624,51 € (sis-cents vint-i-quatre euros amb cinquanta-un cèntims).

El pressupost total de ambdues parts resulta un total de 7.083,03 € (set mil vuitanta-tres euros amb tres cèntims).

## 7. CONCLUSIONS

En aquest apartat es resumeixen les principals conclusions que s'han obtingut en el present treball. Primerament s'han analitzat estudis previs per determinar els paràmetres de procés que podrien influir en la fabricació d'un motlle en FA. S'ha definit l'orientació d'impressió com el paràmetre principal d'aquest estudi degut a la notable influència que pot tenir sobre les característiques geomètriques de les peces. L'orientació d'impressió s'ha definit en dos estats diferents, orientació plana i recomanada pel software de la impressora 3D

En referència al motlle d'estudi, s'ha dividit la placa d'injecció inferior d'aquest en dos parts principals, un insert central de FA i un marc exterior (MUD) de fabricació CNC. La resta d'elements del motlle s'han mantingut en l'estat actual o han patit modificacions menys notables. Per l'estudi de l'insert de FA s'han fabricat peces de mostra amb una part parcial de l'insert, sent representatives pels diferents estudis realitzats.

En referència als estudis realitzats en el present treball, aquests s'han dividit en tres fases. Primerament s'ha estudiat la llargada i amplada de les mostres. En aquest estudi s'ha determinat que les peces de mostra fabricades en SLA tenen unes cotes exteriors menors a les nominals. S'ha vist que d'entre les dos orientacions, la que obté uns resultats més propers a les cotes nominals és la recomanada, obtenint també una dispersió menor de valors. De la mateixa manera la llargada s'obté en uns valors més pròxims als nominals amb l'orientació recomanada, sent la plana la que obté una dispersió lleugerament menor. Finalment comparant l'amplada i llargada es pot concloure que un augment de la magnitud mesurada implica un error major i una dispersió de valors més gran.

La segona fase de proves s'ha centrat en l'estudi dels forats. Les mesures de diàmetre dels diferents forats mostren que amb una orientació plana s'obtenen diàmetres superiors a la cota nominal, sent el contrari amb un orientació recomanada. D'entre les dos orientacions, la recomanada obté uns valors més pròxims a la cota teòrica del model. Pel que fa a la distància entre forats aquestes tenen valors inferiors als esperats, sent poc clar quina de les dos orientacions d'impressió és més favorable. A l'igual que en l'estudi d'amplada i llargada, s'observa que a major distància, més gran és l'error de la cota respecte la mida nominal. Finalment la orientació plana és la que ofereix una regularitat dels forats D1 ( $\varnothing 10\text{mm}$ ) i D4 ( $\varnothing 4\text{mm}$ ) major, tal com s'ha vist en l'escanejat de ambdós forats.

Pel que fa a la superfície, l'estudi mostra com la cara superior de les peces fabricades té una forma convexa en els dos casos, efecte de la contracció que pateixen les peces de resina. Si es comparen les dos orientacions la que obté una mitjana de valors més pròxima al pla de referència és la recomanada. No obstant l'orientació plana obté una superfície més regular.

Un cop finalitzats els estudis es pot concloure que l'orientació recomanada aporta unes característiques dimensionals més pròximes al model original. L'orientació plana ofereix una superfície i forma dels forats més regular però en la resta de paràmetres s'obtenen

cotes massa allunyades del model teòric per ser utilitzat en la fabricació de motlles. A falta d'una segona fase de proves amb l'insert de motlle complet, sembla que fabricar el component amb una orientació recomanada i realitzant alguns acabats finals com el repàs dels forats en CNC, podria ser el camí més viable per desenvolupar motlles d'emmotllament per ultrasons de sèries curtes.

## 7.1. Treballs futurs

Al veure's afectada la part experimental del present treball a causa dels efectes del COVID-19, es descriu en aquest apartat la resta de proves que s'havien considerat i que, en cas de que aquest estudi segueixi endavant, caldria fer per finalitzar el desenvolupament del motlle.

Un cop finalitzada la fase de proves amb les peces de mostra, caldria fabricar l'insert de FA complet seguint els paràmetres utilitzats en les mostres d'orientació recomanada. Paral·lelament es podria començar la fabricació del marc prototip per realitzar proves de muntatge amb la resta d'elements del motlle. Per tal de verificar els resultats obtinguts, es faria un estudi dimensional de l'insert seguint les tres fases descrites en el present treball (dimensions exteriors, forats i superfície). Addicionalment s'hauria de mesurar el motlle original i comparar els resultats amb les mesures obtingudes de l'insert i el motlle fabricats.

Un cop verificades les dimensions de les peces i fent els ajustaments necessaris, s'hauria de planejar i llimar la part posterior de l'insert. Un cop fet, es podrien començar les proves de muntatge de l'insert amb el marc, els expulsors i *plunger* del motlle. Les proves a realitzar podrien tenir alguns cicles de millora en funció dels resultats que s'obtinguessin per cada una de les peces.

Finalment i un cop verificat el muntatge de les parts es podria procedir amb les proves de funcionament del motlle, primerament comprovant que les cavitats tanquen amb la placa d'injecció superior i els elements mòbils funcionen correctament. Finalitzades aquestes comprovacions es podrien realitzar les primeres proves d'injecció amb l'insert de FA i comparar les peces obtingudes amb d'altres fabricades amb el motlle de metall.

## 8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present treball consta d'un únic document on s'hi inclou la memòria del projecte i els diferents annexos.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] WHLEAN, C. , SHEAHAN, C. Using Additive Manufacturing to Produce Injection Moulds Suitable for Short Series Production. Juny 2019.
- [2] LEÓN-CABEZAS, M.A. , MARTÍNEZ-GARCÍA, A. , VARELA-GANDÍA, F.J. Innovative advances in additive manufactured moulds for short plastic injection series. Juny 2017.
- [3] FORMLABS. Moldeo por inyección a partir de moldes impresos en 3D. Accessible a la web: <https://3d.formlabs.com/libro-blanco-moldeo-por-inyeccion-a-partir-de-moldes-impresos-en-3d/>. Agost 2016.
- [4] FORMLABS. Moldmaking with 3D Prints. Accessible a la web: <https://3d.formlabs.com/making-molds-with-3d-printing/>. Octubre 2016.
- [5] ROBINSON, G. (Stratasys). 3D Printed Injection Molds. Accessible a la web: [http://www.stratasys.com/-/media/files/webinar-slides/3dprintedinjectionmolds\\_webinarslides.pdf](http://www.stratasys.com/-/media/files/webinar-slides/3dprintedinjectionmolds_webinarslides.pdf). Consultat: Febrer 2020.
- [6] GIBBONS, G.F. , HANSELL R.G. Direct tool steel injection mould inserts through the Arcam EBM free-form fabrication process. 2005.
- [7] RUFFO, M. , TUCK, C. , HAGUE, R. Cost estimation for rapid manufacturing – laser sintering production for low to medium volumes. Maig 2006.
- [8] TOFAIL, S.A.M. , KOUMOULOS, E.P. , BANDYOPADHYAY, A. , BOSE, S. , O'DONOGHUE, L. , CHARITIDIS, C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. Febrer 2018.
- [9] JAVAID, M. , HALEEM, A. Additive manufacturing Applications in medical cases: A literatura based review. 2017.
- [10] UDROIU, R. , BRAGA, I.C. Polyjet technology application for rapid tooling. 2017.
- [11] KRIESI, C. , BJELLAND, Ø. , STEINERT, M. Fast and iterative prototyping for injection molding – a case study of rapidly prototyping. 2018.
- [12] MOLTERO MELO FERRAZ, M. A. , NAGASHIMA, J.B. , VENZAC, B. , LE GAC, S. , SONGSASEN, N. 3D printed mold leachates in PDMS microfluidic devices. 2020.
- [13] KOROTCHENKO, A.Y. , KHILKOV D.E. , TVERSKOY, M.V. , KHILKOVA, A.A. Use of additive technologies for metal injection molding. Octubre 2019.
- [14] RAJAGURU, K. , KARTHIKEYAN, T. , VIJAYAN, V. Additive manufacturing – State of art. Agost 2019.
- [15] HARRIS, R.A. , HAGUE, R.J.M. , DICKENS, P.M. The structure of parts produced by stereolithography injection mould tools and the effect on part shrinkage. Agost 2003.



[16] TOURI, M. , KABIRIAN, F. , SAADATI, M. , RAMAKRISHNA, S. , MOZAFARI, M. Additive Manufacturing of Biomaterials – The Evolution of Rapid Prototyping. 2019.

[17] HERZOG, D. , SEYDA, V. , WYCISK, E. , EMMELMANN, C. Additive manufacturing of metals. Juliol 2016.

[18] FERRER, I. , VIVES-MESTRES, M. , MANRESA, A. , GARCIA-ROMEU, M.L. Replicability of Ultrasonic Molding for Processing Thin-Wall Polystyrene Plates with Microchannel. Juny 2018.

[19] HEREDIA-RIVERA, U. , FERRER, I. , VÁZQUEZ, E. Ultrasonic Molding Technology: Recent Advances and Potential Applications in the Medical Industry. Abril 2019.

[20] VILÀ, D. Estudi de la capacitat de la tecnologia additiva estereolitogràfica (SLA). Projecte / Treball Fi de Carrera. Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial. Universitat de Girona. Setembre 2018.

[21] BRAIAN, m. , JIMBO, R. , WENNERBERG, A. Production tolerance of additive manufactured polymeric objects for clinical applications. Març 2016.

[22] ZHOU, J.G. , HERSCOVICI, D. , CHEN, C.C. Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts. 1999.

## Annex A: EQUIPAMENT

### A.1 Impressora SLA *Form 2*

A la Taula Annex 1 es mostra la fitxa tècnica de la impressora *Form 2*.

*Taula Annex 1. Fitxa tècnica de l'impressora Form 2*

<b>Hardware</b>	Dimensions exteriors	34,5 x 33 x 52 cm
	Pes	13 kg
	Control de temperatura	Automàtic fins a 35 °C
	Sistema de control de temperatura	Tanc de resina calefactat
	Requeriments d'alimentació	100 – 240 V AC 1,5 A 50 / 60 Hz 65 W
	Làser	Certificat: EN 60825-1:2007 Tipus: Classe 1 Llargada d'ona: 405 nm Potència: 250 mW
	Interfície amb l'usuari	Pantalla tàctil amb polsador
	Connectivitat	Wifi, Ethernet i USB
<b>Propietats d'impressió</b>	Tecnologia	Estereolitografia (SLA)
	Volum d'impressió	14,5 x 14,5 x 17,5 cm
	Número de dipòsits de resina	1
	Alçada de capa	25, 50, 100 µm
	Mecanisme de capa	Sliding peel process with wiper
	Emplenat del tanc de resina	Automàtic
	Mida del punt làser	140 µm
	Generació de suports d'impressió	Auto-generats. Fàcilment eliminables

## A.2 Cambra de curat *Form Cure*

A la Taula Annex 2 es mostra la fitxa tècnica de la cambra de curat *Form Cure*.

*Taula Annex 2. Fitxa tècnica de la Form Cure*

<b>Hardware</b>	Dimensions exteriors	26,2 x 26,2 x 34 cm
	Pes	5,6 kg
	Temperatura de funcionament	Recomanada entre 18 – 28 °C
	Diàmetre de la taula giratòria	19,3 cm
	Alçada interior de la cambra	18,5
	Requeriments d'alimentació	100 – 240 V AC 6 A 50 / 60 Hz 144 W
	Emissions de soroll	<70 dB
	Interfície amb l'usuari	Pantalla LCD i pom giratori amb polsador
	Connectivitat	
<b>Propietats del curat</b>	Tecnologia	LED
	Número de LEDs	13
	Potència total dels LEDs	39 W
	Llargada d'ona dels LEDs	405 nm
	Temperatura màxima de curat	80 °C
	Velocitat de la taula giratòria	1 rpm



Figura Annex 1. Màquina *Form Cure* (Font: <https://formlabs.com/wash-cure/>)

### A.3 Escàner 3D *EinScan Pro 2X Plus*

A la Taula Annex 3 es mostren les principals característiques de l'escàner *EinScan PRO 2X Plus*.

*Taula Annex 3. Fitxa tècnica EinScan PRO 2X Plus*

<b>Exactitud de mesura (configuració fixa)</b>	0,04 mm
<b>Temps d'escanejat (conf. fixa)</b>	< 0,5 s / foto
<b>Distància entre punts (conf. fixa)</b>	0,24 mm
<b>Rang de mesura</b>	208 x 136 mm a 312 x 204 mm
<b>Distància de treball</b>	510 mm
<b>Profunditat de camp</b>	± 100 mm
<b>Font de llum</b>	LED
<b>Format de les dades</b>	OBH, STL, ASC, PLY, 3MF, P3
<b>Pes (inclou cable de dades USB)</b>	1,13 kg



*Figura Annex 2. Escàner 3D EinScan Pro 2X Plus (Font: <https://www.impresoras3d.com.mx>)*

#### A.4 Peu de rei digital *Mitutoyo Digimatic ABSOLUTE*

A la Taula Annex 4 es poden observar les característiques principals del peu de rei *Mitutoyo Digimatic ABSOLUTE*.

Taula Annex 4. Fitxa tècnica Mitutoyo Digimatic ABSOLUTE

<b>Interval de mesura</b>	0 – 150 mm
<b>Resolució</b>	0,01 mm
<b>Error d'indicació</b>	± 0.02 mm
<b>Repetibilitat</b>	0,01 mm



Figura Annex 3. Peu de rei Mitutoyo Digimatic ABSOLUTE (Font : <https://shop.mitutoyo.eu>)

#### A.5 Micròmetre digital *Mahr Micromar 40 EWV*

A la Taula Annex 5 s'observa la fitxa tècnica del micròmetre *Mahr Micromar 40 EWV*.

Taula Annex 5. Fitxa tècnica Mahr Micromar 40 EWV

<b>Interval de mesura</b>	0 – 25 mm
<b>Resolució</b>	1 µm
<b>Límit d'error</b>	4 µm
<b>Diàmetre del cargol</b>	6,5 mm
<b>Pas del cargol</b>	0,635 mm



Figura Annex 4. Micròmetre Mahr Micromar 40 EWV (Font: <https://www.mahr.com>)

## A.6 Màquina de coordenades *Mitutoyo Crysta Apex 544*

A la Taula Annex 6 es mostra la fitxa tècnica de la màquina de coordenades *Mitutoyo Crysta Apex 544*.

Taula Annex 6. Fitxa tècnica Mitutoyo Crysta Apex 544

<b>Dimensions exteriors</b>	1082 x 1122 x 2185 mm
<b>Pes (inclou controladora)</b>	515 kg
<b>Rang de mesura</b>	505 x 405 x 405 mm
<b>Resolució</b>	0,1 µm
<b>Precisió</b>	1,7 µm
<b>Velocitat màxima de desplaçament</b>	520 mm/s
<b>Velocitat màxima de mesura</b>	8 mm/s
<b>Màxima acceleració</b>	2,309 mm/s <sup>2</sup>
<b>Guiatge</b>	Coixinets d'aire
<b>Correcció de temperatura</b>	16 – 26 °C
<b>Consum d'aire</b>	50 l/min
<b>Pressió d'aire</b>	0,4 MPa



Figura Annex 5. Mitutoyo Crysta Apex 544 (Font: <https://shop.mitutoyo.eu>)

## Annex B. RESINES

### B.1 Reina *High Temp V1* (FLHTAM01)

En aquest apartat hi ha indicades les característiques principals de la resina *High Temp V1*. Els valors es poden trobar a la Taula Annex 7.

Taula Annex 7. Fitxa tècnica de la resina *High Temp V1* de Formlabs

	Sense curar	Curat	Mètode
<b>Propietats mecàniques</b>			
Esforç màxim a tracció	33 MPa	51,1 MPa	ASTM D 638-14
Mòdul elàstic	1,5 GPa	3,6 GPa	
Deformació al trencament	9%	2%	
Resistència a la flexió al trencament	41,2 MPa	106,9 MPa	ASTM D 790-15
Mòdul de flexió	1,1 GPa	3,3 GPa	
Resistència a l'impacte pel mètode IZOD	12,3 J/m	14 J/m	ASTM D 256-10
Absorció d'aigua	N/A	0,21 %	ASTM D 570-98
<b>Propietats tèrmiques</b>			
Temperatura de deflexió tèrmica a 1,8 MPa	42,3 °C	130 °C	ASTM D 648-16
Temperatura de deflexió tèrmica a 0,45 MPa	55,9 °C	289 °C	
Expansió tèrmica (0-150 °C)	120,9 µm/m/°C	87,5 µm/m/°C	ASTM D E 831-13

Segons el fabricant els valors de la taula s'han obtingut amb els següents paràmetres:

- Els valors sense curar s'han obtingut amb peces impreses utilitzant la impressora *Form 2*, una alçada de capa de 100 µm i resina *High Temp V1*.
- Els valors amb curat s'han obtingut amb peces impreses utilitzant la impressora *Form 2*, una alçada de capa de 100 µm i resina *High Temp V1*. El post-curat realitzat és de 80,5 mW/cm<sup>2</sup> amb un fluorescent de 365 nm de longitud d'ona i un temps de 60 minuts.

El fabricant també indica que cal tenir en compte que les propietats poden variar segons la geometria, orientació d'impressió, paràmetres d'impressió i temperatura de les peces impreses.

## Annex C. RESULTATS

### C.1 Dimensions exteriors

#### Dades de l'anàlisi amb escàner 3D

A continuació es mostren els valors obtinguts d'amplada i llargada de la peça de mostra abans, després de pintar i amb l'escàner 3D.

*Taula Annex 8. Valors d'amplada de l'anàlisi amb escàner 3D*

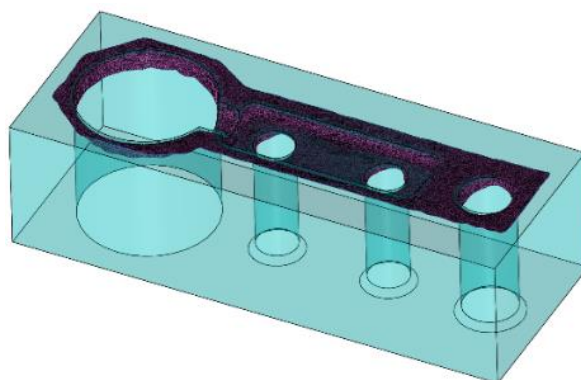
Núm. de mesura	Valor amplada (mm)		
	Abans de pintar	Després de pintar	Escàner 3D
1	13,896	13,885	14,096
2	13,870	13,918	14,051
3	13,890	13,915	14,026
4	13,891	13,908	14,074
5	13,887	13,910	14,101
<b>Mitjana</b>	<b>13,887</b>	<b>13,907</b>	<b>14,070</b>

*Taula Annex 9. Valors de llargada de l'anàlisi amb escàner 3D*

Núm. de mesura	Valor llargada (mm)		
	Abans de pintar	Després de pintar	Escàner 3D
1	36,78	36,86	37,109
2	36,87	36,92	37,088
3	36,96	37,06	37,150
4	36,86	36,93	36,993
5	36,91	37,04	37,139
<b>Mitjana</b>	<b>36,88</b>	<b>36,96</b>	<b>37,096</b>

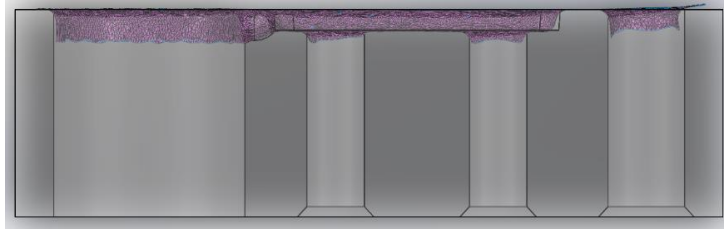
#### Imatges de l'anàlisi amb escàner 3D.

En aquest apartat es mostren algunes captures del *Solidworks 2018* amb la superposició de la malla 3D i el model CAD.



*Figura Annex 6. Vista isomètrica de la malla (Font pròpia)*

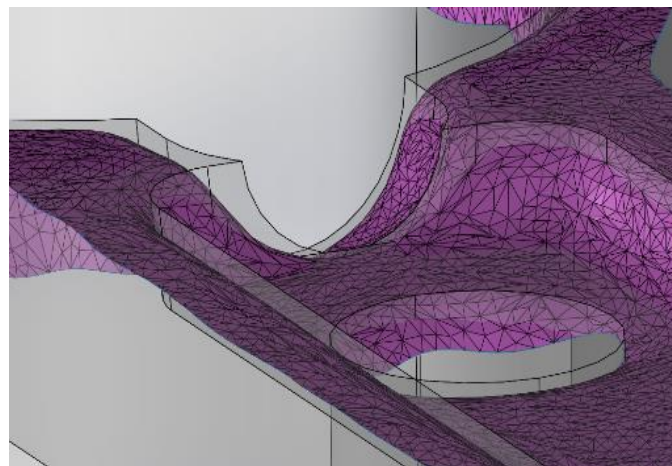




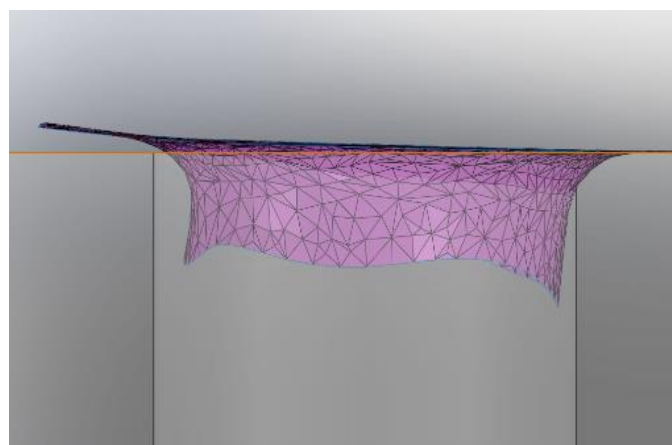
*Figura Annex 7. Vista en alçat de la malla (Font pròpia)*



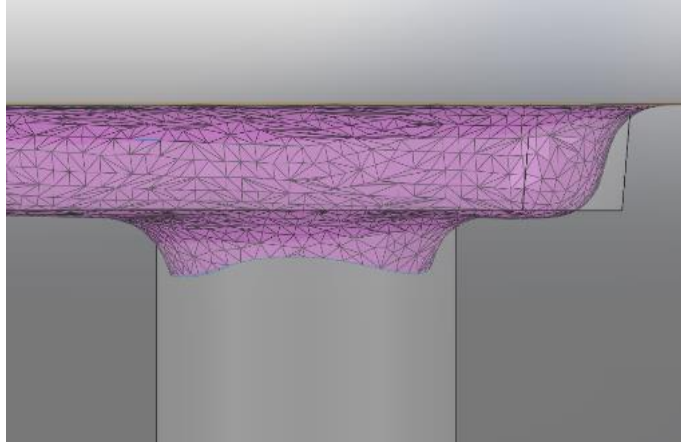
*Figura Annex 8. Vista en planta de la malla (Font pròpia)*



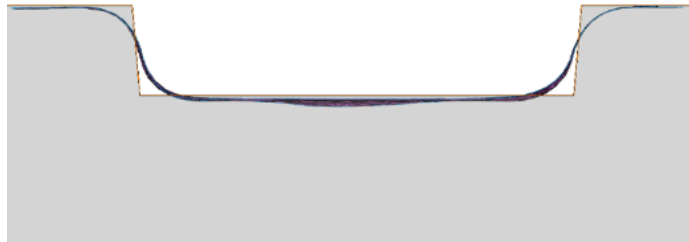
*Figura Annex 9. Detall del mallat del runner (Font pròpia)*



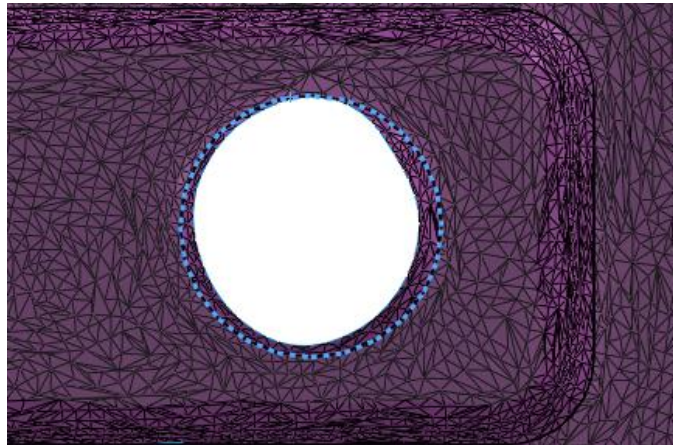
*Figura Annex 10. Vista en alçat de la malla del forat D4 (Font pròpia)*



*Figura Annex 11. Vista en alçat de la malla del forat D3 (Font pròpia)*



*Figura Annex 12. Secció de la malla de la cavitat d'injecció (Font pròpia)*



*Figura Annex 12. Vista en planta de la malla del forat D3 (Font pròpia)*

### Dades de llargada de les peces de mostra

A la Taula Annex 10 i Taula Annex 11 es mostren les 5 mesures de llargada realitzades a cada una de les peces de mostra amb el peu de rei.

*Taula Annex 10. Valors de llargada i error de les peces amb orientació plana*

Orientació peça	Peça	Núm. de mesura	Valor llargada (mm)	Error llargada (mm)
Plana	1	1	36,67	-0,33
		2	36,66	-0,34
		3	36,67	-0,33
		4	36,39	-0,61
		5	36,68	-0,32
	2	1	36,65	-0,35
		2	36,64	-0,36
		3	36,64	-0,36
		4	36,63	-0,37
		5	36,65	-0,35
	3	1	36,60	-0,40
		2	36,62	-0,38
		3	36,64	-0,36
		4	36,63	-0,37
		5	36,62	-0,38
	<b>Mitjana</b>		<b>36,63</b>	<b>-0,37</b>

*Taula Annex 11. Valors de llargada i error de les peces amb orientació recomanada*

Orientació peça	Peça	Núm. de mesura	Valor llargada (mm)	Error llargada (mm)
Recomanada	4	1	36,80	-0,20
		2	36,90	-0,10
		3	36,79	-0,21
		4	36,82	-0,18
		5	36,84	-0,16
	5	1	36,81	-0,19
		2	36,85	-0,15
		3	36,83	-0,17
		4	36,87	-0,13
		5	36,91	-0,09
	6	1	36,76	-0,24
		2	36,85	-0,15
		3	36,91	-0,09
		4	36,89	-0,11
		5	36,84	-0,16
	<b>Mitjana</b>		<b>36,63</b>	<b>-0,16</b>

### Dades d'amplada de les peces de mostra

A la Taula Annex 12 i Taula Annex 13 es mostren les 5 mesures d'amplada per a cada posició de peça realitzades a cada a les peces de mostra amb el micròmetre.

*Taula Annex 12. Valors d'amplada i error de les peces amb orientació plana*

Orientació peça	Peça	Posició de mesura	Valor amplada (mm)	Error amplada (mm)
Plana	1	1	13,753	-0,247
		2	13,754	-0,246
		3	13,745	-0,255
		4	13,749	-0,251
		5	13,772	-0,228
	2	1	13,775	-0,225
		2	13,775	-0,225
		3	13,803	-0,197
		4	13,787	-0,213
		5	13,791	-0,209
	3	1	13,735	-0,265
		2	13,753	-0,247
		3	13,752	-0,248
		4	13,756	-0,244
		5	13,757	-0,243
	<b>Mitjana</b>		<b>13,764</b>	<b>-0,236</b>

*Taula Annex 13. Valors de llargada i error de les peces amb orientació recomanada*

Orientació peça	Peça	Posició de mesura	Valor amplada (mm)	Error amplada (mm)
Recomanada	4	1	13,775	-0,225
		2	13,778	-0,222
		3	13,789	-0,211
		4	13,774	-0,226
		5	13,785	-0,215
	5	1	13,785	-0,215
		2	13,763	-0,237
		3	13,790	-0,210
		4	13,834	-0,166
		5	13,764	-0,236
	6	1	13,798	-0,202
		2	13,831	-0,169
		3	13,833	-0,167
		4	13,835	-0,165
		5	13,799	-0,201
	<b>Mitjana</b>		<b>13,796</b>	<b>-0,204</b>

## C.2 Dimensions i forma dels forats

### Dades de diàmetre i distància entre forats

A la Taula Annex 14 i Taula Annex 15 es mostren els resultats de mesura i error dels diàmetres dels forats de les peces de mostra.

Taula Annex 14. Valors de diàmetre i error de les peces amb orientació plana

Orientació peça	Peça	D1		D2		D3		D4	
		Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)
Plana	1	10,0727	0,0727	3,0736	0,0736	3,0652	0,0652	4,0286	0,0286
	2	10,0642	0,0642	3,0607	0,0607	3,0637	0,0637	4,0616	0,0616
	3	10,0389	0,0389	3,0665	0,0665	3,0767	0,0767	4,0709	0,0709
	Mitjana	10,0586	0,0586	3,0669	0,0669	3,0685	0,0685	4,0537	0,0537

Taula Annex 15. Valors de diàmetre i error de les peces amb orientació recomanada

Orientació peça	Peça	D1		D2		D3		D4	
		Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)
Recomanada	1	9,9695	-0,0305	2,9652	-0,0348	2,9732	-0,0268	3,9662	-0,0338
	2	9,9368	-0,0632	2,9607	-0,0393	2,9900	-0,0100	3,9797	-0,0203
	3	9,9763	-0,0237	2,9694	-0,0306	2,9810	-0,019	3,9711	-0,0289
	Mitjana	9,9609	-0,0391	2,9651	-0,0349	2,9814	-0,0186	3,9723	-0,0277

La Taula Annex 16 i Taula Annex 17 mostren les distàncies entre centres dels forats de les peces de mostra.

Taula Annex 16. Distància entre forats i error de les peces amb orientació plana

Orientació peça	Peça	d1		d2		d3	
		Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)
Plana	1	25,7824	-0,2176	9,6895	-0,0605	8,4220	-0,078
	2	25,8037	-0,1963	9,6617	-0,0883	8,4403	-0,0597
	3	25,8095	-0,1905	9,6732	-0,0768	8,4342	-0,0658
	Mitjana	25,7985	-0,2015	9,6748	-0,0752	8,4322	-0,0678

Taula Annex 17. Distància entre forats i error de les peces d'orientació recomanada

Orientació peça	Peça	d1		d2		d3	
		Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)	Mesura (mm)	Error (mm)
Plana	1	25,7603	-0,2397	9,7155	-0,0345	8,3928	-0,1072
	2	25,7834	-0,2166	9,6996	-0,0504	8,4250	-0,075
	3	25,8193	-0,1807	9,7287	-0,0213	8,4281	-0,0719
	Mitjana	25,7877	-0,2123	9,7146	-0,0354	8,4153	-0,0847

## Dades de forma dels forats

A continuació es mostren els resultats de l'anàlisi de forma dels forats D1 i D4 per una mostra d'orientació plana i una de recomanada. La Taula Annex 18, Taula Annex 19, Taula Annex 20 i Taula Annex 21 indiquen els punts X,Y,Z dels diferents punts del perfil de cada forat, referenciats al seu centre. A les taules també s'indica el radi del forat, calculat amb el mòdul X,Y per a cada punt.

*Taula Annex 18. Valors dels punts obtinguts del forat D1 en orientació plana*

Punts de D1 en orientació plana				
Punt	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Mòdul X,Y (mm)
1	-4,8994	1,0692	-0,9301	5,0147
2	-4,9094	1,0256	-0,9306	5,0154
3	-4,9893	0,3874	-0,9287	5,0043
4	-4,9999	-0,2356	-0,9296	5,0054
5	-4,9313	-0,8663	-0,9293	5,0068
6	-4,7795	-1,463	-0,9297	4,9984
7	-4,5744	-2,0182	-0,9303	4,9998
8	-4,3006	-2,5712	-0,9299	5,0106
9	-3,943	-3,0934	-0,9316	5,0116
10	-3,5182	-3,5679	-0,9306	5,0108
11	-3,0545	-3,962	-0,9306	5,0027
12	-2,5446	-4,3404	-0,9328	5,0313
13	-1,9455	-4,6354	-0,9304	5,0271
14	-1,3469	-4,8583	-0,9308	5,0415
15	-0,6871	-4,9888	-0,9305	5,0359
16	-0,0524	-5,0339	-0,9302	5,0342
17	0,569	-5,0064	-0,9312	5,0386
18	1,2047	-4,8919	-0,9313	5,0381
19	1,8014	-4,6965	-0,932	5,0301
20	2,3961	-4,4374	-0,9322	5,0430
21	2,9311	-4,0858	-0,9323	5,0284
22	3,4256	-3,6925	-0,9325	5,0368
23	3,8795	-3,2117	-0,9314	5,0364
24	4,2607	-2,7038	-0,9317	5,0462
25	4,5761	-2,1285	-0,9312	5,0469
26	4,7991	-1,5311	-0,9301	5,0374
27	4,9531	-0,9172	-0,93	5,0373
28	5,031	-0,2728	-0,9298	5,0384
29	5,0118	0,3701	-0,9297	5,0254
30	4,9222	0,9698	-0,9289	5,0168
31	4,7536	1,6051	-0,9289	5,0173
32	4,4943	2,1161	-0,929	4,9676
33	4,2525	2,6602	-0,9254	5,0160
34	3,8517	3,2083	-0,9289	5,0129
35	3,4365	3,6478	-0,9283	5,0116
36	2,9592	4,0738	-0,9262	5,0351
37	2,3846	4,4236	-0,9268	5,0254
38	1,8198	4,6832	-0,9277	5,0243
39	1,1916	4,8858	-0,9276	5,0290
40	0,5346	4,9885	-0,9281	5,0171
41	-0,0622	5,0132	-0,9278	5,0136
42	-0,6818	4,9771	-0,9264	5,0236
43	-1,3112	4,858	-0,9265	5,0318
44	-1,9349	4,6507	-0,9262	5,0371

45	-2,5176	4,3522	-0,9262	5,0279
46	-3,037	4,0027	-0,9264	5,0244
47	-3,5181	3,5898	-0,9264	5,0263
48	-3,9609	3,1109	-0,9266	5,0365
49	-4,3147	2,5659	-0,9268	5,0200
50	-4,591	2,0192	-0,9281	5,0154
51	-4,7825	1,545	-0,9286	5,0259
			<b>Mitjana</b>	<b>5,0233</b>

Taula Annex 19. Valors dels punts obtinguts del forat D1 en orientació recomanada

Punts de D1 en orientació recomanada				
Punt	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Mòdul X,Y (mm)
1	-5,1301	26,0121	-1,3714	5,1352
2	-5,1331	25,9203	-1,3711	5,1350
3	-5,1226	25,2972	-1,3721	5,1455
4	-5,0157	24,6924	-1,3722	5,1328
5	-4,8628	24,0989	-1,3725	5,1460
6	-4,6088	23,5283	-1,3717	5,1305
7	-4,3118	23,0047	-1,3715	5,1291
8	-3,9364	22,4912	-1,3723	5,1310
9	-3,4765	22,0348	-1,3718	5,1118
10	-2,9825	21,6531	-1,3718	5,0938
11	-2,4419	21,3293	-1,3713	5,0787
12	-1,8541	21,0679	-1,3711	5,0660
13	-1,2207	20,8833	-1,3708	5,0489
14	-0,5644	20,7906	-1,3707	5,0236
15	0,0503	20,7866	-1,3707	4,9961
16	0,6681	20,8458	-1,3702	4,9816
17	1,304	20,9946	-1,3691	4,9622
18	1,8987	21,2287	-1,3699	4,9337
19	2,4586	21,5203	-1,3698	4,9204
20	2,996	21,894	-1,3686	4,9087
21	3,4727	22,3417	-1,3688	4,8886
22	3,8824	22,836	-1,3689	4,8738
23	4,2278	23,3787	-1,3695	4,8633
24	4,5065	23,9715	-1,3697	4,8567
25	4,6907	24,589	-1,3695	4,8401
26	4,7961	25,2101	-1,3695	4,8301
27	4,8287	25,8219	-1,3692	4,8289
28	4,801	26,4603	-1,3689	4,8486
29	4,6643	27,084	-1,3695	4,8425
30	4,4739	27,6483	-1,3698	4,8474
31	4,2225	28,1993	-1,3695	4,8653
32	3,8823	28,7479	-1,3697	4,8853
33	3,4607	29,2296	-1,3697	4,8846
34	3,002	29,6488	-1,3699	4,8950
35	2,4753	30,0163	-1,3701	4,9044
36	1,8978	30,3153	-1,3708	4,9141
37	1,2744	30,528	-1,3708	4,9137
38	0,6226	30,659	-1,3711	4,9162
39	0,0131	30,6875	-1,3713	4,9051
40	-0,5873	30,6919	-1,3711	4,9445
41	-1,2565	30,5832	-1,3702	4,9625

42	-1,8535	30,4014	-1,3721	4,9770
43	-2,4281	30,1658	-1,3721	5,0110
44	-3,0099	29,8363	-1,3725	5,0491
45	-3,5311	29,411	-1,3731	5,0631
46	-3,9564	28,9502	-1,3725	5,0683
47	-4,3416	28,4502	-1,3727	5,0957
48	-4,6662	27,8846	-1,3723	5,1179
49	-4,9027	27,2772	-1,3718	5,1255
50	-5,0546	26,6405	-1,3718	5,1269
51	-4,3416	28,4502	-1,3727	5,0957
<b>Mitjana</b>				<b>4,9871</b>

Taula Annex 20. Valors dels punts obtinguts del forat D4 en orientació plana

Punts de D4 en orientació plana				
Punt (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Mòdul X,Y (mm)
1	-2,0094	0,32	-0,2202	2,0347
2	-2,0227	0,112	-0,2193	2,0258
3	-1,9586	-0,4834	-0,2191	2,0174
4	-1,7178	-1,0405	-0,2192	2,0084
5	-1,3209	-1,5521	-0,2207	2,0381
6	-0,6289	-1,939	-0,2187	2,0384
7	0,1224	-2,0247	-0,2194	2,0284
8	0,7702	-1,8613	-0,22	2,0144
9	1,3292	-1,5497	-0,2209	2,0417
10	1,8286	-0,9465	-0,22	2,0590
11	2,0184	-0,1393	-0,2188	2,0232
12	1,9211	0,5007	-0,2186	1,9853
13	1,7049	1,0165	-0,2179	1,9849
14	1,2827	1,549	-0,2173	2,0111
15	0,5679	1,9271	-0,2165	2,0090
16	-0,1557	2,0042	-0,217	2,0102
17	-0,8362	1,8328	-0,2164	2,0145
18	-1,409	1,4403	-0,2161	2,0149
19	-1,8032	0,9382	-0,216	2,0327
<b>Mitjana</b>				<b>2,0206</b>

Taula Annex 21. Valors dels punts obtinguts del forat D4 en orientació recomanada

Punts de D4 en orientació recomanada				
Punt (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Mòdul X,Y (mm)
1	-1,9795	0,4725	0,1414	2,0351
2	-2,0095	0,3506	0,1459	2,0399
3	-2,0069	-0,3866	0,1457	2,0438
4	-1,7322	-1,0579	0,1462	2,0297
5	-1,2438	-1,5842	0,146	2,0141
6	-0,5595	-1,89	0,1465	1,9711
7	0,1158	-1,9579	0,1472	1,9613



8	0,7941	-1,7942	0,147	1,9621
9	1,3918	-1,3921	0,1475	1,9685
10	1,8148	-0,7944	0,1478	1,9811
11	1,9928	-0,1264	0,1475	1,9968
12	1,9375	0,5638	0,1477	2,0179
13	1,62	1,2387	0,1473	2,0393
14	0,8871	1,7825	0,1471	1,9910
15	0,186	1,921	0,1468	1,9300
16	-0,4247	1,8775	0,1459	1,9249
17	-1,0403	1,6458	0,145	1,9470
18	-1,6299	1,1401	0,1457	1,9891
			<b>Mitjana</b>	<b>1,9913</b>

### Imatges de l'anàlisi dels forats

En aquest apartat es mostren les captures realitzades al model CAD amb les dades extretes de l'anàlisi dels forats de les mostres.

Diàmetre i posició dels forats mesurats (en verd):

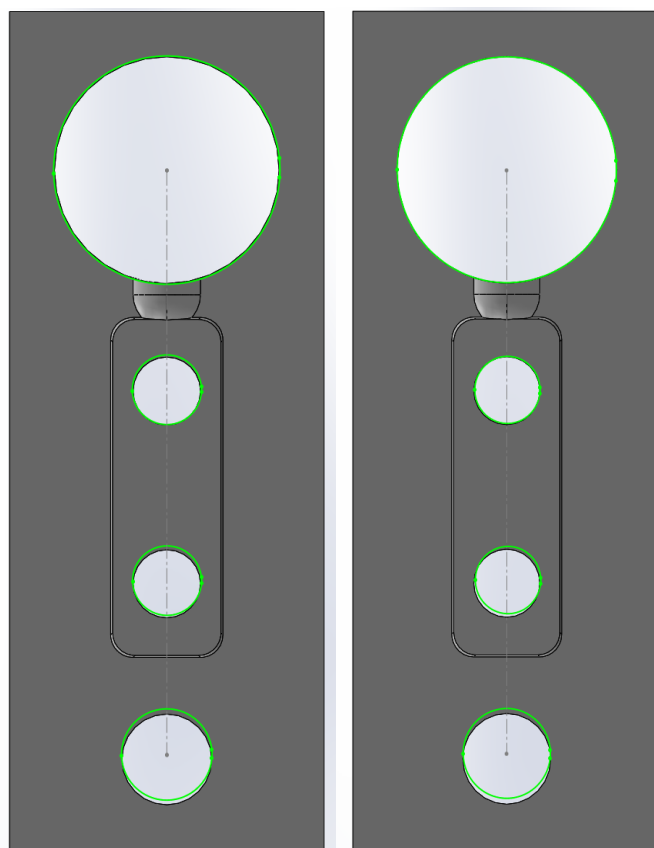


Figura Annex 13. Diàmetre i posició dels forats. Esquerra: Orientació Plana. Dreta: Orientació recomanada (Font pròpia)

Punts de l'escombrat interior dels forats (en vermell).

Forat D1:

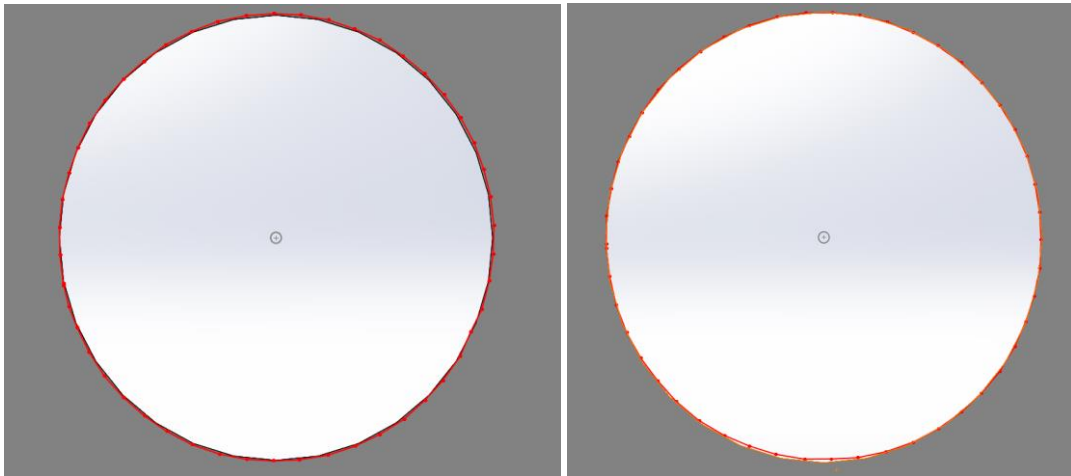


Figura Annex 14. Punts d'escombrat del forat D1. Esquerra: Orientació Plana. Dreta: Orientació recomanada (Font pròpia)

Forat D4:

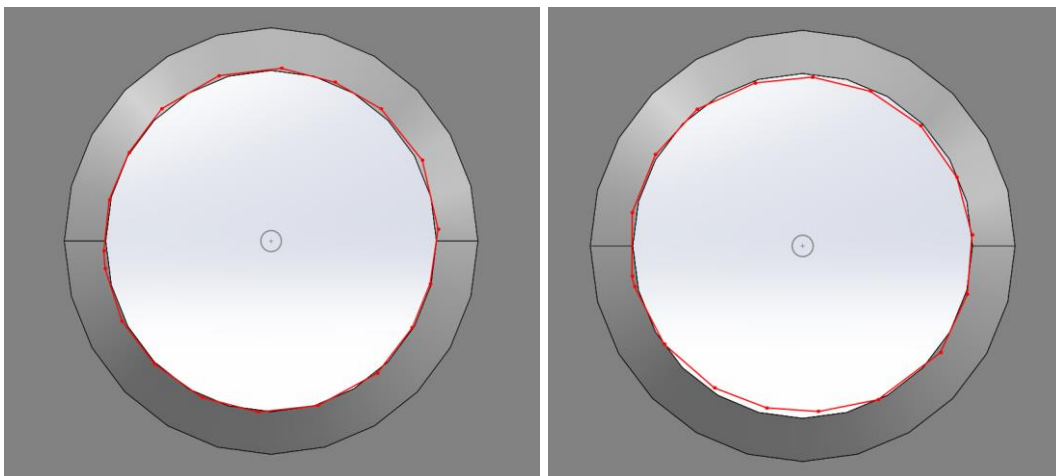


Figura Annex 15. Punts d'escombrat del forat D4. Esquerra: Orientació Plana. Dreta: Orientació recomanada (Font pròpia)

### C.3 Uniformitat de la cara superior

En aquest apartat es troben les dades recollides en l'estudi de la cara superior d'una mostra d'orientació plana i una altra d'orientació recomanada.

Taula Annex 22. Punts de la cara superior amb orientació plana

Punts de la cara superior en orientació plana			
Punt	X	Y	Z
1	-7.000	-6.998	-0,188
2	-5.060	-6.999	-0,118
3	-3.109	-6.999	-0,136
4	-1.167	-6.999	-0,166
5	0.786	-6.999	-0,172
6	2.734	-6.999	-0,186
7	4.683	-6.999	-0,198
8	6.629	-6.999	-0,200
9	8.578	-6.999	-0,208
10	10.526	-6.999	-0,210
11	12.472	-6.999	-0,209
12	14.419	-6.999	-0,206
13	16.367	-6.999	-0,203
14	18.314	-6.999	-0,197
15	20.261	-6.999	-0,186
16	22.207	-6.999	-0,173
17	24.154	-6.999	-0,157
18	26.090	-6.999	-0,140
19	28.045	-6.999	-0,127
20	29.998	-6.999	-0,234
21	29.998	-5.444	-0,132
22	28.050	-5.447	-0,092
23	26.101	-5.446	-0,108
24	24.152	-5.447	-0,124
25	22.204	-5.448	-0,139
26	20.256	-5.445	-0,153
27	18.308	-5.450	-0,165
28	16.360	-5.448	-0,164
29	14.415	-5.448	-0,178
30	12.466	-5.450	-0,183
31	10.518	-5.449	-0,183
32	8.570	-5.451	-0,180
33	6.623	-5.450	-0,177
34	4.676	-5.450	-0,171
35	2.729	-5.444	-0,161
36	0.710	-4.944	-0,009
37	-1.049	-4.912	0,034
38	-3.110	-5.448	-0,113
39	-5.056	-5.444	-0,095
40	-6.999	-5.448	-0,111
41	-7.000	-3.888	-0,104
42	-5.060	-3.896	-0,094
43	-3.122	-3.908	-0,110
44	4.681	-3.891	-0,174
45	6.628	-3.894	-0,179
46	8.575	-3.894	-0,182
47	10.522	-3.894	-0,182
48	12.471	-3.894	-0,183

49	14.417	-3.894	-0,179
50	16.364	-3.894	-0,174
51	18.312	-3.894	-0,166
52	20.259	-3.895	-0,154
53	22.205	-3.895	-0,142
54	24.152	-3.895	-0,125
55	26.099	-3.895	-0,110
56	28.047	-3.896	-0,089
57	30.001	-3.895	-0,132
58	29.998	-2.332	-0,133
59	28.050	-2.337	-0,091
60	26.086	-1.982	-0,042
61	24.152	-2.338	-0,126
62	22.203	-2.334	-0,142
63	6.805	-2.176	-0,138
64	4.445	-2.218	-0,121
65	-4.565	-2.117	0,052
66	-6.999	-2.331	-0,106
67	-6.999	-0.777	-0,109
68	-4.931	-0.763	-0,078
69	21.570	-0.781	0,085
70	24.160	-0.781	-0,144
71	27.857	-0.707	-0,062
72	30.001	-0.785	-0,145
73	30.000	0.779	-0,146
74	27.857	0.706	-0,062
75	24.019	0.101	0,110
76	21.567	0.780	0,083
77	-4.933	0.753	-0,078
78	-6.999	0.780	-0,103
79	-7.000	2.334	-0,102
80	-4.574	2.104	0,055
81	4.445	2.213	-0,129
82	6.798	2.166	-0,144
83	22.207	2.330	-0,141
84	24.151	2.327	-0,124
85	26.084	1.986	-0,034
86	28.046	2.327	-0,092
87	30.001	2.327	-0,130
88	30.000	3.890	-0,131
89	28.050	3.885	-0,088
90	26.101	3.890	-0,102
91	24.153	3.885	-0,110
92	22.204	3.889	-0,136
93	20.256	3.884	-0,154
94	18.308	3.884	-0,164
95	16.361	3.885	-0,171
96	14.413	3.884	-0,179
97	12.465	3.886	-0,182
98	10.518	3.886	-0,180
99	8.571	3.886	-0,181
100	6.623	3.885	-0,177
101	4.676	3.886	-0,173
102	-3.122	3.910	-0,104
103	-5.056	3.890	-0,092
104	-6.999	3.887	-0,101
105	-7.000	5.445	-0,099
106	-5.060	5.439	-0,090
107	-3.112	5.439	-0,108

108	-1.051	4.909	0,031
109	0.710	4.943	-0,011
110	2.731	5.439	-0,158
111	4.680	5.439	-0,168
112	6.628	5.439	-0,175
113	8.575	5.439	-0,180
114	10.521	5.439	-0,181
115	12.470	5.439	-0,177
116	14.417	5.439	-0,175
117	16.363	5.439	-0,171
118	18.312	5.439	-0,161
119	20.258	5.439	-0,148
120	22.206	5.438	-0,137
121	24.153	5.438	-0,121
122	26.099	5.439	-0,105
123	28.046	5.439	-0,082
124	30.001	5.439	-0,136
125	30.000	7.000	-0,183
126	28.052	7.000	-0,083
127	26.101	7.000	-0,100
128	24.153	7.000	-0,117
129	22.205	7.001	-0,130
130	20.258	7.000	-0,116
131	18.310	7.000	-0,148
132	16.361	7.001	-0,170
133	14.413	7.001	-0,178
134	12.465	7.001	-0,183
135	10.518	7.001	-0,184
136	8.570	7.001	-0,181
137	6.623	7.001	-0,177
138	4.676	7.001	-0,172
139	2.730	7.001	-0,161
140	0.783	7.001	-0,150
141	-1.164	7.001	-0,132
142	-3.111	7.000	-0,118
143	-5.057	7.000	-0,099
144	-6.998	7.001	-0,195

Taula Annex 23. Punts de la cara superior amb orientació recomanada

Punts de la cara superior en orientació recomanada			
Punt	X	Y	Z
1	-6.997	-7.000	-0,064
2	-5.059	-7.000	-0,015
3	-3.112	-7.000	0,003
4	-1.163	-7.000	-0,020
5	0.784	-7.000	-0,016
6	2.731	-7.000	-0,027
7	4.678	-6.999	-0,051
8	6.626	-7.000	-0,028
9	8.573	-6.999	-0,059
10	10.520	-7.000	-0,051
11	12.468	-6.999	-0,068
12	14.412	-6.999	-0,073
13	16.361	-6.999	-0,064
14	18.309	-6.999	-0,063
15	20.257	-6.999	-0,067

16	22.204	-6.999	-0,055
17	24.151	-7.000	-0,034
18	26.100	-7.000	-0,015
19	28.048	-7.000	0,013
20	30.001	-6.998	-0,135
21	29.999	-5.445	-0,064
22	28.054	-5.450	0,012
23	26.107	-5.447	-0,015
24	24.158	-5.445	-0,033
25	22.216	-5.445	-0,045
26	20.266	-5.444	-0,060
27	18.309	-5.443	-0,061
28	16.366	-5.443	-0,072
29	14.418	-5.443	-0,066
30	12.471	-5.442	-0,067
31	10.525	-5.444	-0,048
32	8.577	-5.442	-0,066
33	6.631	-5.445	-0,040
34	4.683	-5.444	-0,042
35	2.735	-5.444	-0,036
36	0.789	-5.445	-0,021
37	-1.158	-5.446	-0,027
38	-3.105	-5.448	0,003
39	-5.052	-5.448	0,004
40	-6.999	-5.448	0,023
41	-7.000	-3.891	0,018
42	-5.059	-3.897	0,000
43	-3.120	-3.908	-0,015
44	4.682	-3.891	-0,037
45	6.625	-3.898	-0,056
46	8.571	-3.898	-0,063
47	10.520	-3.898	-0,066
48	12.467	-3.898	-0,074
49	14.415	-3.899	-0,074
50	16.361	-3.898	-0,071
51	18.309	-3.898	-0,070
52	20.257	-3.899	-0,065
53	22.204	-3.898	-0,055
54	24.151	-3.898	-0,047
55	26.100	-3.897	-0,012
56	28.047	-3.896	0,010
57	30.000	-3.898	-0,062
58	30.000	-2.334	-0,050
59	28.054	-2.337	0,007
60	26.106	-2.335	-0,028
61	24.157	-2.332	-0,051
62	22.210	-2.332	-0,057
63	6.790	-2.191	-0,053
64	4.473	-2.230	-0,008
65	-5.048	-2.336	0,000
66	-6.999	-2.338	0,018
67	-7.000	-0.780	0,016
68	-5.059	-0.785	-0,003
69	22.209	-0.784	-0,061
70	24.161	-0.783	-0,082
71	28.051	-0.786	0,003
72	30.000	-0.787	-0,053
73	30.000	0.777	-0,028
74	28.054	0.773	0,018

75	24.158	0.779	-0,089
76	22.210	0.778	-0,073
77	-4.942	0.759	-0,003
78	-6.999	0.773	0,014
79	-7.000	2.332	0,011
80	-5.060	2.325	-0,026
81	4.470	2.223	-0,032
82	6.776	2.182	-0,038
83	22.208	2.327	-0,077
84	24.151	2.324	-0,053
85	26.085	2.006	0,025
86	28.048	2.326	0,031
87	30.000	2.325	-0,017
88	29.994	3.887	0,015
89	28.054	3.882	0,044
90	26.107	3.887	-0,011
91	24.158	3.889	-0,042
92	22.209	3.890	-0,069
93	20.259	3.891	-0,086
94	18.312	3.891	-0,089
95	16.365	3.891	-0,098
96	14.419	3.891	-0,092
97	12.470	3.891	-0,095
98	10.523	3.891	-0,089
99	8.576	3.891	-0,084
100	6.629	3.891	-0,075
101	4.681	3.892	-0,079
102	-3.119	3.909	-0,027
103	-5.053	3.887	-0,019
104	-6.999	3.886	-0,003
105	-7.000	5.443	-0,012
106	-5.059	5.437	-0,013
107	-3.112	5.436	-0,022
108	-1.164	5.435	-0,056
109	0.783	5.435	-0,039
110	2.730	5.435	-0,070
111	4.678	5.435	-0,069
112	6.625	5.435	-0,087
113	8.572	5.434	-0,091
114	10.520	5.434	-0,087
115	12.468	5.434	-0,093
116	14.416	5.434	-0,094
117	16.362	5.434	-0,091
118	18.310	5.434	-0,090
119	20.256	5.434	-0,089
120	22.204	5.434	-0,062
121	24.151	5.435	-0,041
122	26.099	5.436	-0,005
123	28.049	5.439	0,050
124	30.000	5.437	0,009
125	30.000	7.000	-0,052
126	28.054	6.995	0,016
127	26.107	6.996	0,000
128	24.159	7.000	-0,042
129	22.209	7.000	-0,071
130	20.259	7.000	-0,089
131	18.312	7.000	-0,094
132	16.364	7.000	-0,097
133	14.417	7.000	-0,107

---

<b>134</b>	12.469	7.000	-0,104
<b>135</b>	10.522	7.000	-0,107
<b>136</b>	8.575	7.000	-0,092
<b>137</b>	6.629	7.000	-0,083
<b>138</b>	4.681	7.000	-0,075
<b>139</b>	2.733	7.000	-0,092
<b>140</b>	0.788	7.000	-0,057
<b>141</b>	-1.160	7.000	-0,066
<b>142</b>	-3.108	7.000	-0,059
<b>143</b>	-5.055	7.000	-0,061
<b>144</b>	-6.999	7.000	-0,111



## Annex D. ANÀLISI ESTADÍSTIC DELS RESULTATS

Aquest annex presenta els resultats obtinguts per a cada un dels estudis estadístics realitzats sobre les mostres amb el programa *Minitab 18*.

### D.1 Llargada

Anàlisis estadístic de la llargada:

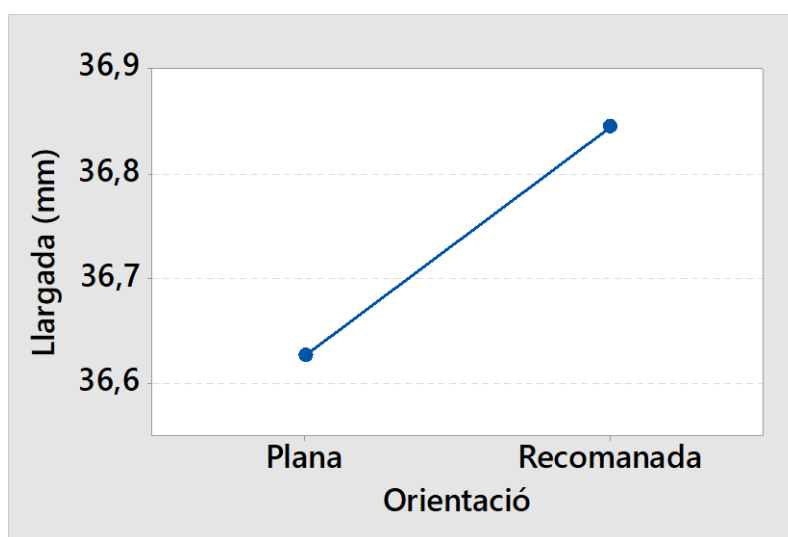
*Taula Annex 24. Anàlisi estadístic de llargada*

Variable	Orientació	Nº	Mitjana	E.E. de la mitjana	Desv.Est.	Mínim	Màxim	Rang de valors
Valor (mm)	Plana	15	36,626	0,0177	0,0687	36,390	36,680	0,290
	Rec	15	36,845	0,0117	0,0452	36,760	36,910	0,150

Anàlisis de variància de la llargada respecte l'orientació ( $\alpha = 0,05$ ):

*Taula Annex 25. Resum de l'anàlisi de variància de llargada*

Resum del model	
p-valor	0,0000000001
R <sup>2</sup>	0,7910
R <sup>2</sup> ajustada	0,7836



*Figura Annex 16. Diagrama d'efectes principals de llargada (Font pròpia)*

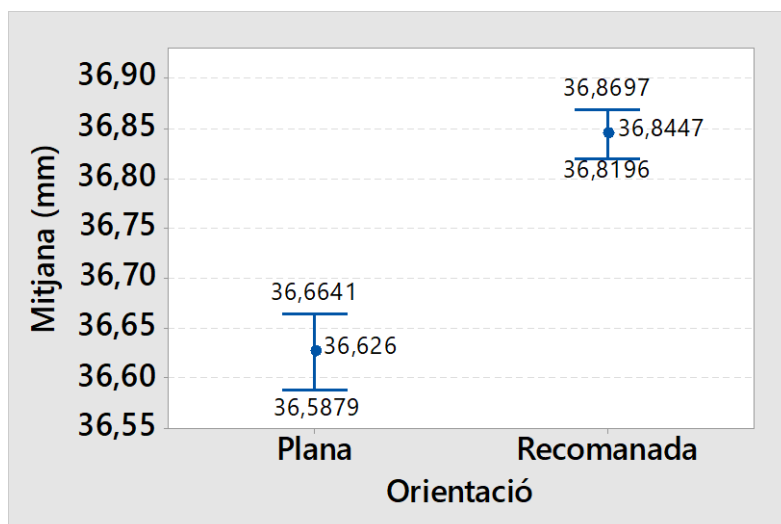


Figura Annex 17. Diagrama d'interval de confiança de llargada (Font pròpia)

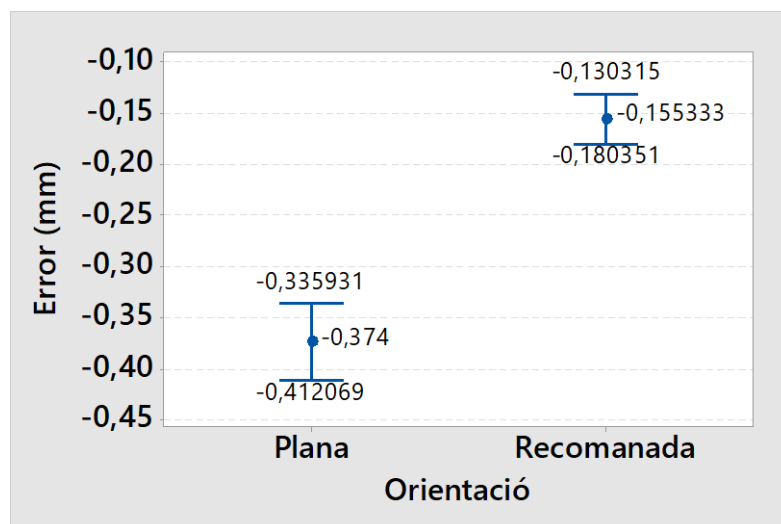


Figura Annex 18. Diagrama d'interval de l'error de llargada (Font pròpia)

## D.2 Amplada

Anàlisi estadístic de l'amplada:

Taula Annex 26. Anàlisi estadístic d'amplada

Variable	Orientació	Nº	Mitjana	E.E. de la mitjana	Desv.Est.	Mínim	Màxim	Rang de valors
Valor (mm)	Plana	15	13,764	0,00493	0,0191	13,735	13,803	0,0680
	Rec	15	13,796	0,00664	0,0257	13,763	13,835	0,0720

Anàlisi de variància de l'amplada respecte l'orientació ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 27. Resum de l'anàlisi de variància d'amplada

Resum del model	
p-valor	0,001
R <sup>2</sup>	0,3445
R <sup>2</sup> ajustada	0,3211

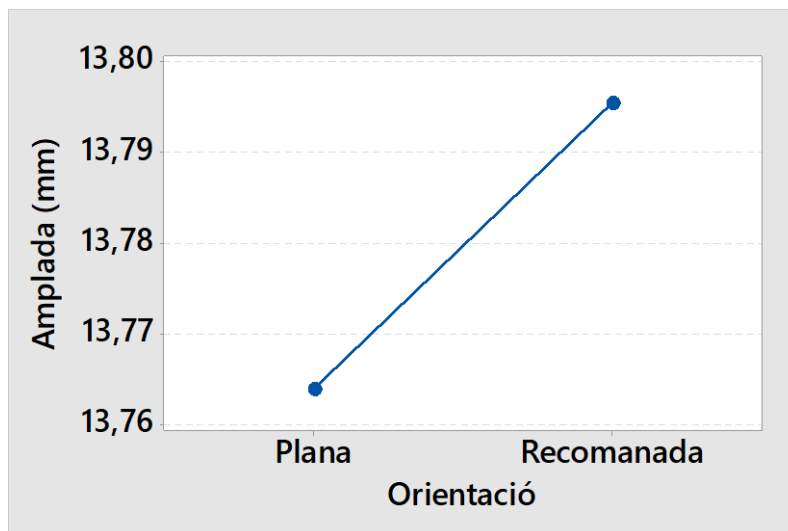


Figura Annex 19. Diagrama d'efectes principals d'amplada (Font pròpia)

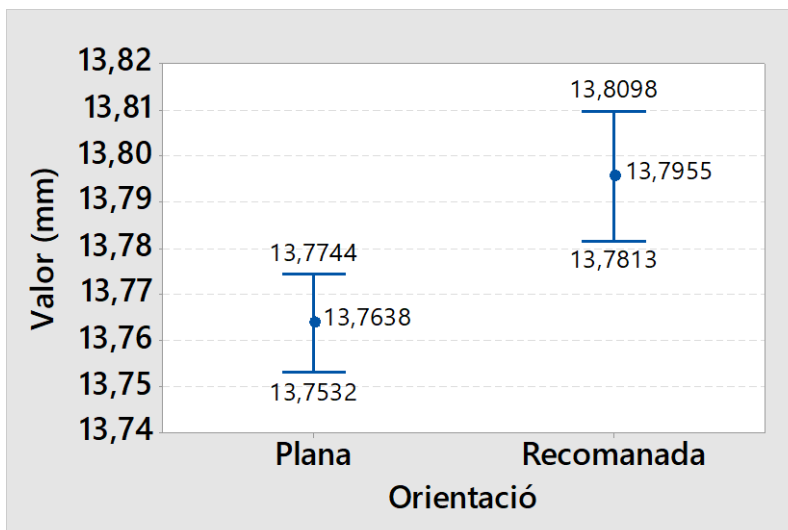


Figura Annex 20. Diagrama d'interval de confiança d'amplada (Font pròpia)

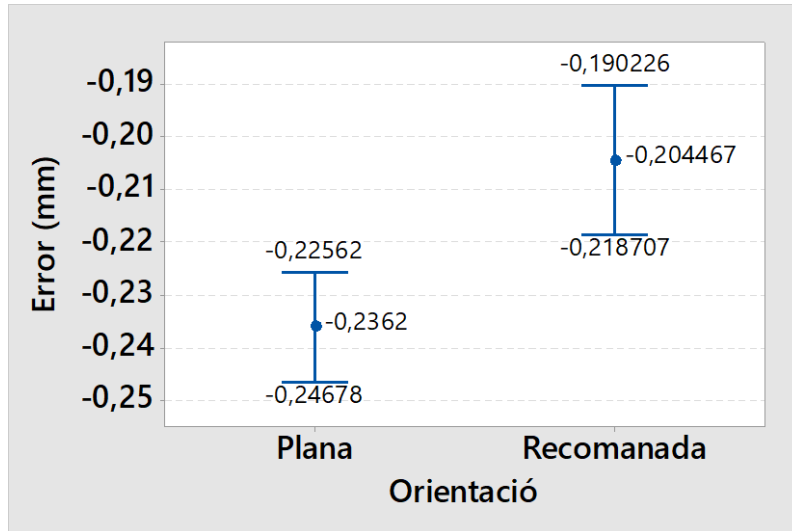


Figura Annex 21. Diagrama d'interval de l'error d'amplada (Font pròpia)

Anàlisi estadística de l'amplada respecte posicions de mesura:

Taula Annex 28. Anàlisi estadístic de l'amplada per posició

Variable	Orientació	Nº	Mitjana	E.E. de la mitjana	Desv.Est.	Mínim	Màxim	Rang de valors
Valor (mm)	1	6	13,770	0,00926	0,0227	13,735	13,798	0,0630
	2	6	13,776	0,0118	0,0290	13,753	13,831	0,0780
	3	6	13,785	0,0134	0,0327	13,745	13,833	0,0880
	4	6	13,789	0,0153	0,0376	13,749	13,835	0,0860
	5	6	13,778	0,00666	0,0163	13,757	13,799	0,0420

Anàlisi de variància de l'amplada respecte les posicions de mesura ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 29. Resum de l'anàlisi de variància de l'amplada per posició

Resum del model	
p-valor	0,791
R <sup>2</sup>	-
R <sup>2</sup> ajustada	-

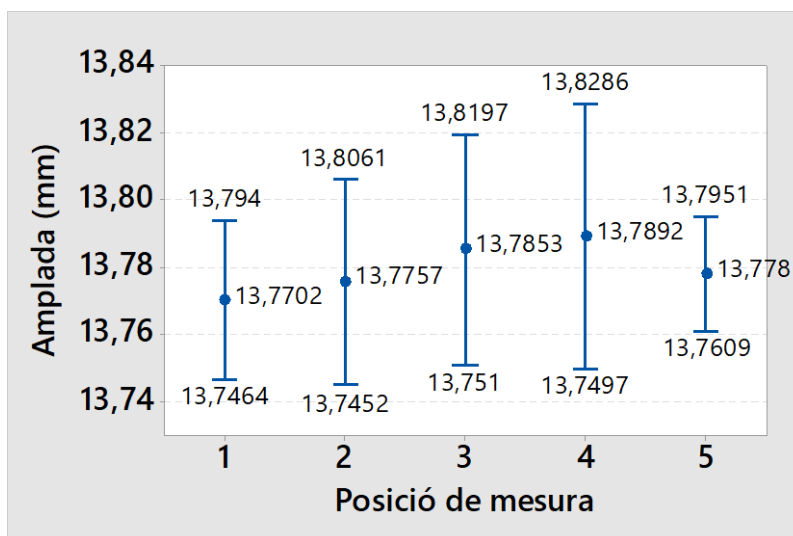


Figura Annex 22. Diagrama d'interval de confiança de l'amplada per posicions (Font pròpia)

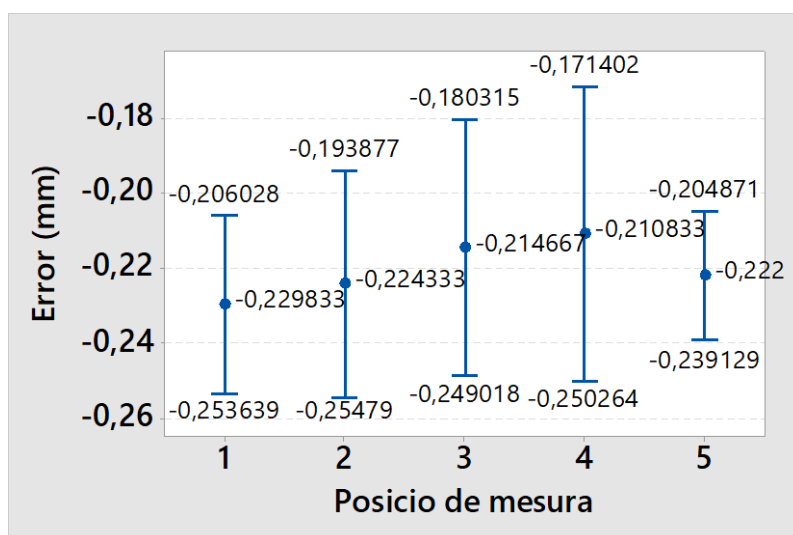


Figura Annex 23. Diagrama d'interval de l'error de l'amplada per posicions (Font pròpia)

### D.3 Comparatiu d'amplada i llargada

Anàlisi estadística del comparatiu d'amplada i llargada:

Taula Annex 30. Anàlisi estadística de l'amplada / llargada

Variable	Cota	Nº	Mitjana	E.E. de la mitjana	Desv.Est.	Mínim	Màxim	Rang de valors
Valor (mm)	amplada	30	-0,22032	0,00502	0,02749	-0,2650	-0,1650	0,1000
	llargada	30	-0,2647	0,0228	0,1250	-0,6100	-0,0900	0,5200

Anàlisi de variància del comparatiu d'amplada i llargada ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 31. Resum de l'anàlisi de variància de l'amplada / llargada

Resum del model	
p-valor	0,063
R <sup>2</sup>	0,0584
R <sup>2</sup> ajustada	0,0422

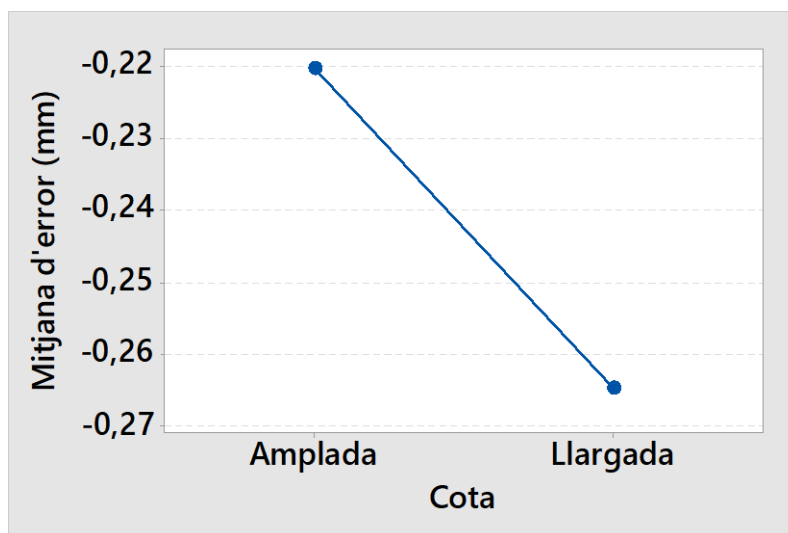


Figura Annex 24. Diagrama d'efectes principals d'amplada / llargada (Font pròpia)

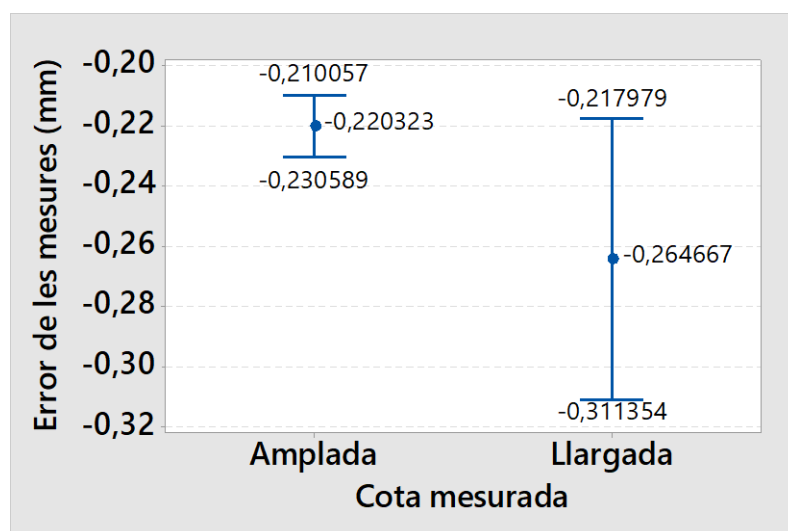


Figura Annex 25. Diagrama d'intervals de l'error de l'amplada / llargada (Font pròpia)

### D.4 Diàmetre dels forats

Error de diàmetre respecte l'orientació d'impressió.

Anàlisi de variància de l'error de diàmetre respecte l'orientació ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 32. Resum de l'anàlisi de variància de l'error de diàmetre segons orientació

Resum del model	
p-valor	0,000000000000007
R <sup>2</sup>	0,9249
R <sup>2</sup> ajustada	0,9215

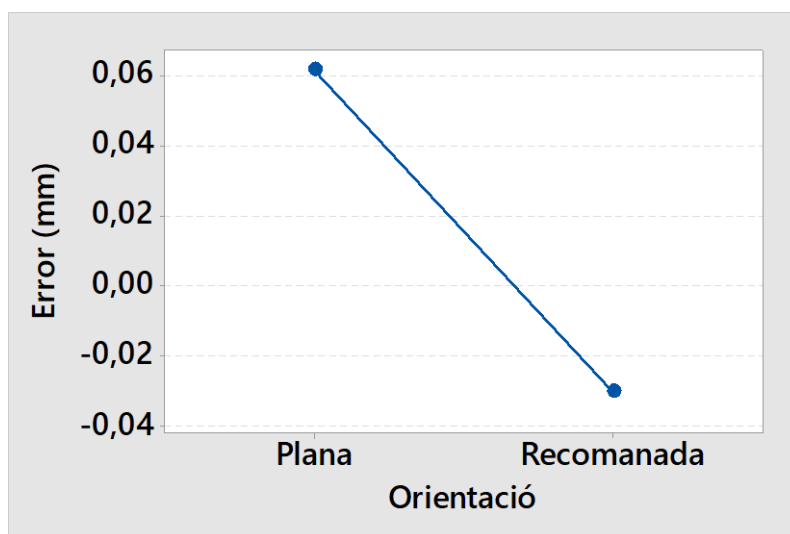


Figura Annex 26. Diagrama d'efectes principals d'error de diàmetre segons l'orientació (Font pròpia)

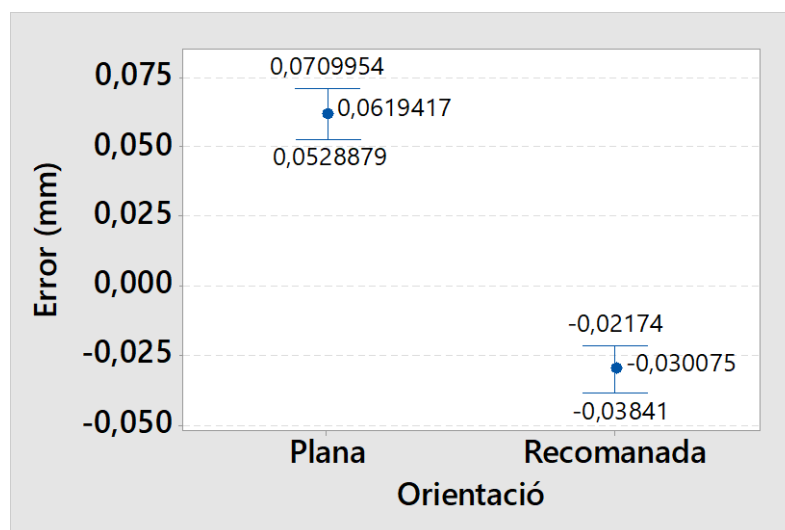


Figura Annex 27. Diagrama d'interval de l'error de diàmetre (Font pròpia)

Error respecte la magnitud del diàmetre.

Anàlisi de variància de l'error de diàmetre respecte la magnitud del diàmetre ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 33. Resum de l'anàlisi de variància de l'error de diàmetre segons la magnitud

Resum del model	
p-valor	0,962
R <sup>2</sup>	0,014
R <sup>2</sup> ajustada	-

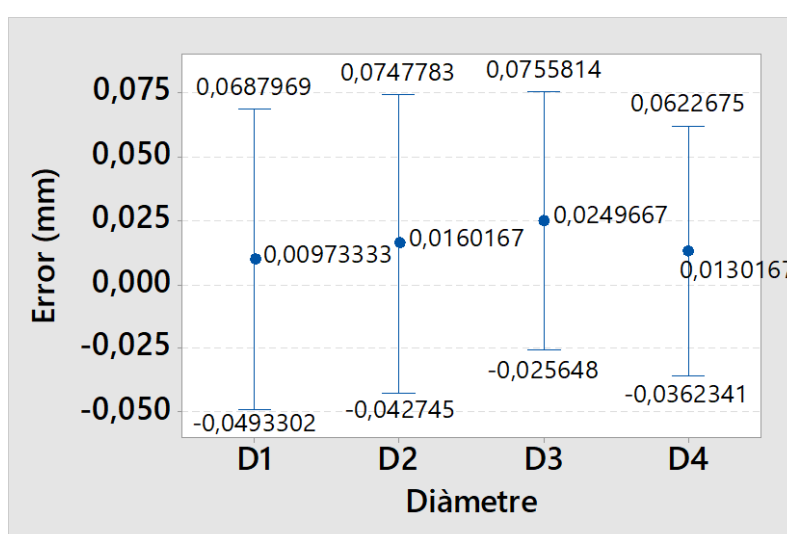


Figura Annex 28. Diagrama d'interval de l'error de diàmetre segons la magnitud (Font pròpia)

### D.5 Posició dels forats

Error de posició respecte l'orientació d'impressió.

Anàlisi de variància de l'error de posició respecte l'orientació ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 34. Resum de l'anàlisi de variància de la posició dels forats

Resum del model	
p-valor	0,777
R <sup>2</sup>	0,0084
R <sup>2</sup> ajustada	-



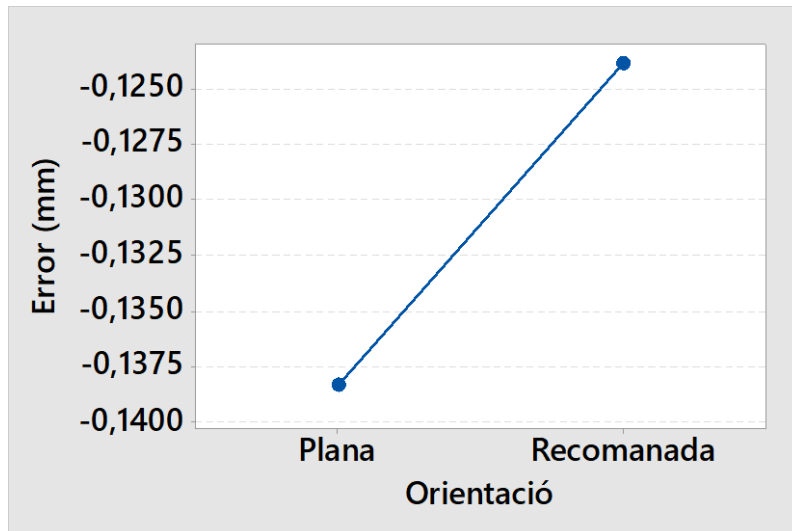


Figura Annex 29. Diagrama d'efectes principals d'error de posició dels forats (Font pròpia)

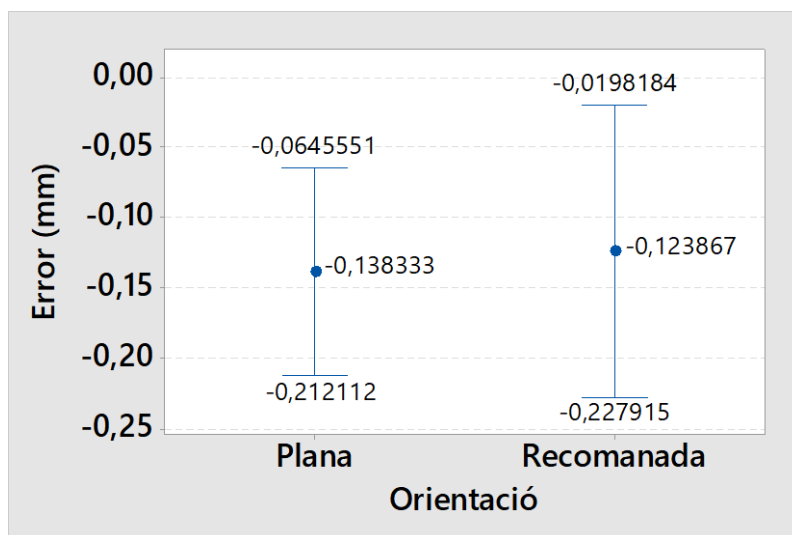


Figura Annex 30. Diagrama d'interval de l'error de posició dels forats (Font pròpia)

## D.6 Forma dels forats

Anàlisi de forma del forat D1.

Anàlisis de variància del radi de D1 respecte l'orientació ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 35. Resum de l'anàlisi de variància del radi D1

Resum del model	
p-valor	0,021
R <sup>2</sup>	0,0527
R <sup>2</sup> ajustada	0,0431

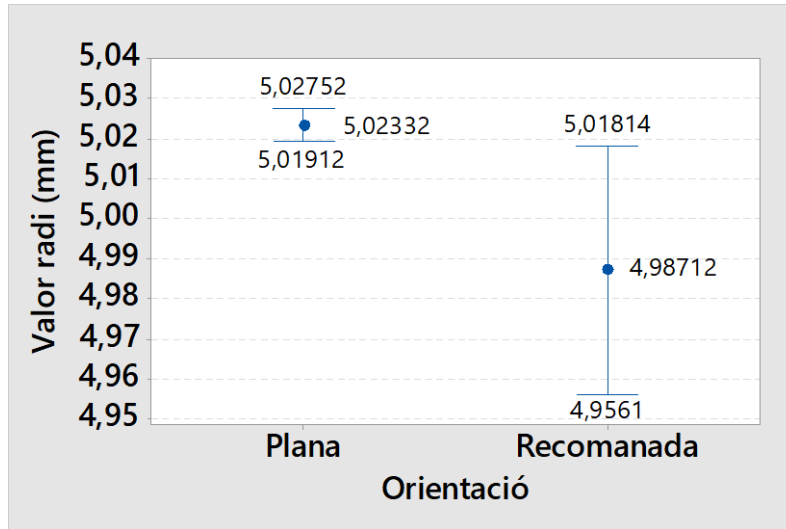


Figura Annex 31. Diagrama d'interval de confiança del radi D1 (Font pròpia)

Anàlisi de forma del forat D4.

Anàlisi de variància del radi de D4 respecte l'orientació ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 36. Resum de l'anàlisi de variància del radi D4

Resum del model	
p-valor	0,005
R <sup>2</sup>	0,2042
R <sup>2</sup> ajustada	0,1815

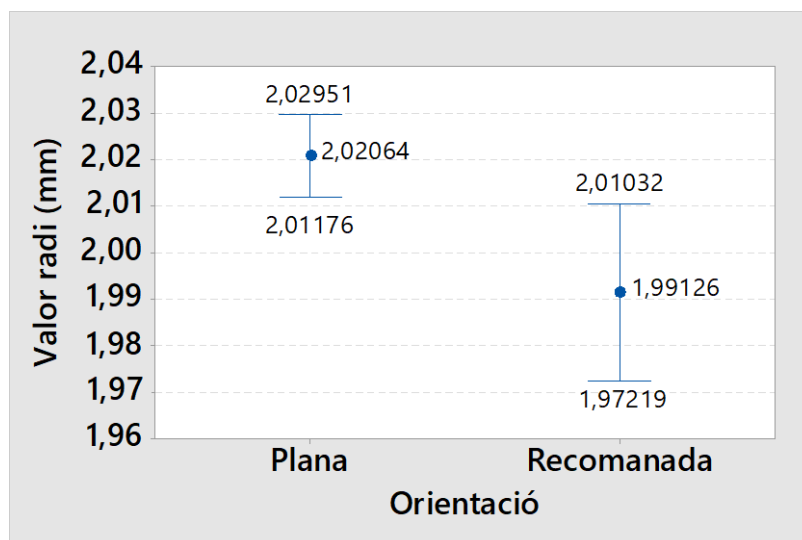


Figura Annex 32. Diagrama d'interval de confiança del radi D4 (Font pròpia)

## D.7 Anàlisi amb dades d'estudis anteriors

Anàlisi estadístic de les mides exteriors respecte l'orientació:

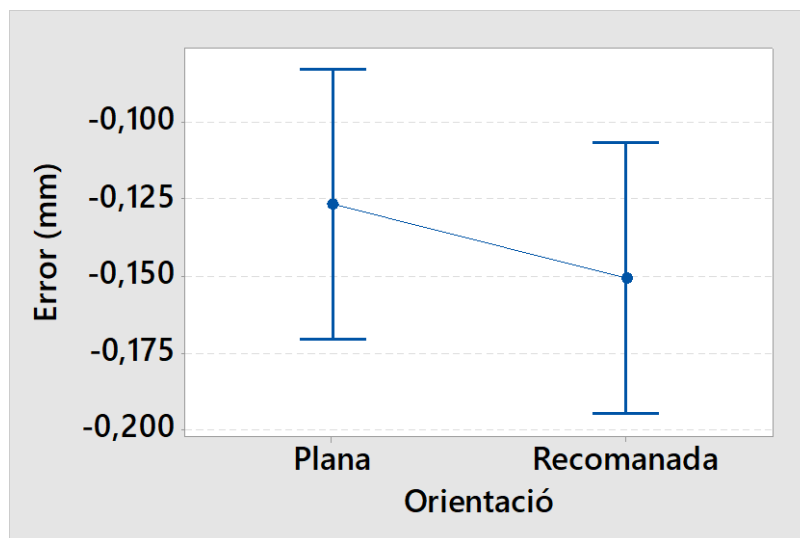
*Taula Annex 37. Anàlisi estadístic de les mides exteriors respecte l'orientació*

Variable	Orientació	Nº	Mitjana	E.E. de la mitjana	Desv.Est.	Mínim	Màxim	Rang de valors
Valor (mm)	Plana	55	-0,1268	0,0293	0,2174	-0,6100	0,2700	0,8800
	Rec	55	-0,1508	0,0112	0,0829	-0,4680	0,0440	0,5120

Anàlisi de variància de les mides exteriors respecte l'orientació ( $\alpha = 0,05$ ):

*Taula Annex 38. Resum de l'anàlisi de variància de les mides exteriors respecte l'orientació*

Resum del model	
p-valor	0,445
R <sup>2</sup>	0,5400
R <sup>2</sup> ajustada	-



*Figura Annex 33. Diagrama d'efectes principals de les mides exteriors respecte l'orientació (Font pròpia)*

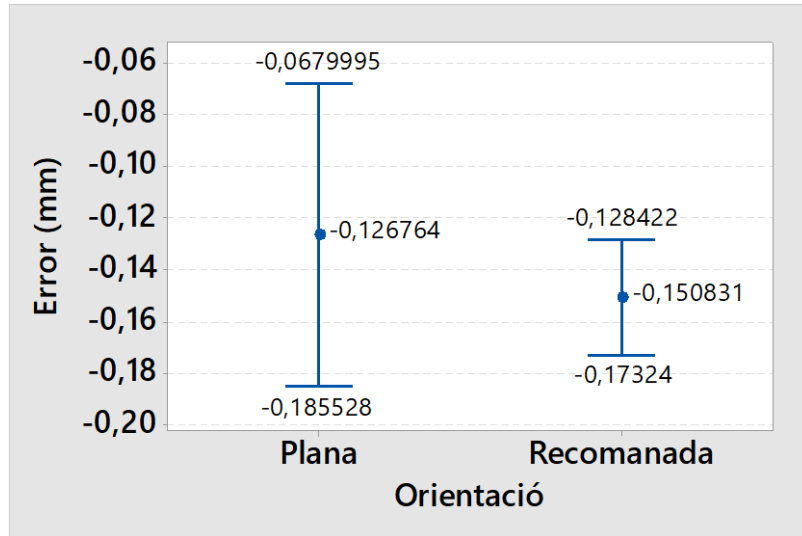


Figura Annex 34. Diagrama d'interval de confiança de les mides exteriors respecte l'orientació (Font pròpia)

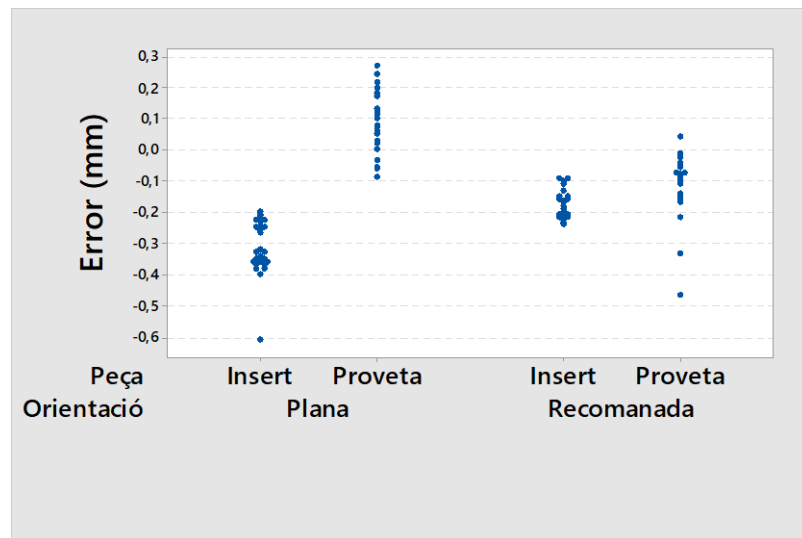


Figura Annex 35. Valors de l'error de les mesures exteriors dels dos estudis segons l'orientació (Font pròpia)

**Anàlisi estadístic de les mides exteriors respecte la magnitud de la mesura:**

Taula Annex 39. Anàlisi estadístic de les mides exteriors respecte la magnitud de la mesura

Variable	Orientació	Nº	Mitjana	E.E. de la mitjana	Desv.Est.	Mínim	Màxim	Rang de valors
Valor (mm)	13	30	-0,0513	0,0262	0,1435	-0,4680	0,1990	0,6670
	14	30	-0,22032	0,00502	0,02749	-0,26500	-0,16500	0,10000
	19	20	0,0411	0,0288	0,1287	-0,1420	0,2700	0,4120
	37	30	-0,2647	0,0228	0,1250	-0,6100	-0,0900	0,5200

Anàlisi de variància de les mides exteriors respecte la magnitud de la mesura ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 40. Resum de l'anàlisi de variància de les mides exteriors

Resum del model	
p-valor	0
R <sup>2</sup>	0,5280
R <sup>2</sup> ajustada	0,5146

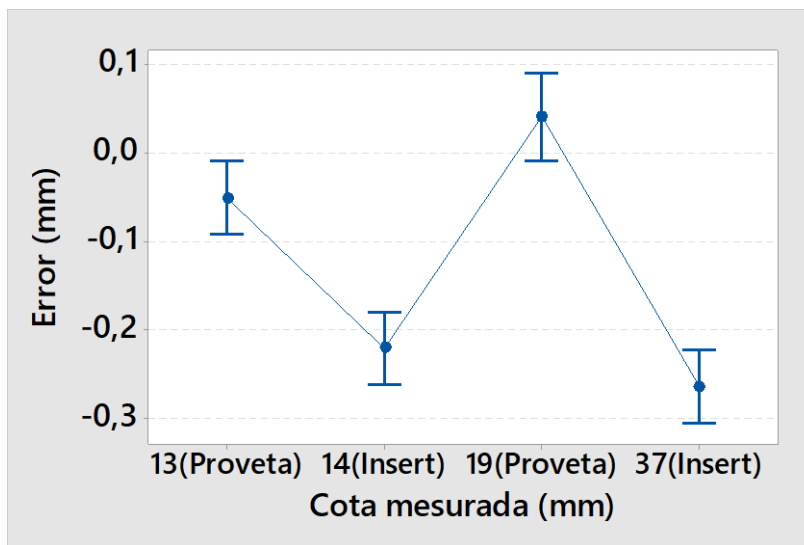


Figura Annex 36. Diagrama d'efectes principals de les mides exteriors respecte la magnitud de la mesura (Font pròpia)

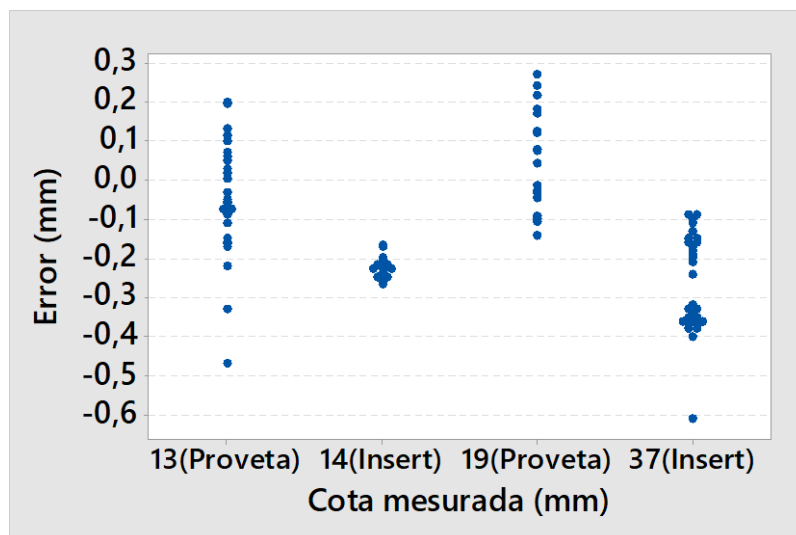


Figura Annex 37. Valors de l'error de les mesures exteriors dels dos estudis segons la magnitud de la mesura (Font pròpia)

## Anàlisi estadístic dels forats:

Taula Annex 41. Anàlisi estadístic del diàmetre dels forats respecte l'orientació

Variable	Orientació	Nº	Mitjana	E.E. de la mitjana	Desv.Est.	Mínim	Màxim	Rang de valors
Valor (mm)	Plana	28	-0,0162	0,0146	0,0773	-0,1560	0,0767	0,2327
	Rec	28	-0,01864	0,00700	0,03702	-0,14300	0,07700	0,22000

Anàlisi de variància de les mides exteriors respecte l'orientació ( $\alpha = 0,05$ ):

Taula Annex 42. Resum de l'anàlisi de variància del diàmetre dels forats respecte l'orientació

Resum del model	
p-valor	0,881
R <sup>2</sup>	0,0004
R <sup>2</sup> ajustada	-

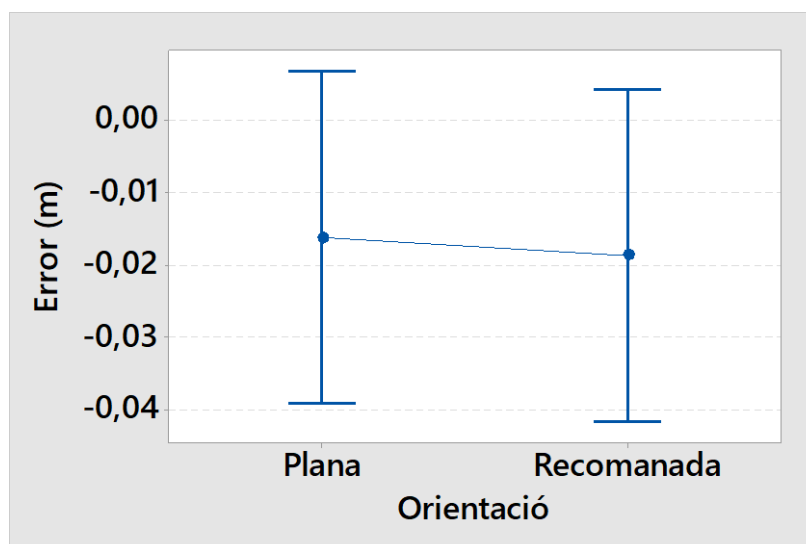


Figura Annex 38. Diagrama d'efectes principals de l'error de diàmetre dels forats respecte l'orientació (Font pròpia)

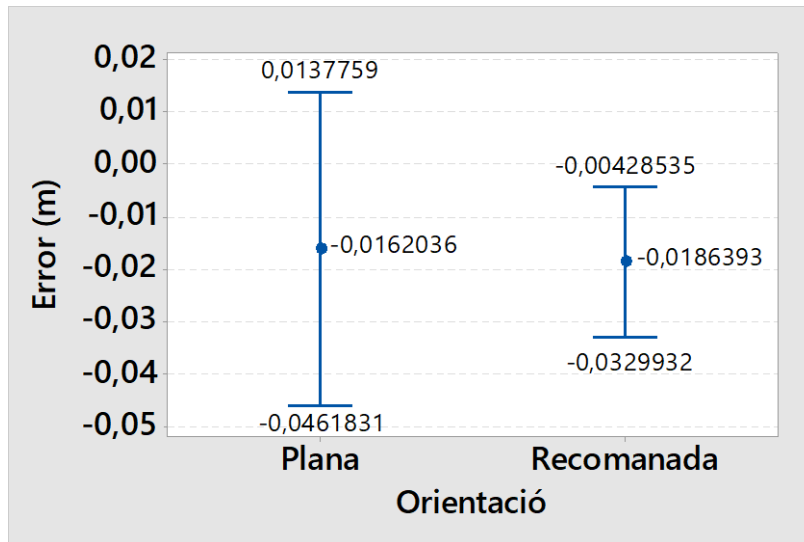


Figura Annex 39. Diagrama d'interval de confiança de l'error de diàmetre dels forats respecte l'orientació (Font pròpia)

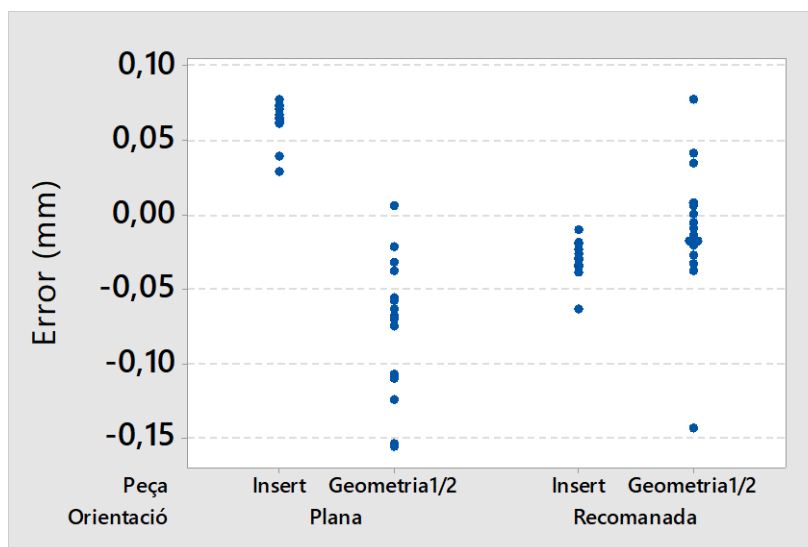


Figura Annex 40. Valors de l'error de les mesures de diàmetre dels dos estudis segons l'orientació (Font pròpia)

## Annex E. ESTAT D'AMIDAMENTS

En aquest annex es detalla d'estat d'amidaments del motlle d'injecció del present projecte. Tot i no haver arribat a la fabricació de les peces, s'han detallat els diferents elements tant de compra com de fabricació pròpia que calen per fabricar el conjunt de motlle amb l'insert de FA.

### E.1 Peces de compra

Taula Annex 43. Peces de compra

<b>Conjunt motlle d'injecció</b>			
<b>Descripció</b>	<b>Referencia</b>	<b>U<sup>3</sup></b>	<b>Q<sup>4</sup></b>
Cargol allen DIN912	M5x14	u	4
Cargol allen DIN912	M6x30	u	4
Cargol allen DIN912	M6x18	u	4
Cargol allen DIN7991	M4x12	u	6
Volandera DIN 125A	M6	u	4
Coixinet lineal de columna	HASCO Z10 27x9	u	4

### E.2 Peces de fabricació

Taula Annex 44. Insert FA 2 cavitats

<b>Nom</b>	<b>Material</b>	<b>Descripció</b>	<b>U</b>	<b>Q</b>
Insert FA 2 cavitats	Resina fotopolimèrica	Resina Formlabs High-TempV1	ml	43,65
<b>Operacions realitzades</b>				
Disseny conceptual	Esquematitzar la geometria de la peça		h	0,05
Disseny CAD	Desenvolupament de la geometria de la peça amb SolidWorks 2018		h	1
Parametritzar software PreForm	Llançar l'arxiu al software PreForm on es simula i s'ajusta la fabricació per impressió 3D		h	0,1
Fabricació	Control i supervisió del procés de creació de la peça		h	8,5

<sup>3</sup> Unitat de mesura

<sup>4</sup> Quantitat



Neteja	Neteja de la peça amb alcohol isopropílic dins de cubeta. Esclarit final amb aigua	h	0,25
Curat	Curat amb la màquina Form Cure (30min a 60°C)	h	0,5
Verificació i assaig	Comprovació de les característiques físiques i geomètriques	h	0,25

Taula Annex 45. Marc exterior de l'insert

Nom	Material	Descripció	U	Q
Marc exterior de l'insert	Acer 1.2312	-	kg	≈1,48
<b>Operacions realitzades</b>				
Disseny a mà alçada	Esquematitzar la geometria de la peça		h	0,1
Disseny CAD	Desenvolupament la geometria de la peça amb SolidWorks 2018		h	1,5
CAM	Crear el programa de mecanitzat a partir del model CAD i realitzar simulacions del procés		h	1
Fabricació	Control i supervisió del procés de creació de la peça		h	2
Verificació i assaig	Comprovació de les característiques físiques i geomètriques		h	0,5

Taula Annex 46. Placa base

Nom	Material	Descripció	U	Q
Placa base	Acer 1.2312	-	kg	≈1,13
<b>Operacions realitzades</b>				
Disseny a mà alçada	Esquematitzar la geometria de la peça		h	0,1
Disseny CAD	Desenvolupament la geometria de la peça amb SolidWorks 2018		h	0,45
CAM	Crear el programa de mecanitzat a partir del model CAD i realitzar simulacions del procés		h	0,5
Fabricació	Control i supervisió del procés de creació de la peça		h	1
Verificació i assaig	Comprovació de les característiques físiques i geomètriques		h	0,25

Taula Annex 47. Aïllant tèrmic inferior

Nom	Material	Descripció	U	Q
Aïllant tèrmic inferior	Resina sintètica / fibra de vidre	-	kg	≈0,1
<b>Operacions realitzades</b>				
Disseny a mà alçada	Esquematitzar la geometria de la peça		h	0,1
Disseny CAD	Desenvolupament la geometria de la peça amb SolidWorks 2018		h	0,5
CAM	Crear el programa de mecanitzat a partir del model CAD i realitzar simulacions del procés		h	0,5
Fabricació	Control i supervisió del procés de creació de la peça		h	0,5
Verificació i assaig	Comprovació de les característiques físiques i geomètriques		h	0,25

## Annex F. PRESSUPOST

### F.1 Pressupost del motlle

#### Peces de compra

Taula Annex 48. Pressupost peces de compra

Nom	Descripció	U	Q	P Un <sup>5</sup> (€)	Cost (€)
Cargol allen DIN912	M5x14	u	4	0,35	1,40
Cargol allen DIN912	M6x30	u	4	0,22	0,88
Cargol allen DIN912	M6x18	u	4	0,33	1,32
Cargol allen DIN7991	M4x12	u	6	0,27	1,62
Volandera DIN 125A	M6	u	4	0,02	0,08
Coixinet lineal de columna	HASCO Z10 27x9	u	4	3	12
Parcial peces de compra (€)		17,30			

#### Peces de fabricació

Taula Annex 49. Pressupost Insert FA

Nom	Descripció	U	Q	P U (€)	Cost (€)
Insert FA 2 cavitats	Resina fotopolimèrica	ml	43,65	0,19	8,29
<b>Operacions realitzades</b>					
Disseny conceptual		h	0,05	18	0,90
Disseny CAD		h	1	35	35
Parametritzar software PreForm		h	0,1	20	2
Impressió		h	8,5	10	85
Neteja		h	0,25	18	4,50
Curat		h	0,5	20	10
Verificació i assaig		h	0,25	20	5
Parcial peça (€)		150,69			

<sup>5</sup> Preu unitari

Taula Annex 50. Pressupost marc exterior de l'insert

Nom	Material	U	Q	P U (€)	Cost (€)
Marc exterior de l'insert	Acer 1.2312	kg	≈1,48	2	2,96
<b>Operacions realitzades</b>					
Disseny conceptual		h	0,1	18	1,80
Disseny CAD		h	1,5	35	52,50
CAM		h	1	35	35
Fabricació		h	2	50	100
Verificació i assaig		h	0,5	20	5
Parcial peça (€)					197,26

Taula Annex 51. Pressupost placa base

Nom	Descripció	U	Q	P U (€)	Cost (€)
Placa base	Acer 1.2312	kg	≈1,13	2	2,26
<b>Operacions realitzades</b>					
Disseny conceptual		h	0,1	18	1,80
Disseny CAD		h	0,45	35	15,75
CAM		h	0,5	35	17,50
Fabricació		h	1	50	50
Verificació i assaig		h	0,25	20	5
Parcial peça (€)					92,31

Taula Annex 52. Pressupost aïllant tèrmic inferior

Nom	Descripció	U	Q	P U (€)	Cost (€)
Aïllant tèrmic inferior	Resina sintètica / fibra de vidre	kg	≈0,1	1,5	0,15
<b>Operacions realitzades</b>					
Disseny conceptual		h	0,1	18	1,80
Disseny CAD		h	0,5	35	17,50
CAM		h	0,5	35	17,50
Fabricació		h	0,5	50	25
Verificació i assaig		h	0,25	20	5
Parcial peça (€)		66,95			

Taula Annex 53. Pressupost mà d'obra

Mà d'obra	Quantitat (h)	Preu unitari (€/h)	Preu total (€)
Inspecció de les peces	1	20	20
Muntatge del motlle	2	20	40
Proves de funcionament	2	20	40
Parcial mà d'obra (€)	100		

Taula Annex 54. Pressupost parcial motlle

<b>Sub-total motlle (€)</b>	<b>624,51</b>
-----------------------------	---------------

## F.2 Pressupost del projecte

En aquest apartat es detalla el pressupost per l'elaboració d'aquest treball.

### Fabricació de mostres d'estudi.

Taula Annex 55. Pressupost mostres d'estudi

<b>Material: Resina Formlabs Hight Temp V1</b>	<b>Quantitat (ml)</b>	<b>Preu unitari (€/ml)</b>	<b>Preu total (€)</b>
Peces de mostra de l'insert Planes (3u)	18,48	0,19	3,51
Peces de mostra de l'insert Recomanades (4u)	26,36	0,19	5,01
<b>Hores de màquina Form 2 i Form Cure</b>	<b>Quantitat (h)</b>	<b>Preu unitari (€/h)</b>	<b>Preu total (€)</b>
Impressió peces de mostra orientació Plana (3u)	6,5	10	65
Impressió peces de mostra orientació Recomanada (4u)	16	10	160
Curat de les mostres	2	10	20
<b>Mà d'obra</b>	<b>Quantitat (h)</b>	<b>Preu unitari (€/h)</b>	<b>Preu total (€)</b>
Neteja i preparació de les mostres (7u)	4	15	80
Parcial mostres d'estudi (€)	243,52		

### Experimentació i anàlisi de mostres

Taula Annex 56. Pressupost experimentació i anàlisi de mostres

<b>Mà d'obra</b>	<b>Quantitat (h)</b>	<b>Preu unitari (€/h)</b>	<b>Preu total (€)</b>
Experimentació Form 2 i Form Cure	3	20	60
Experimentació EinScan Pro 2X Plus	8	25	200
Inspecció i manipulació del motlle	8	20	160
Anàlisis amb EinScan Pro 2X Plus	8	25	200
Anàlisis amb instruments de contacte (peu de rei, micròmetre i màquina de coordenades)	30	20	600
Parcial experimentació i anàlisi de mostres (€)	1220		

## Redacció i generació del treball

Taula Annex 57. Pressupost redacció i generació del treball

Mà d'obra	Quantitat (h)	Preu unitari (€/h)	Preu total (€)
Recopilació d'informació i consulta d'articles	25	15	375
Tractament de dades analítiques	60	18	1.080
Anàlisi estadístic de dades	15	18	270
Disseny de peces en 3D (Solidworks)	12	35	420
Generació de plànols i documents tècnics	25	35	875
Reunions i seguiment del projecte	25	15	375
Redacció del projecte	80	20	1.600
Parcial redacció i generació del treball (€)	4995		

Taula Annex 58. Parcial projecte

<b>Sub-total Projecte (€)</b>	<b>6.458,52</b>
-------------------------------	-----------------

## F.3 Pressupost total

Taula Annex 59. Pressupost general

<b>Sub-total motlle (€)</b>	<b>624,51</b>
<b>Sub-total Projecte (€)</b>	<b>6.458,52</b>
<b>TOTAL (€)</b>	<b>7.083,03</b>

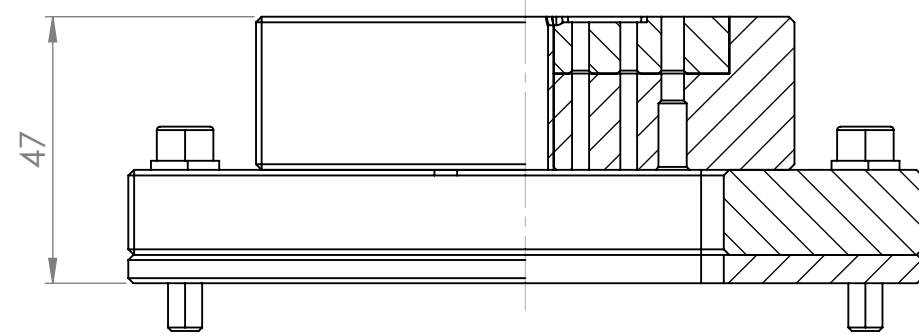
## Annex G. PLÀNOLS

En aquest annex es troben els plànols de conjunt del motlle i de les diferents peces que el formen així com el plànol de les peces de mostra utilitzades en aquest treball.

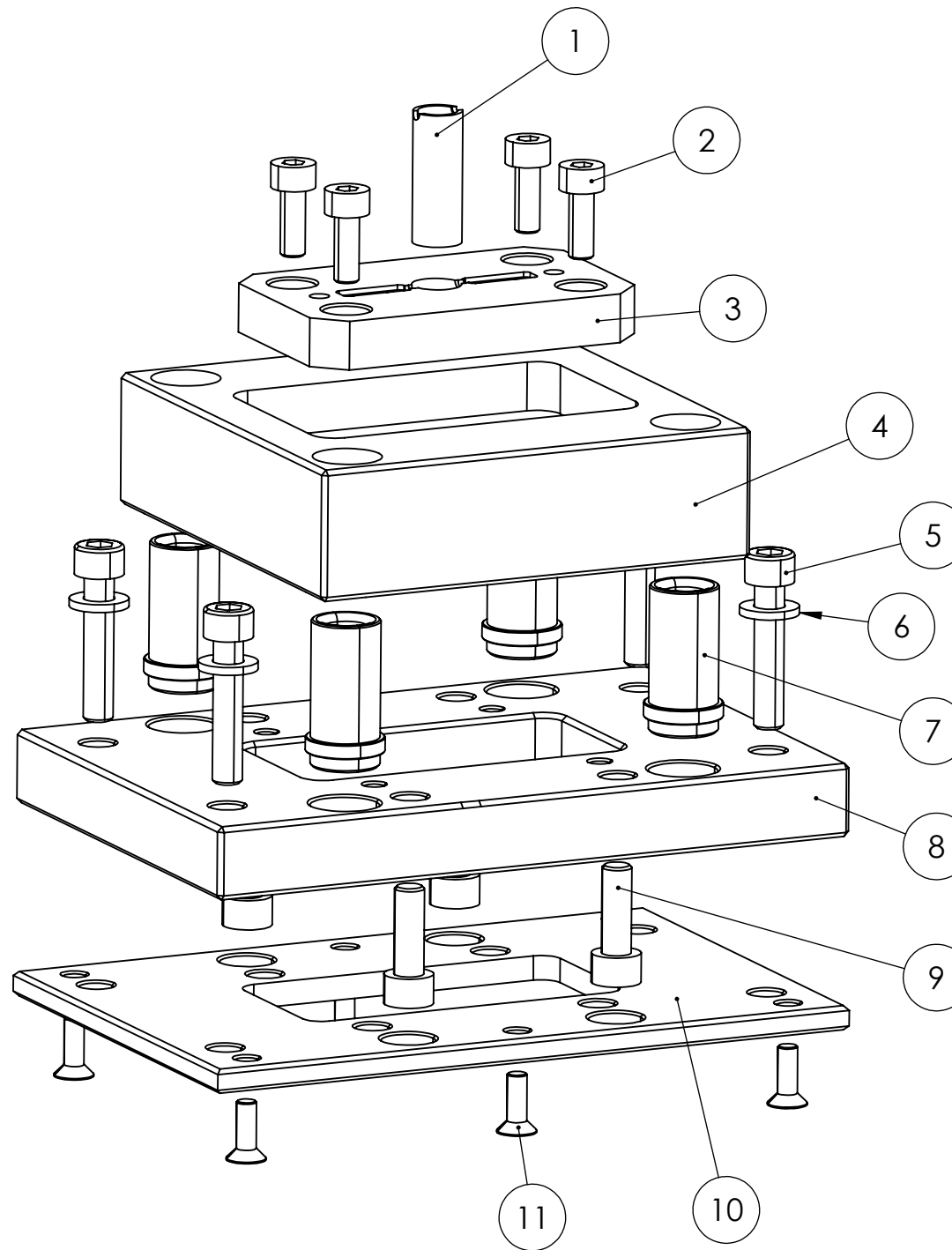
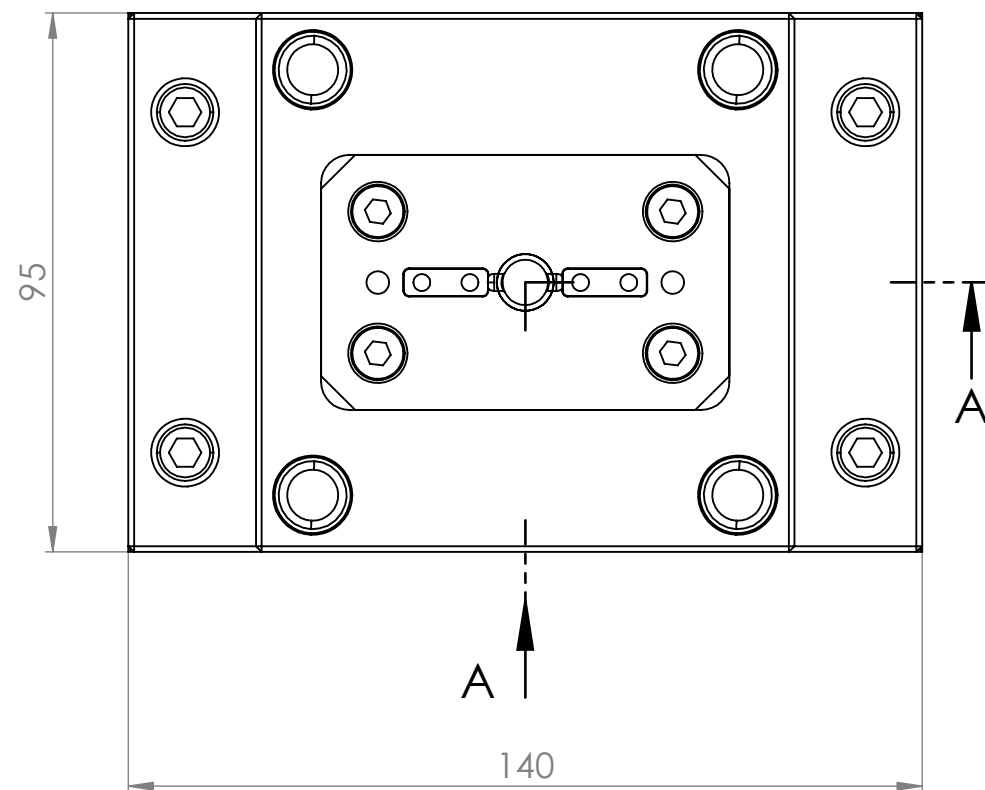
El llistat de plànols és el següent:

- Plànol 1: Conjunt motlle
- Plànol 2: Insert FA 2 cavitats
- Plànol 3: Marc exterior de l'insert
- Plànol 4: Placa base
- Plànol 5: Aïllant tèrmic inferior
- Plànol 6: Peça mostra insert 1 cavitat





SECCIÓ A-A



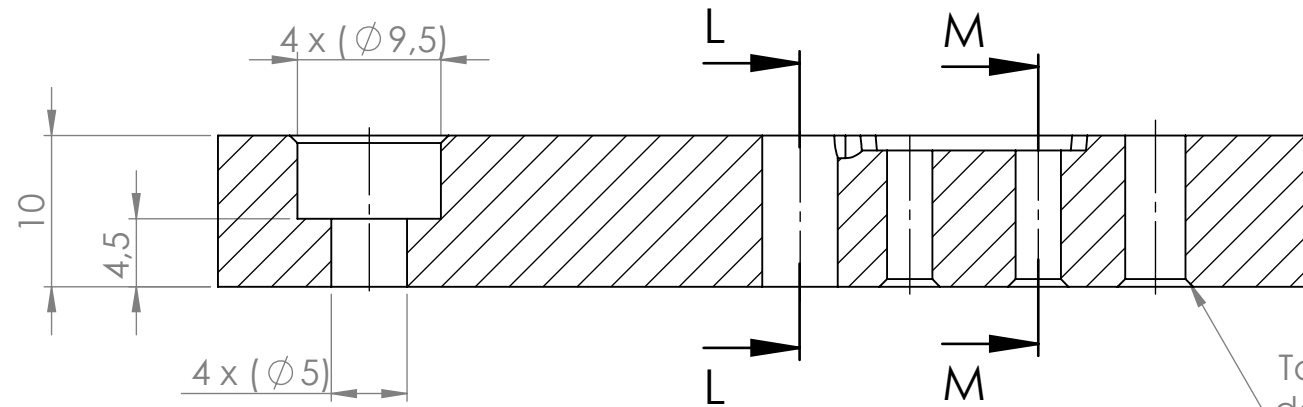
Nº	Quantitat	Descripció	Material
1	1	Insert guia del plunger	
2	4	Cargol allen DIN 912 M5x14	
3	1	Insert FA 2 cavitats	Formlabs High Temp V1 (FLHTAM01)
4	1	Marc exterior de l'insert	Acer 1.2312
5	4	Cargol allen DIN 912 M6x30	
6	4	Volandera DIN 125A M6	
7	4	Coixinet lineal HASCO Z10 27x9	Acer 1.0401
8	1	Placa base	Acer 1.2312
9	4	Cargol allen DIN912 M6x18	
10	1	Aïllant tèrmic inferior	Resina sintètica / fibra de vidre
11	6	Cargol allen avellanat DIN 7991 M4x12	

	Data	Nom	Cognom
Dibuixat	25/05/20	Carles	Sala
Comprov.	26/05/20	Inés	Ferrer
id.s.norm			ISO-UNE



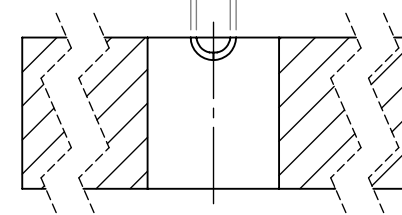
<p>Escala</p> <p><b>3:4</b></p>	<p><b>Conjunt motlle</b></p>	<p><b>Màster en Enginyeria Industrial</b></p> <p><b>Treball Fi de Màster</b></p>
---------------------------------	------------------------------	--

SECCIÓ K-K



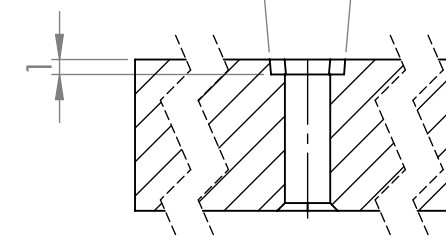
Tots els xamfrans de forat: 0,5 X 45°

3  
2,24

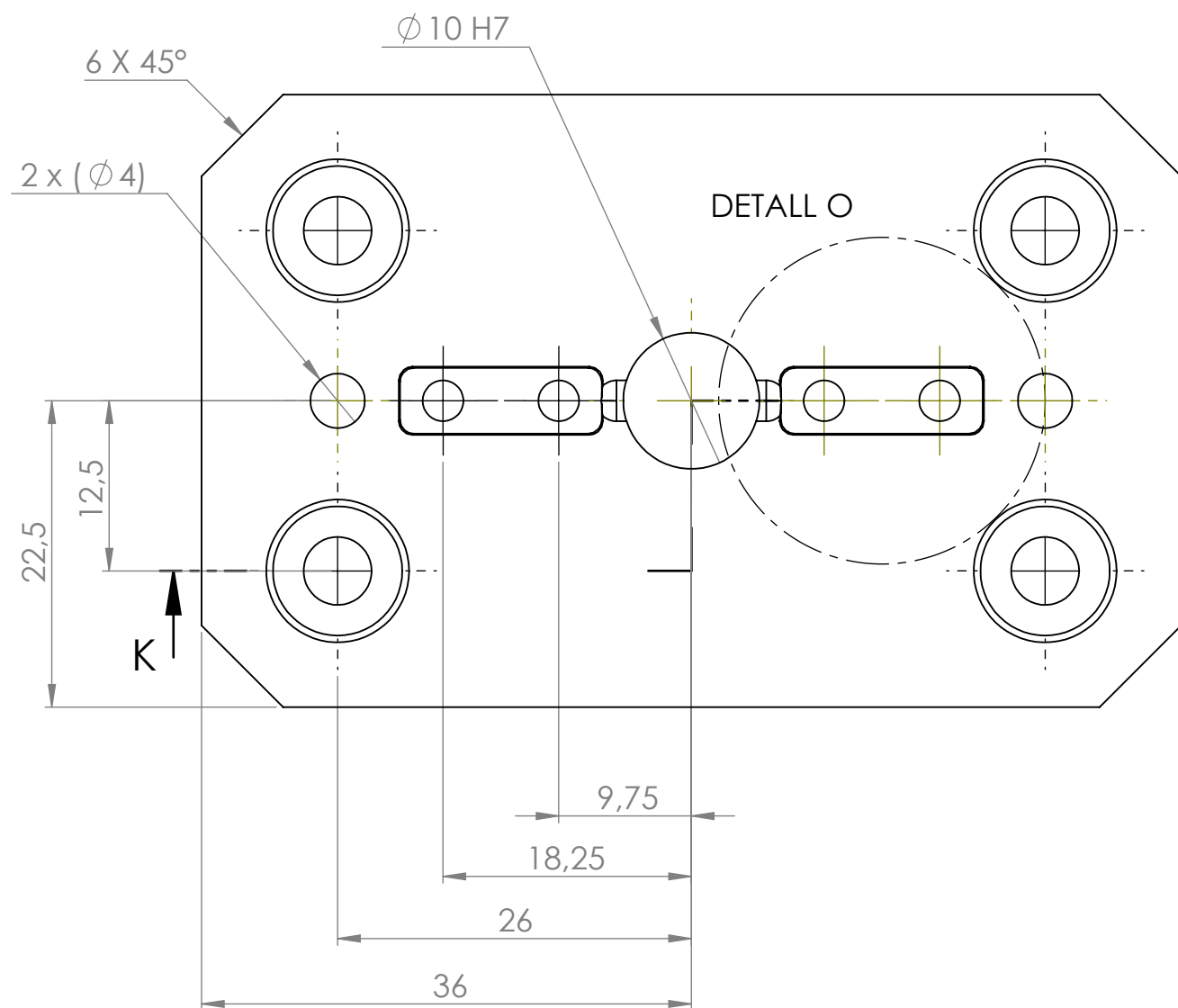


SECCIÓ L-L

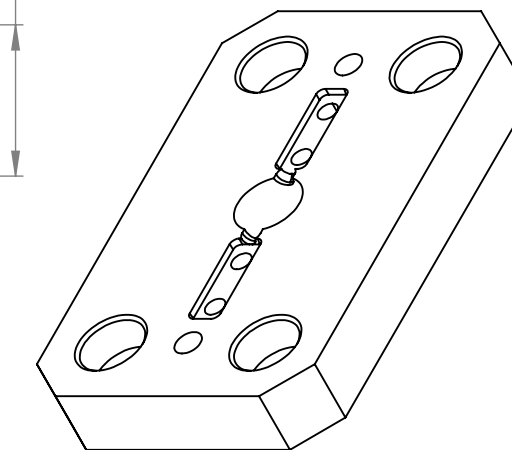
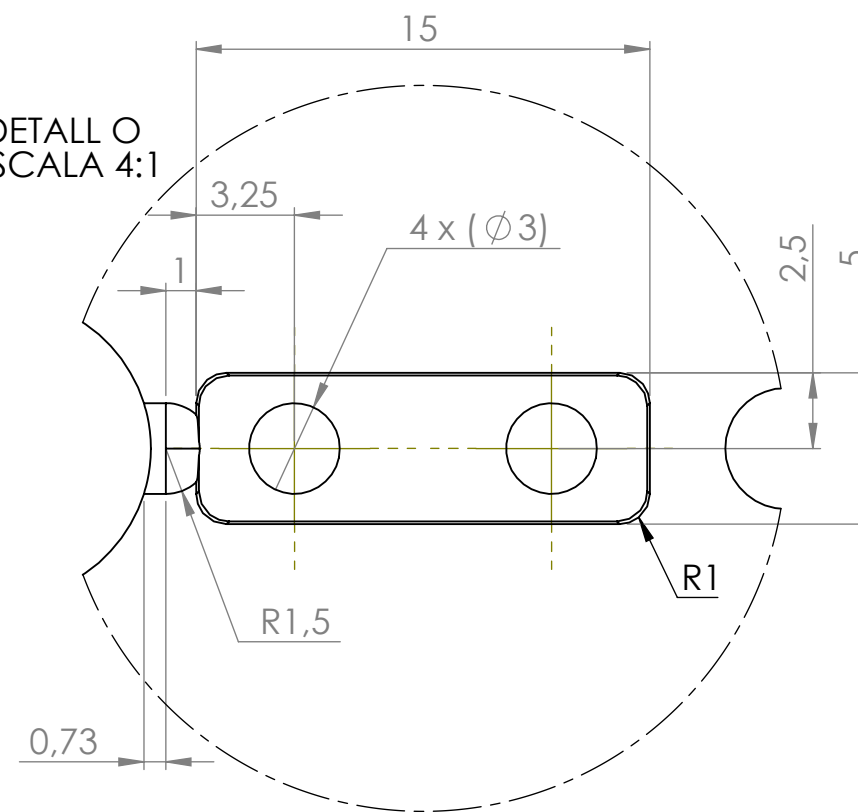
10°



SECCIÓ M-M



DETALL O  
ESCALA 4:1



VISTA ISOMÈTRICA  
ESCALA 1:1

Material: resina Formlabs High Temp V1 (FLHTAM01)  
Cotes sense tolerància: ±0,025 mm

	Data	Nom	Cognom
Dibuixat	25/05/20	Carles	Sala
Comprov.	26/05/20	Inés	Ferrer
id.s.norm			ISO-UNE



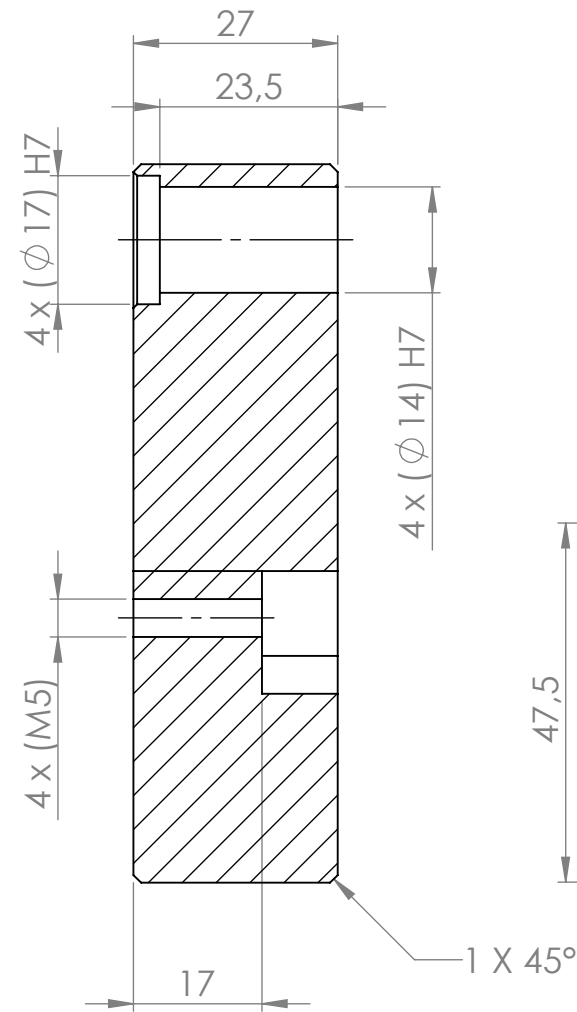
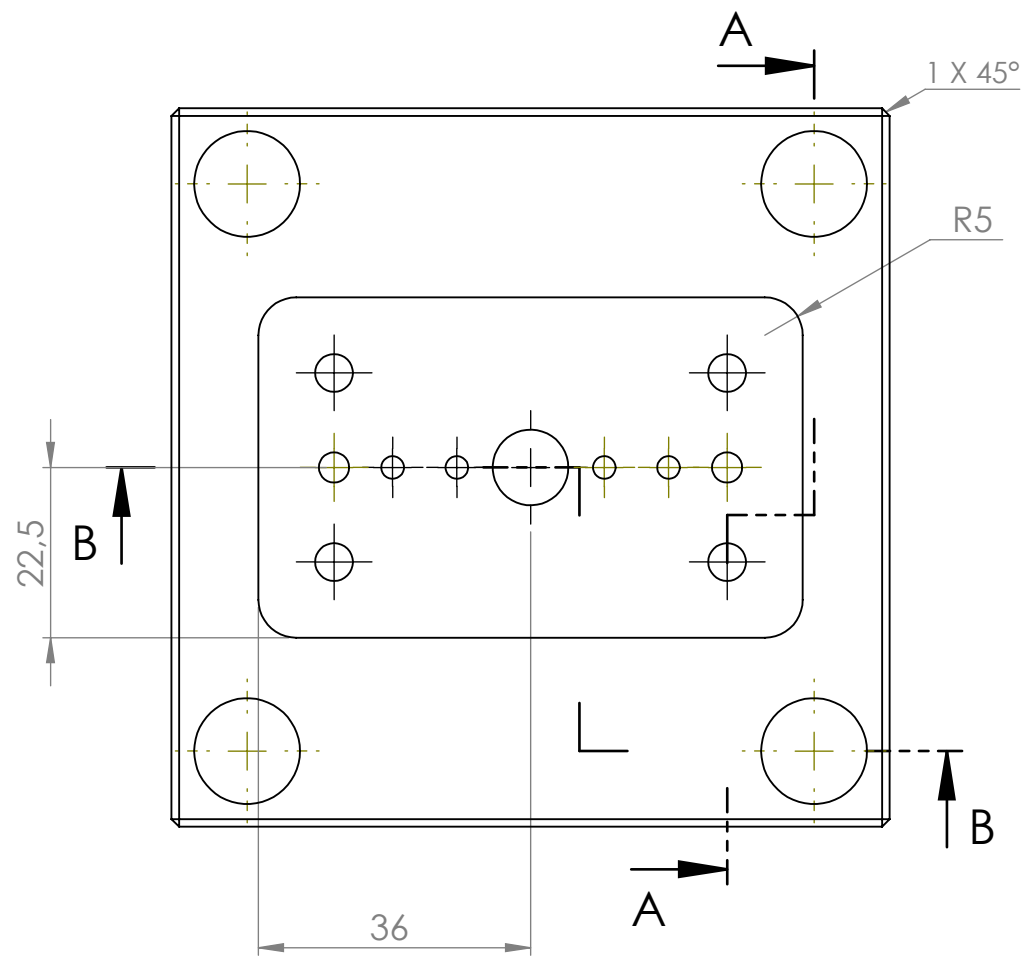
Escala

**2:1**

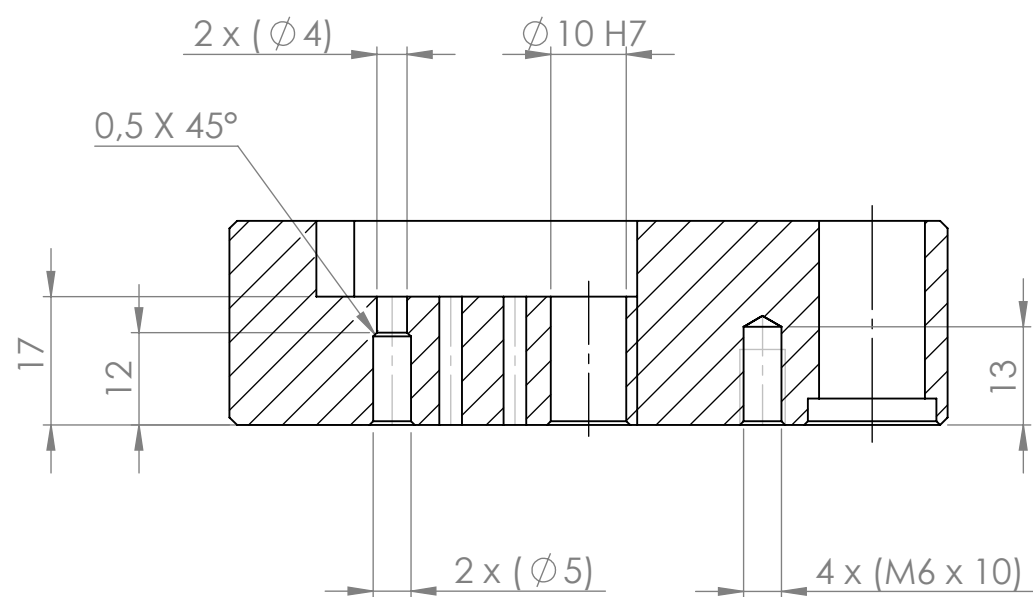
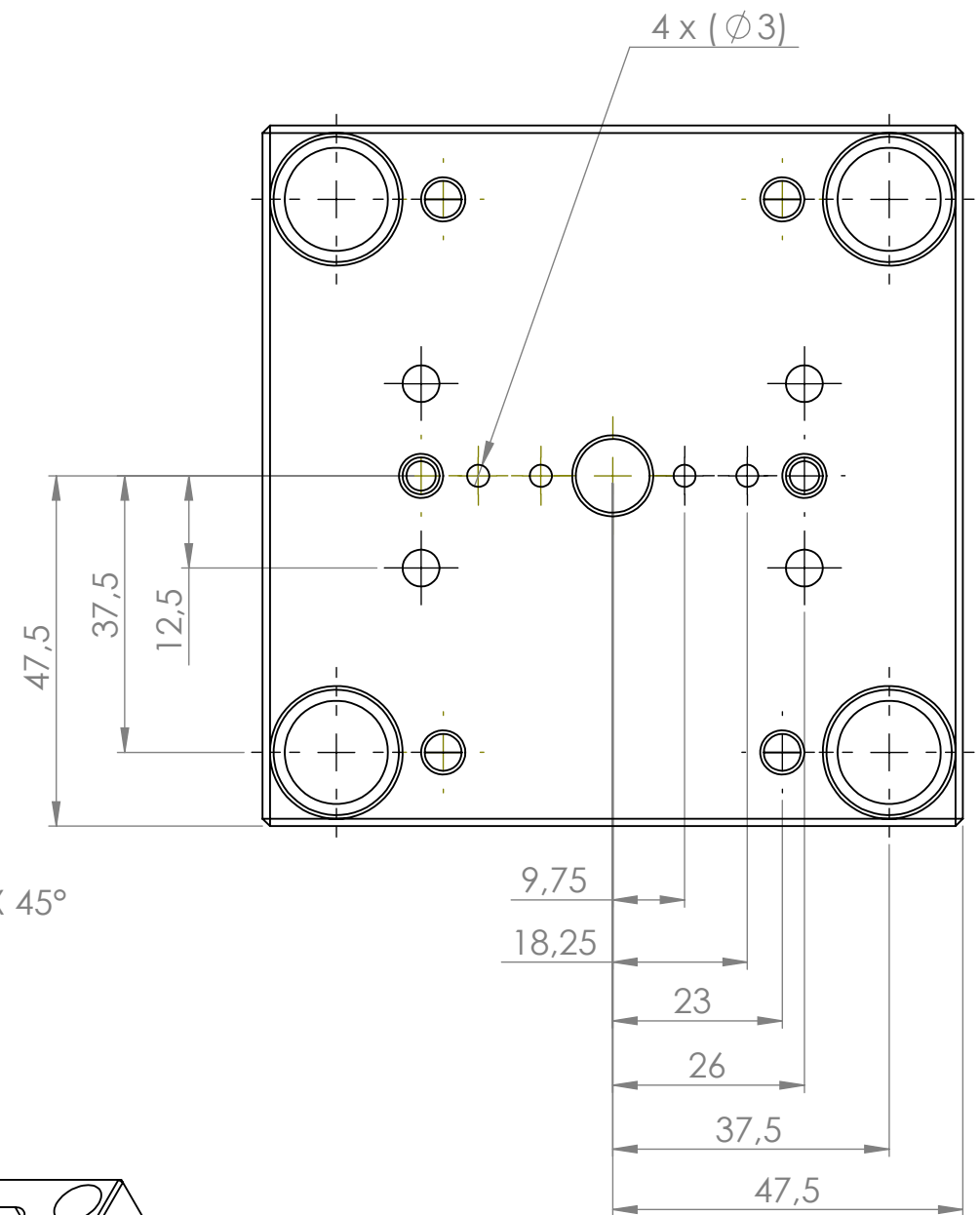
**Insert FA 2 cavitats**

**Màster en Enginyeria Industrial**

**Treball Fi de Màster**

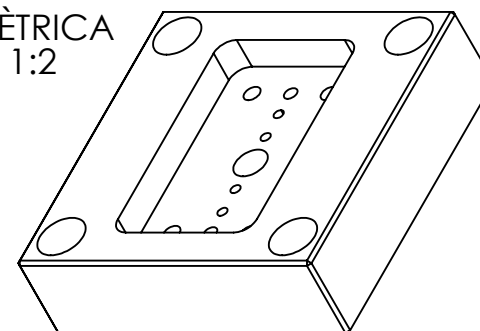


SECCIÓ A-A



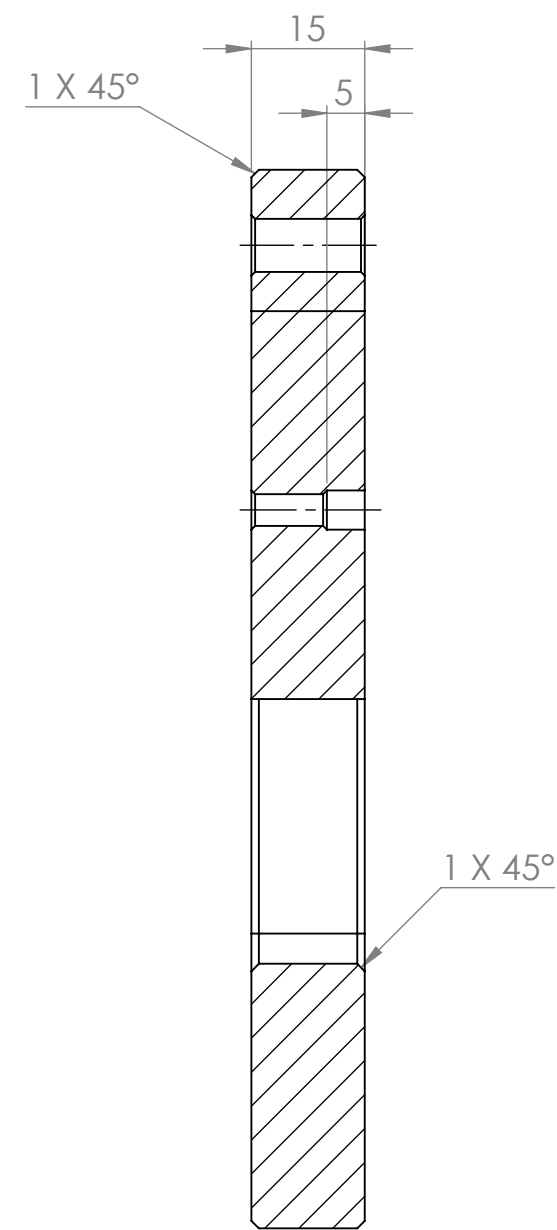
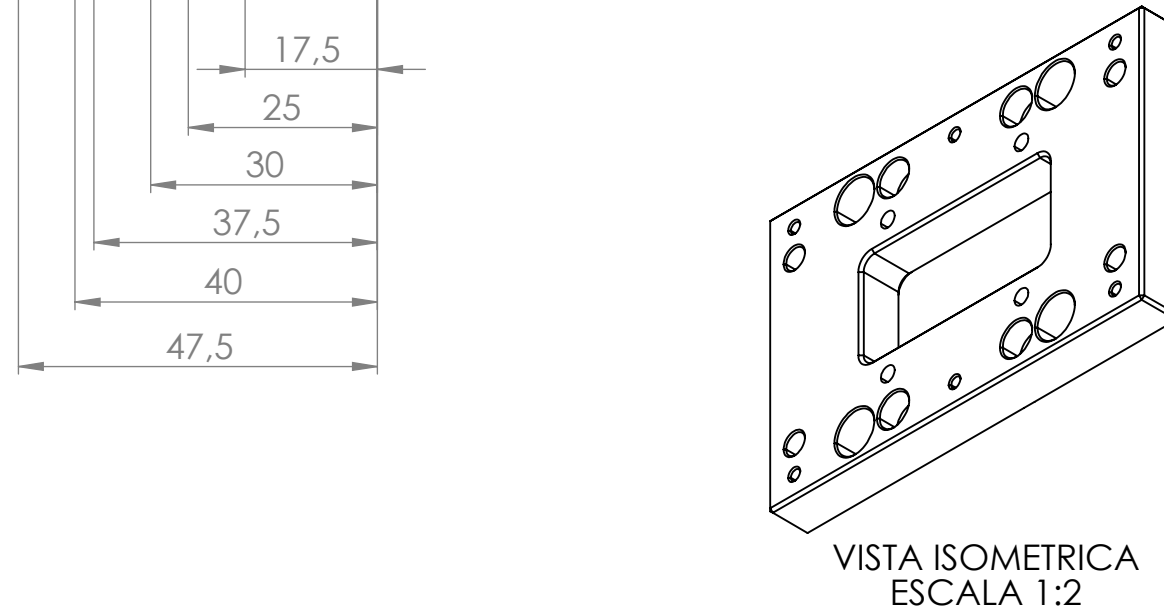
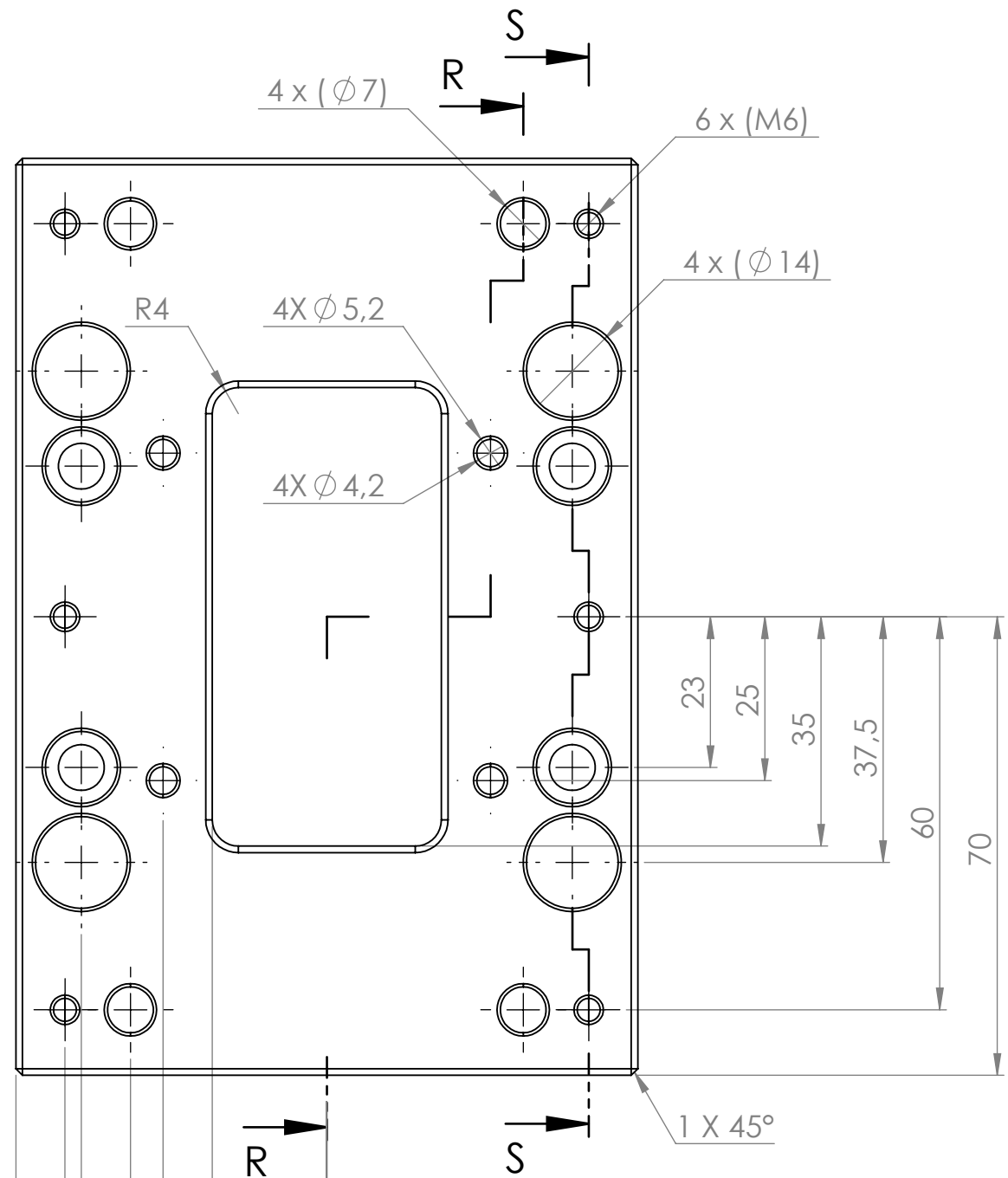
SECCIÓ B-B

VISTA ISOMÈTRICA  
ESCALA 1:2

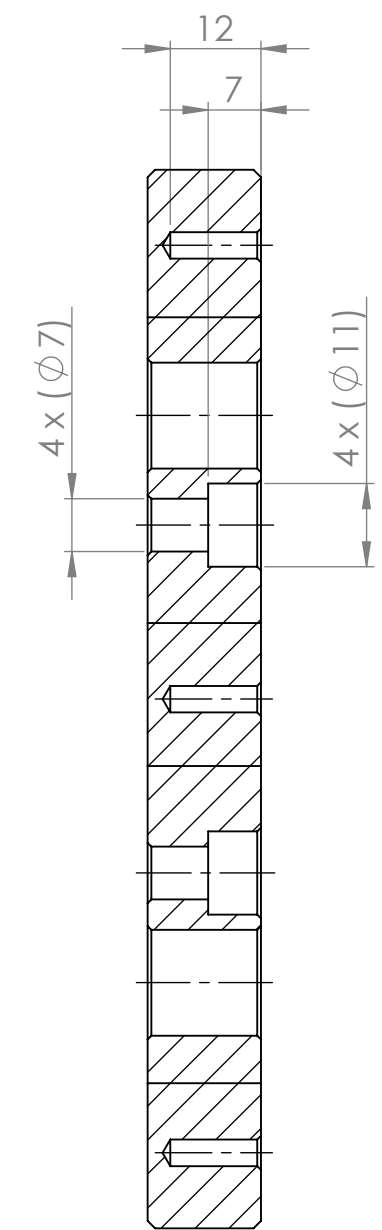


Radis no acotats: 0,5 mm  
 Xamfrans no acotats: 0,5 x 45°  
 Matar les arestes vivies  
 Material: acer 1.2312  
 Cotes sense tolerància segons: UNE-EN 22768-1:1994

	Data	Nom	Cognom	 UdG Escola Politècnica Superior
Dibuixat	25/05/20	Carles	Sala	
Comprov.	26/05/20	Inés	Ferrer	
id.s.norm			ISO-UNE	
Escales	<b>1:1</b>			<b>Màster en Enginyeria Industrial</b>  <b>Treball Fi de Màster</b>
<b>Marc exterior de l'insert</b>				



SECCIÓ R-R



SECCIÓ S-S

Radis no acotats: 0,5 mm  
 Xamfrans no acotats: 0,5 x 45°  
 Matar les arestes vivies  
 Material: acer 1.2312  
 Cotes sense tolerància segons: UNE-EN 22768-1:1994

	Data	Nom	Cognom
Dibuixat	-	Carles	Sala
Comprov.	-	Inés	Ferrer
id.s.norm			ISO-UNE

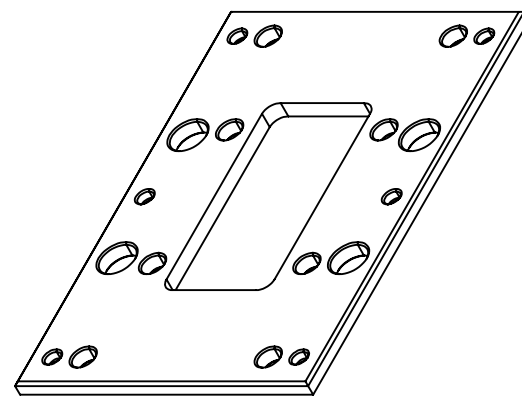
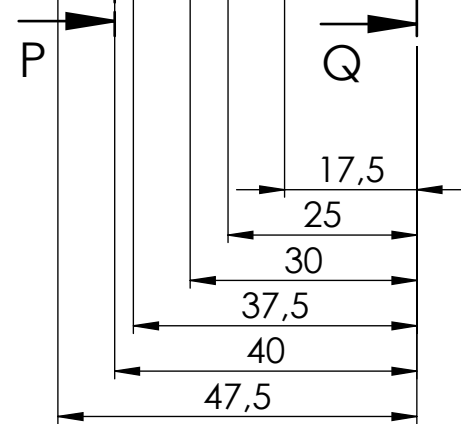
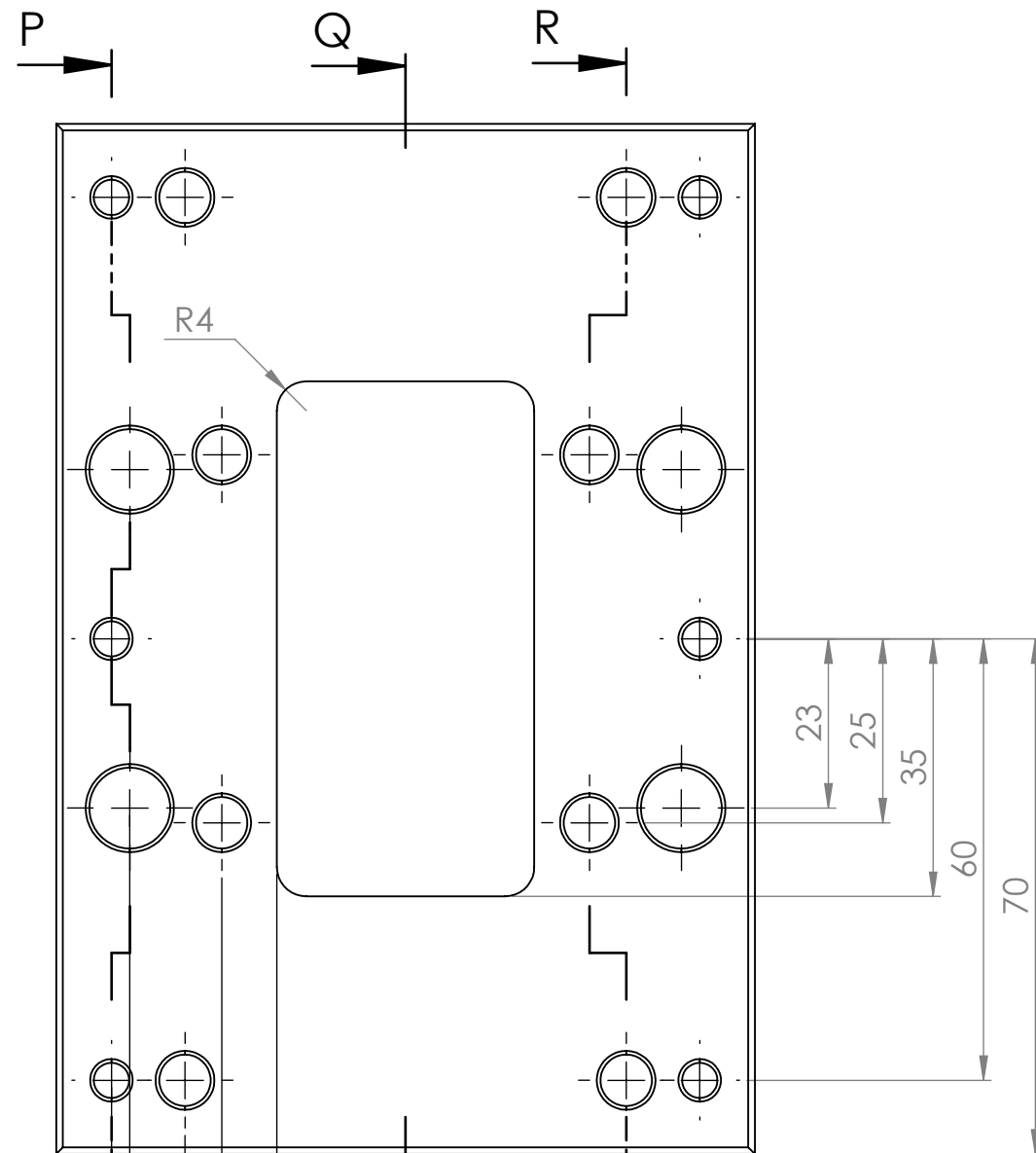


Escales  
**1:1**

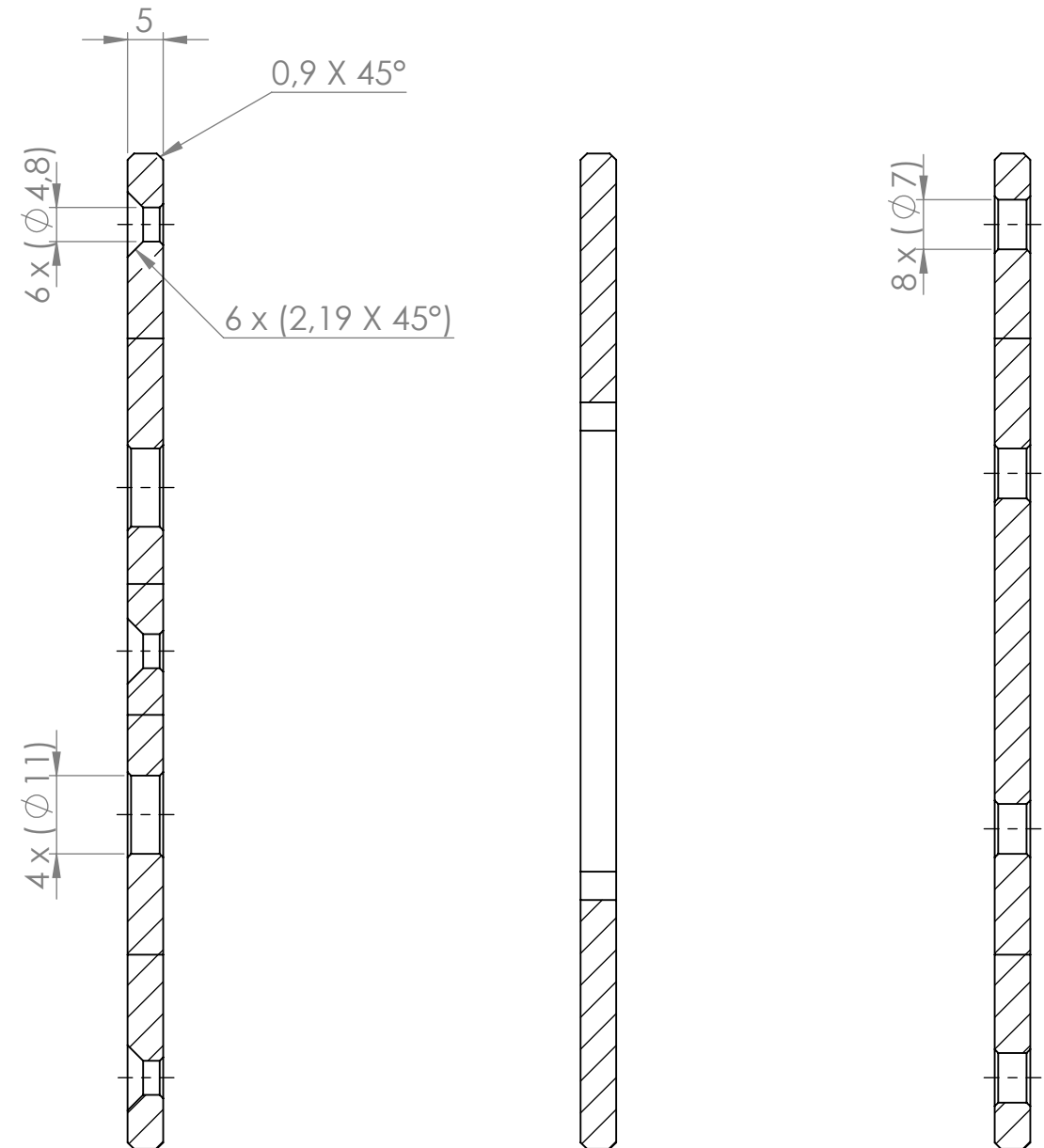
**Placa base**

Màster en Enginyeria Industrial

Treball Fi de Màster



VISTA ISOMÈTRICA  
Escala 1:2



SECCIÓ P-P

SECCIÓ Q-Q

SECCIÓ R-R

Radis no acotats: 0,5 mm  
 Xamfrans no acotats: 0,5 x 45°  
 Matar les arestes vivies  
 Material: resina sintètica / fibra de vidre  
 Cotes sense tolerància segons: UNE-EN 22768-1:1994

	Data	Nom	Cognom
Dibuixat	25/05/20	Carles	Sala
Comprov.	26/05/20	Inés	Ferrer
id.s.norm			ISO-UNE

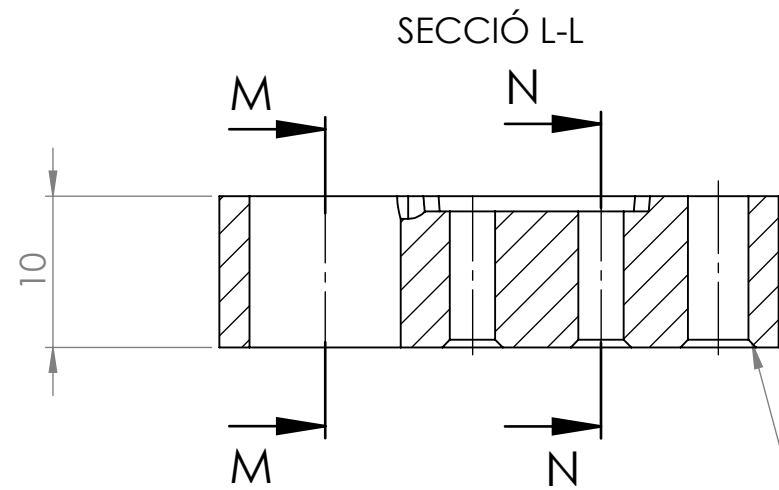


Escola  
**1:1**

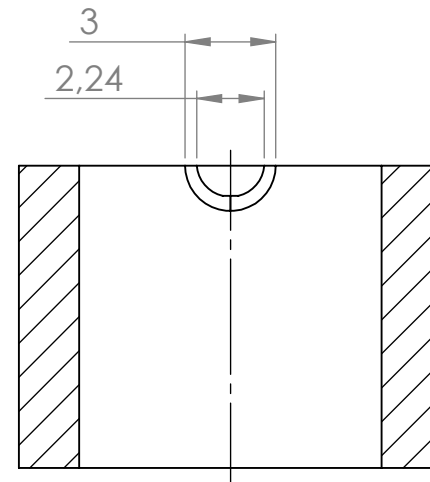
**Aïllant tèrmic inferior**

**Màster en Enginyeria Industrial**

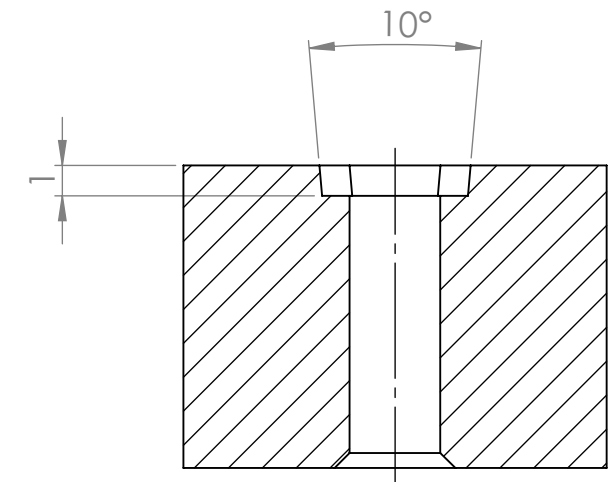
**Treball Fi de Màster**



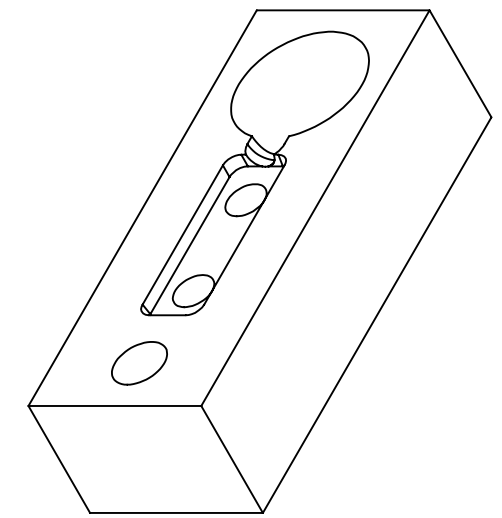
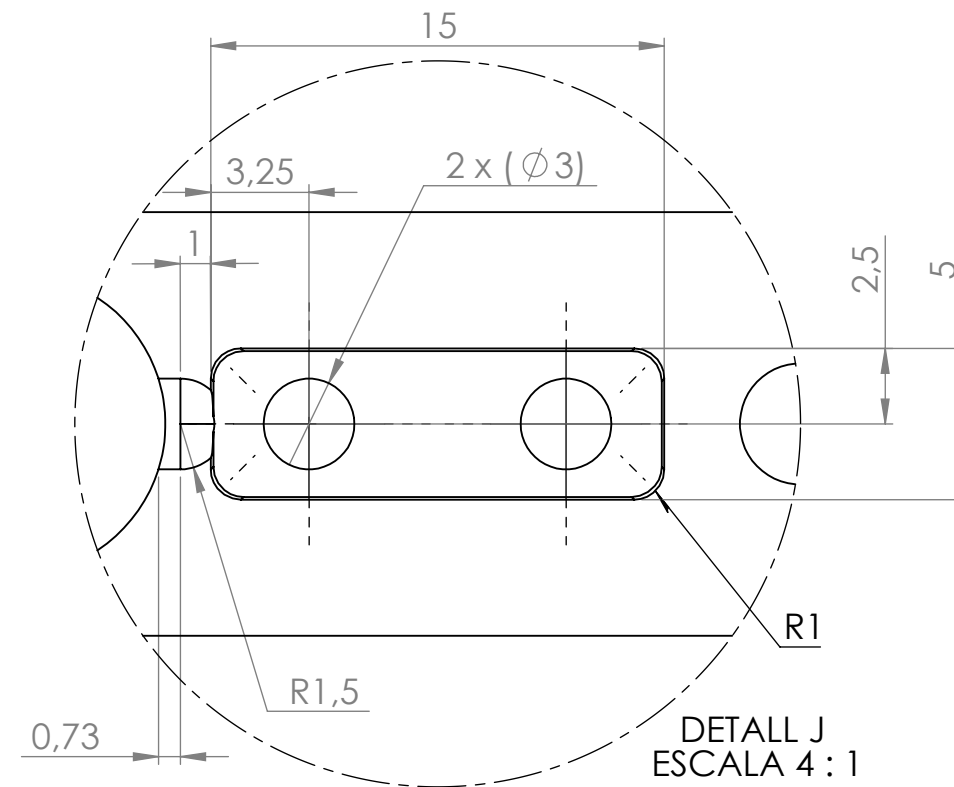
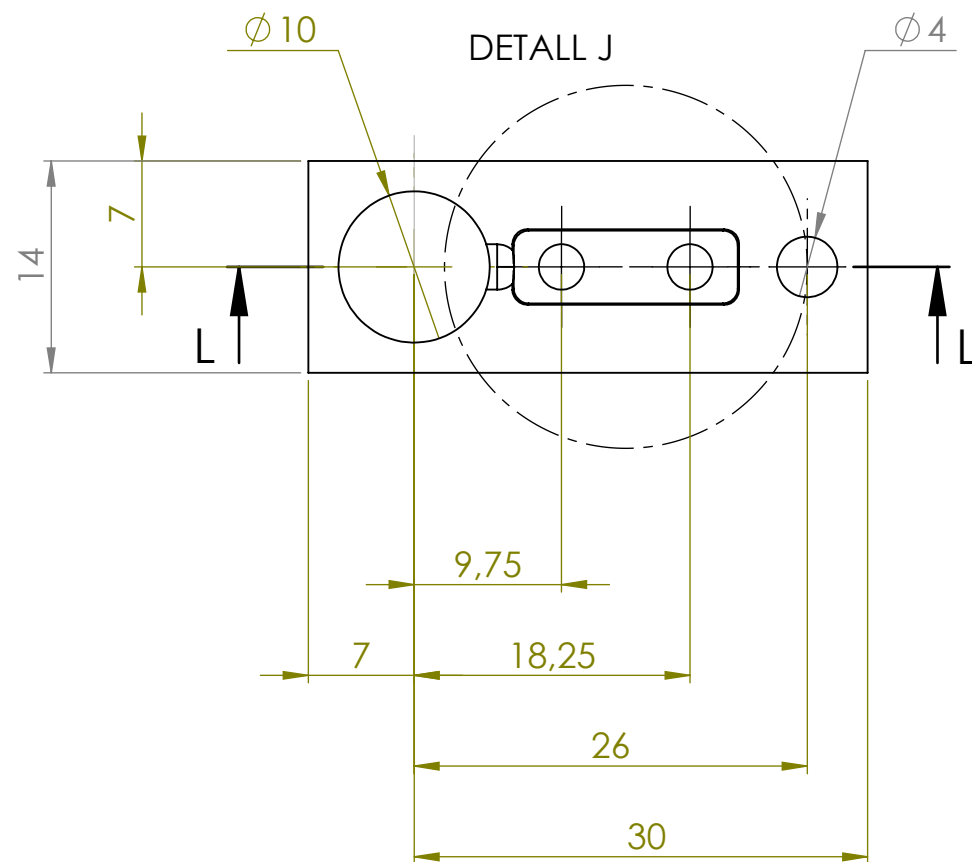
Tots els xamfrans de forat: 0,5 X 45°



SECCIÓ M-M  
ESCALA 4 : 1



SECCIÓ N-N  
ESCALA 4 : 1



VISTA ISOMÈTRICA  
ESCALA 2:1

Material: resina Formlabs High Temp V1 (FLHTAM01)  
Cotes sense tolerància:  $\pm 0,025$  mm

	Data	Nom	Cognom
Dibuixat	25/05/20	Carles	Sala
Comprov.	26/05/20	Inés	Ferrer
id.s.norm			ISO-UNE



Escales  
**2:1**

**Peça mostra insert 1 cav.**

Màster en Enginyeria Industrial

Treball Fi de Màster