

Treball final de grau

Estudi: Grau en Tecnologies Industrials

Títol: Aplicació de polímers biocompatibles en la tecnologia Incremental Sheet Forming (ISF)

Document: Memòria i annexos

Alumne: Marc López Montenegro

Director/tutor: Maria Luisa Garcia-Romeu de Luna

Isabel Bagudanch Frigolé

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació

Convocatòria: Juny/2015

Índex

MEMÒRIA	4
1. Introducció	5
1.1. Antecedents	5
1.2. Objecte	7
1.3. Abast i Especificacions.....	8
2. Experimentació	10
2.1. Geometria	10
2.2. Material	10
2.2.1. PCL.....	11
2.2.2. UHMWPE	10
2.3. Descripció del muntatge experimental.....	11
2.3.1. Màquina	13
2.3.2. Eina.....	14
2.3.3. Sistema de fixació.....	15
2.3.4. Lubricant	16
2.4. Disseny d'experiments (DOE)	16
2.5. Adquisició de dades	18
2.6. Metodologia de l'anàlisi estadístic	21
3. Resultats i discussió.....	23
3.1. UHMWPE.....	23
3.1.1. Alçada.....	27
3.1.2. Força màxima	29
3.1.3. Temperatura màxima.....	31
3.1.4. Rugositat superficial.....	32
3.2. PCL.....	34
3.2.1. Alçada.....	37

3.2.2.	Força màxima	39
3.2.3.	Temperatura màxima	40
3.2.4.	Rugositat superficial.....	41
4.	Resum de l'estudi de costos.....	44
5.	Conclusions	45
5.1.	UHMWPE.....	45
5.2.	PCL.....	46
5.3.	Conclusió general	47
6.	Bibliografia	49
ANNEXOS		51
A.	Anàlisi de les xapes de partida de PCL	52
B.	Observacions de les piràmides	56
B.1	UHMWPE.....	56
B.2	PCL.....	60
C.	Resultats preliminars a l'anàlisi estadístic.....	64
C.1.	UHMWPE.....	64
C.1.1.	Alçada.....	64
C.1.2.	Força màxima	66
C.1.3.	Temperatura màxima	68
C.1.4.	Rugositat superficial.....	70
C.2.	PCL.....	72
C.2.1.	Alçada.....	72
C.2.2.	Força màxima	74
C.2.3.	Temperatura màxima	76
C.2.4.	Rugositat superficial.....	78
D.	Estudi de costos	80
D.1	Introducció	80
D.2	Despeses de material.....	81

D.3	Despeses de mà d'obra	82
D.4	Despeses indirectes	83
D.5	Despesa Total	84

MEMÒRIA

1. Introducció

1.1. Antecedents

El Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció (GREP) estudia, entre d'altres, el procés de deformació incremental de xapa, anomenat en anglès *Incremental Sheet Forming* (ISF). És un procés de fabricació relativament nou i flexible que el fa indicat per a la producció de sèries curtes o productes únics.

Aquest procés productiu consisteix en deformar progressivament xapes de certs materials fins que assoleixen la forma desitjada. Per poder realitzar-lo és necessària la utilització d'un utillatge específic:

- **Eina:** És, generalment, l'única part mòbil del conjunt i s'encarrega de seguir la trajectòria introduïda a la màquina de control numèric. A mesura que la va traçant, va deformant el material fins que s'arriba a una condició de fi com pot ser la finalització de la peça, la ruptura del material, entre d'altres. L'eina està definida per diferents paràmetres de funcionament que són interessants d'estudiar com per exemple les dimensions, el tipus de punta la trajectòria que segueix, etc.
- **Xapa:** Material en forma de làmina que serà deformat per l'eina. Sempre es manté estàtica gràcies a un sistema de fixació que conté la màquina.
- **Sistema de fixació:** Fixa la xapa per tal que aquesta no es mogui i facilitar així el procés de deformació.
- **Màquina de control numèric:** Es poden utilitzar màquines de control numèric adaptades, màquines específiques per a l'ISF, etc.

L'ISF té dues variants que permeten obtenir la geometria objectiu: *Single Point Incremental Forming* (SPIF) i *Two Point Incremental Forming* (TPIF). Aquestes dues es diferencien principalment per els punts de contacte que experimenta la xapa.

Tal i com diuen els corresponents noms, el tipus SPIF només té un únic punt de contacte i aquest es troba entre l'eina i la xapa. Aquesta no troba cap oposició per la part inferior, per això la seva deformació és "lliure" i només depèn de l'eina. Aquesta primera variant és la més estudiada i la més simple de les dues però amb l'inconvenient que presenta la recuperació elàstica (en anglès *Springback*).

D'altra banda, en el tipus TPIF, apareix contacte entre l'eina i la xapa (de manera igual al SPIF) i també entre la xapa i una matriu col·locada a la part inferior. Aplicant el TPIF s'aconsegueixen una millor precisió però necessita la construcció d'un motlle. La Figura 1.1 mostra aquests exemples de deformació a l'aire i amb matriu positiva.

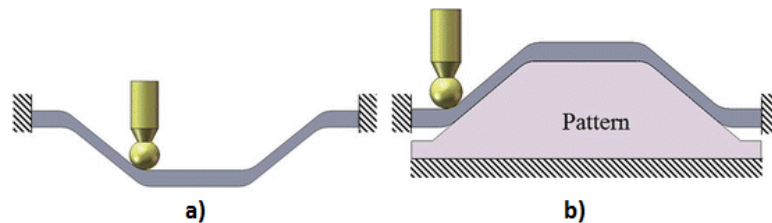


Figura 1.1 Variants de l'ISF: a) SPIF b) TPIF amb matriu positiva (Venkata Reddy et al., 2014)

Un dels aspectes més interessants de l'estudi de l'ISF és la utilització de diferents materials de xapa. Els més estudiats fins ara són els materials metàl·lics tals com acers inoxidables, aliatges d'alumini com l'AA1050 per exemple (Aerens et al., 2010), entre d'altres. Aquests dos exemples de metalls es deformen molt bé en fred però n'hi ha d'altres, com els aliatges de magnesi (Ambrogio et al., 2008) o titani (Fiorentino et al., 2012), presenten el desavantatge que necessiten una alta temperatura per poder-se deformar correctament.

Actualment s'està ampliant l'estudi de l'aplicació de materials polimèrics en el procés de deformació incremental de xapa. Una de les característiques d'aquests materials és que la gran majoria es deformen fàcilment a temperatura ambient. El fet de treballar a temperatures ambientals suposa un estalvi energètic ja que no s'ha d'aplicar calor a la peça o a la cambra de treball. Per contra, s'experimenta una major recuperació elàstica en aquest tipus de materials i les peces fabricades no són tant exactes com en el cas dels metalls. Dos polímers que s'utilitzen sovint són el Policlorur de vinil (PVC) i el Policarbonat (PC).

El primer treball de recerca que va demostrar que l'aplicació de materials termoplàstics amb la tecnologia ISF era viable va ser realitzat per Franzen et al. (2008). L'article es centrava en l'aplicació de PVC i es va comprovar que els polímers es comportaven d'una manera diferent: apareixien esquerdes, arrugues, trencaven de diferent manera, etc. mentre que en els metalls això no passava. Altres autors (Le et al., 2008) van experimentar amb el Polipropilè (PP) també emprant la tècnica SPIF. Es va estudiar com afectaven diversos paràmetres de procés en la formabilitat (capacitat de deformar) de la peça. Davarpanah et al. (2015) van experimentar amb *Poly(lactic acid)*, un material polimèric biocompatible per tal de determinar la formabilitat d'aquest per a

diferents paràmetres de procés com ara la velocitat de rotació i la profunditat de passada.

Bagudanch et al. (2015) van experimentar amb materials polimèrics per veure com variava la força màxima de deformació i observar l'efecte de la velocitat de rotació en la formabilitat d'aquest tipus de materials. Es va demostrar que aquesta velocitat disminuïa la força màxima de deformació i que l'altura màxima de la peça realitzada era major. Això indicava que la formabilitat de la xapa havia augmentat.

Un dels sectors amb més potencial per aquesta tecnologia és la biomedicina. El principal motiu és que aquest procés de fabricació permet fer peces úniques personalitzades a un cost raonable. Els materials idonis per l'aplicació en el camp de la biomedicina són aquells que tenen la capacitat d'implantar-se en medis biològics (éssers humans, animals, etc.) sense alterar el comportament d'aquests. Aquesta propietat és la biocompatibilitat i els materials que la posseeixen s'anomenen materials biocompatibles o biomaterials. Un exemple d'un metall biocompatible és el titani tot i que gairebé no s'utilitza en aquest tipus de deformació perquè és molt difícil de deformar a temperatura ambient.

També existeixen biomaterials polimèrics, com per exemple la Policaprolactona, que són els que s'estudiaran en aquest treball final de grau. L'objectiu principal de la utilització d'aquest tipus de materials és la producció de pròtesis o implants.

Uns exemples d'aquestes aplicacions són la pròtesi de turmell de Ambrogio et al. (2005), l'implant cranial de Duflou et al. (2005), l'implant de paladar de Tanaka et al. (2007) i una part d'un implant de genoll de Oleksik et al. (2010). Tot i que el darrer article és relativament recent, tots aquests exemples s'han realitzat amb metalls.

La informació que es té sobre els materials polimèrics biocompatibles és més escassa encara que la dels polímers tradicionals i això dificulta la comprensió del comportament i de les propietats d'aquests. És per aquest motiu que el treball s'emmarca dins d'aquest àmbit.

1.2. Objecte

L'objectiu d'aquest treball consisteix en demostrar la viabilitat d'utilitzar polímers biocompatibles en SPIF, aportant nou coneixement respecte el comportament d'aquests materials quan es sotmeten a un procés de deformació en fred. També es determinaran els millors paràmetres de procés i s'identificaran possibles limitacions en quant a l'ús d'aquest tipus de materials.

1.3. Abast i Especificacions

Per assolir l'objectiu del present treball s'utilitzaran dos polímers biocompatibles, PCL (policaprolactona) i UHMWPE (polietilè d'ultra alt pes molecular).

Es proposarà un disseny d'experiments tipus Box-Behnken variant els paràmetres de procés més habituals, tals com velocitat de rotació, velocitat d'avanç o profunditat de passada. Els resultats que s'analitzaran seran:

- Forces de conformat
- Temperatures de treball
- Alçada máxima aconseguida (indicador de formabilitat)
- Rugositat superficial

Les especificacions d'aquest treball final de grau es poden agrupar en diferents categories. Per tal de poder-les comentar més detalladament s'ha construït la taula sdfs que conté diferents especificacions, separades per les categories esmentades, i una columna que indica si l'especificació és requerida (R) o complementària (C). Aquestes especificacions es mostren a la Taula 1.1.

Taula 1.1 Descripció de les especificacions del treball

Categoria	Descripció	R/C
Objectiu	Demostrar la viabilitat d'utilitzar polímers biocompatibles en <i>Single Point Incremental Forming</i> .	R
Recursos	Centre de mecanitzat Kondia HS-1000 adaptat per a aquesta tecnologia.	R
	Obtenció de dades de força amb la taula dinamomètrica Kistler 9257B.	R
	Prendre imatges de temperatura durant el procés de deformació amb càmera termogràfica IRBIS ImageIR 3300.	R
	Obtenció de dades de rugositats superficials amb el rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV1000.	R
	Dibuix dels perfils de les piràmides fent ús de la màquina de coordenades Mitutoyo model Crysta-Apex C544.	C
Mides	Geometria de les piràmides igual per a cada un dels experiments. Les mides s'especifiquen a l'apartat 2.1. Geometria.	R
	Les mides de les xapes de partida han d'adequar-se al sistema de fixació.	R
Material	Làmines de PCL	R
	Làmines de UHMWPE.	R
	Lubricant Houghton TD-52.	R
	Optimitzar l'ús del lubricant.	C
Eines	Eina de punta esfèrica de 10mm de diàmetre.	R
	Claus angleses i allen pel muntatge del suport i pel canvi de làmina.	R
	Peu de rei per a diverses mesures.	R
Deformació	Obtenir el nombre de peces necessari pel disseny d'experiments sense importar l'ordre en què es fabriquen.	R
	Control continu de la xapa durant el procés de deformació per possibles parades d'emergència.	R
	Repetir els experiments que presentin dades atípiques o gràfiques il·legibles.	R
Resultats	Fer anàlisi estadística ANOVA i construir superfícies de resposta per predir resultats.	R
	Optimitzar els paràmetres de procés.	C
Termini	Lliurament del treball a la convocatòria de Juny de 2015.	R
Costos	Minimitzar el cost del material.	R
Altres	Facilitar l'ordre i la comprensió dels resultats per a una possible ampliació del disseny d'experiments.	R

2. Experimentació

2.1. Geometria

La geometria que es vol aconseguir després d'haver aplicat el procés de deformació SPIF és una piràmide truncada. Ja que no s'han establert unes mides i dimensions estàndard per la geometria desitjada, es poden trobar diferents formats d'aquesta segons cada autor. Una de les característiques més importants que tindrà la piràmide és un angle de paret variable que dependrà de la profunditat, a diferència d'altres geometries que mantenen aquest angle constant. Una altra peculiaritat sobre la geometria d'aquesta és que totes les arestes seran arrodonides. La Figura 2.1 mostra els conceptes descrits anteriorment per tal de facilitar-ne la comprensió.

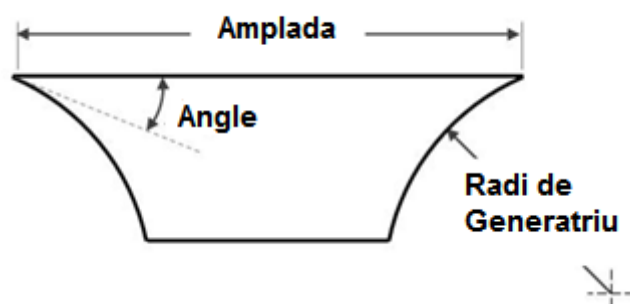


Figura 2.1 Esquema de la geometria de la piràmide

2.2. Material

Com bé diu el títol d'aquest treball, els materials que s'utilitzaran i que, l'estudi dels quals serà de més interès, són els polímers biocompatibles. De tots els materials polimèrics biocompatibles els que s'analitzaran són la Policaprolactona (PCL) i l'"Ultra-High-molecular-weight polyethylene" (UHMWPE).

2.2.1. UHMWPE

Tal i com diu el nom d'aquest polímer, la seva massa molecular és molt elevada, fet que li permet tenir una major resistència als impactes respecte d'altres amb un pes molecular inferior.

Aquest material té una temperatura de fusió propera als 130°C, més del doble que la de la PCL. Si per contra es porta el polímer fins a temperatures properes a -150°C aquest comença a esdevenir trencadís.

Es compon a partir de llargues cadenes de polietilè, totes en la mateixa direcció. La longitud de les molècules és comparable a les que formen el Polietilè d'alta densitat (HDPE) de manera que, les del UHMWPE estan formades per un interval de 100000 a 250000 monòmers, mentre que les del HDPE estan només entre 700 i 1800.

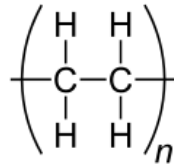


Figura 2.2 Estructura de l'UHMWPE (per a $n \geq 100.000$)

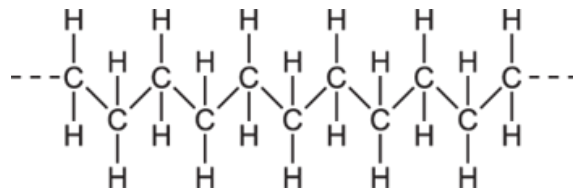


Figura 2.3 Cadena de polietilè per formar UHMWPE

En el cas d'aquest material també es necessita un procés de polimerització per tal d'obtenir el polímer a partir del monòmer.

A diferència de la PCL, totes les xapes d'UHMWPE que s'utilitzen en aquest treball final de grau han estat comprades ja que un comercial les proporciona en forma de làmina. Aquestes han estat fabricades mitjançant la fusió de pols d'aquest polímer.

2.2.2. PCL

És un polièster biocompatible i, a l'hora, biodegradable. La seva baixa temperatura de fusió (al voltant de 60°C) i la seva temperatura de transició vítria (-60°C) són les principals propietats tèrmiques d'aquest material. És un polímer que a temperatura ambient és amorf i amb un comportament tou però, degut a la seva estructura uniforme, cristal·litza amb facilitat i el material es veu reforçat.

S'obté a partir de realitzar un procés de polimerització (procés per agrupar químicament els monòmers) sobre l'anell obert de ϵ -caprolactona amb l'ajut d'un catalitzador. Aquest procés es mostra esquematitzat a la Figura 2.4.

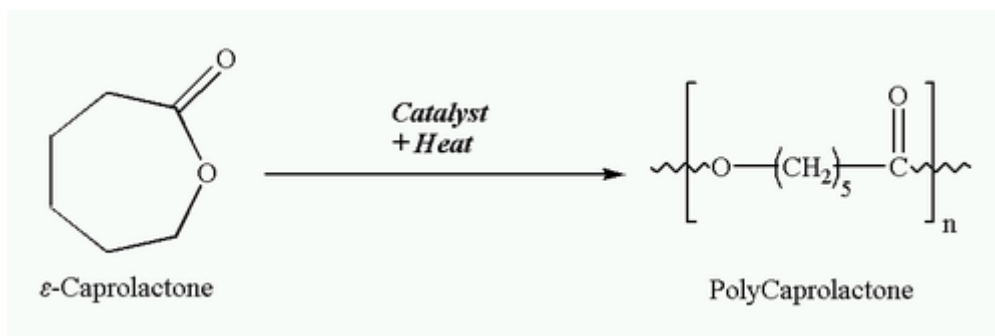


Figura 2.4 Estructura química i procés de polimerització de la PCL

La PCL és utilitzada com a additiu pels polímers, concretament en la fabricació de poliuretans específics. D'altra banda, aquest material polimèric és també utilitzat per a aplicacions biomèdiques gràcies a les seves propietats biocompatibles. Aquestes aplicacions són principalment implants en el cos humà com, per exemple, pròtesis de crani. Aquests implants són possibles gràcies a la lenta degradació que presenta la PCL.

Per poder tenir làmines de PCL per fer l'experimentació ha estat necessària la seva fabricació ja que no s'ha trobat cap proveïdor que proporcionés aquest polímer en forma de xapa.

La fabricació d'aquestes làmines de PCL consta de tres etapes:

- La primera consisteix en dipositar una quantitat de pellets que volti els 60 grams en un motlle de dimensions 150x150x2 mm.
- Seguidament es tanca el motlle i es col·loca a una premsa calefactora. Inicialment la pressió que s'exerceix sobre el motlle és baixa per tal que el material flueixi bé i es reparteixi uniformement al llarg de la cavitat. Llavors s'incrementa la càrrega immediatament fins a una elevada pressió per deixar la peça el millor possible.
- Finalment es deixa refredar la xapa fins a temperatura ambient en una altra premsa que aplica la mateixa càrrega.

Aquest procés de fabricació conté diversos paràmetres que es poden variar com el temps d'estada en les diferents premses, la pressió en cada etapa, etc.

La Figura 2.5 mostra resumidament el procés de producció de les plaques de PCL es necessiten. Conté també imatges de l'utilatge i maquinària necessaris per a la realització i també els paràmetres de procés que s'han utilitzat.

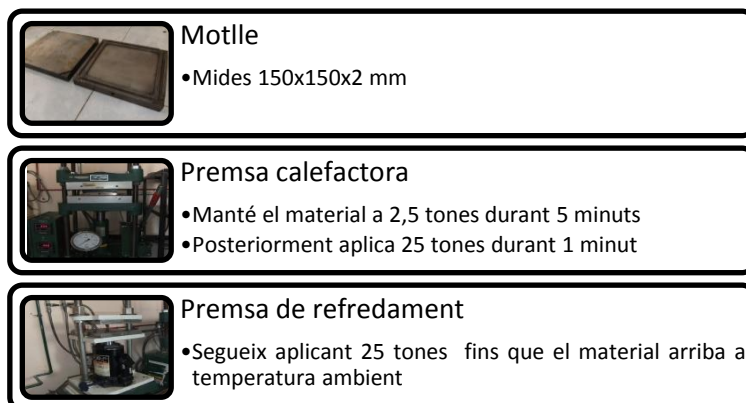


Figura 2.5 Resum del procés de fabricació de les xapes de PCL

2.3. Descripció del muntatge experimental

2.3.1. Màquina

Existeix una gran varietat de maquinària capaç de deformar xapes aplicant la tecnologia ISF. Es poden trobar des de màquines exclusives per a ISF fins a robots industrials o bé centres de mecanitzat per control numèric (CNC).

En el cas d'aquest treball la màquina que s'utilitzarà per dur a terme els diferents experiments és un centre de mecanitzat vertical de la marca Kondia®, model HS-1000. L'única adaptació que necessita aquest centre és un canvi d'eina i un sistema de fixació per mantenir la xapa en la posició correcta.



Figura 2.6 Centre de mecanitzat Kondia® HS-1000 i càmera termogràfica

Per tal de poder fabricar la peça desitjada, que en aquest cas és la piràmide truncada, cal dissenyar i introduir al CNC un codi que contingui la trajectòria que haurà de seguir l'eina.

Abans de començar a generar el codi cal tenir en compte els paràmetres de procés que s'utilitzaran durant l'experimentació. Aquests paràmetres estan agrupats segons el disseny, l'eina i el procés.

- Disseny: La geometria objectiu és la piràmide que s'ha descrit anteriorment, el material és PCL o UHMWPE i amb un espessor de la xapa de 2 mm.
- Eina: L'eina seguirà una trajectòria alternant el sentit horari i antihorari. Els aspectes més importants sobre l'eina es definiran més endavant.
- Procés: El pas incremental que s'utilitzarà consisteix en seguir una profunditat de baixada constant (Δz), a diferència d'altres processos que segueixen una altura de cresta constant (Δh) o bé un increment angular constant ($\Delta\theta$). La profunditat de baixada és un paràmetre que es variarà en el disseny d'experiments i aquesta pren uns valors de 0.20, 0.35 i 0.50 mm. Dos altres factors que intervenen en el procés i que també es variaran en el disseny d'experiments són la velocitat d'avanç del capçal i la velocitat de rotació de l'eina. Aquestes prendran valors de 1500, 2250 i 3000 mm/minut i 0, 1000 i 2000rpm respectivament.

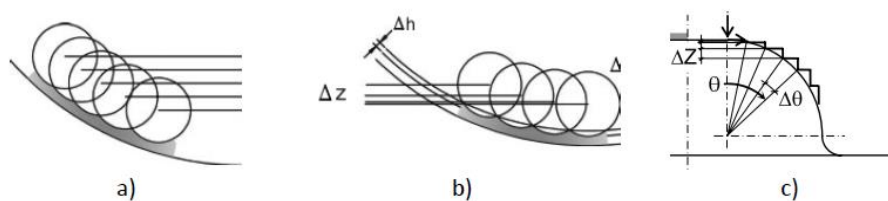


Figura 2.7 Tipus de passos incrementals a) Profunditat de baixada b) Altura de cresta c) Increment angular

Un cop coneguts els paràmetres de procés ja es podrà editar el codi del programa. Posteriorment, per poder obtenir la trajectòria, caldrà executar el codi amb el programa Python per així generar uns arxius que s'introduiran a la màquina CNC.

2.3.2. Eina

Tal i com s'ha comentat anteriorment, l'eina conté un conjunt de paràmetres de procés que es poden variar segons l'experiment que es vulgui realitzar. En el cas d'aquest treball la trajectòria que seguirà aquesta és sempre alternada. El canvi del sentit de la trajectòria es realitza a cada volta per tal que no aparegui l'efecte de la torsió. L'eina també canvia el sentit de rotació a cada volta, per evitar també aquest fenomen, de

manera que quan la trajectòria és en sentit horari, l'eina gira en sentit antihorari i viceversa. D'aquesta manera la peça final s'ajusta molt més a la geometria esperada.

El tipus d'eina que s'utilitzarà és de punta semiesfèrica. El disseny d'experiments que es presentarà més endavant considera un diàmetre de l'eina constant i, que en aquest cas, és igual a 10mm. A la Figura 2.8 es pot apreciar l'aspecte de l'eina que s'ha descrit.



Figura 2.8 Eina de 10 mm de diàmetre

2.3.3. Sistema de fixació

Per tal de poder realitzar correctament el procés de deformació cal que la xapa estigui fixada correctament. Per això és necessari utilitzar un sistema de fixació que va estar dissenyat en un projecte final de carrera anterior (Bagudanch, 2011).

Aquest utilitatge conté uns suports que mantenen la làmina a una altura determinada per tal que, a l'hora de deformar, l'eina mai impacti amb parts del centre de mecanitzat i així poder obtenir la peça amb la geometria desitjada.

Una altra component important és la plataforma de fixació. Aquesta fixa la làmina pels extrems i deixa una superfície lliure per tal que l'eina pugui moure's per deformar. Aquest sistema de fixació es mostra a la Figura 2.9, juntament amb altres components com l'eina.

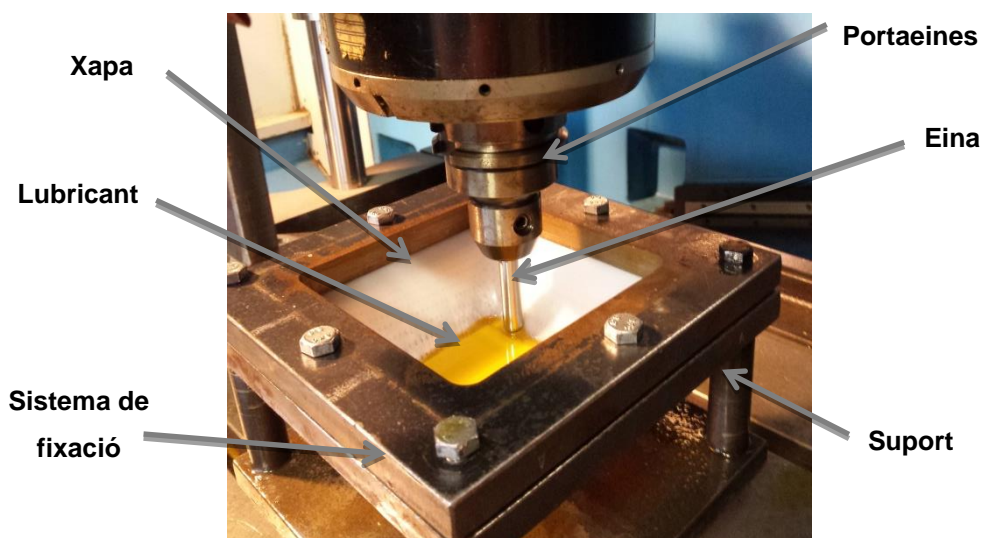


Figura 2.9 Sistema de fixació de xapes per implementar ISF

2.3.4. Lubricant

Per tal de reduir la fricció que apareix en el contacte eina-xapa i l'augment de temperatura que experimenten l'eina i la làmina es poden utilitzar lubricants. Com que els polímers presenten grans canvis en el comportament a altes temperatures és important considerar el fet d'utilitzar lubricants a l'hora de deformar aquest tipus de material.

El lubricant que s'utilitza en tots els experiments, tant amb les xapes de PCL com amb les de UHMWPE, és el Houghton TD-52

Abans d'iniciar la deformació, la xapa es troba coberta per una capa d'aquest lubricant. A mesura que es deforma, aquest es va acumulant a la part més baixa i pot arribar a cobrir parcialment la punta de l'eina. Aquest fet pot causar algun error a l'hora de mesurar la temperatura final de l'eina.

2.4. Disseny d'experiments (DOE)

L'objectiu principal d'aquest disseny d'experiments és conèixer com varien i evolucionen diferents paràmetres de la peça final i del procés de deformació a l'hora de generar una peça utilitzant la tecnologia ISF si s'implementa la variant "Single Point Incremental Forming". Aquests són la força de contacte que apareix entre l'eina i la xapa, la temperatura màxima que assoleix el material, l'alçada màxima de la piràmide i la rugositat superficial mitjana de les parets interiors. Es pretén obtenir un model matemàtic, fent ús d'anàlisis estadístiques, que permetin optimitzar el procés o bé

predir-ne valors. Per tal de portar-ho a terme s'utilitzaran superfícies de resposta i per això cal escollir un disseny d'experiments adequat.

Per començar a construir el disseny d'experiments cal definir els paràmetres que es modificaran. En aquest cas corresponen a: velocitat de rotació, velocitat d'avanç i profunditat de passada. Els diferents valors que prendran aquests paràmetres es mostren a la Taula 2.1.

Taula 2.1 Valors dels diferents paràmetres de procés

Paràmetre	Baix	Mig	Alt
S (velocitat rotació, rpm)	0	1000	2000
F (velocitat avanç, mm/min)	1500	2250	3000
Δz (profunditat passada, mm)	0.2	0.35	0.5

Les inicials S i F corresponen als noms dels paràmetres en anglès: *Spindle speed* i *Feed rate*.

Cal afegir que l'eina gira lliurement degut a la fricció que apareix en el contacte eina-xapa i, per tant, la velocitat de rotació poques vegades serà exactament igual a 0 revolucions per minut.

Matlab utilitza una nomenclatura de manera que els valors baixos prenen el codi -1, els mitjos 0 i els alts 1. El programa permet obtenir totes les combinacions necessàries codificades d'aquesta manera. També cal remarcar que la diferència que hi ha entre els nivells (-1, 0) i (0, 1) ha d'ésser la mateixa.

El tipus de DOE que s'utilitzarà és el "*Box-Behnken*" (BB). El motiu principal de l'elecció és que no necessita tantes simulacions com els "*Central Composite Designs*" per a un nombre de paràmetres igual o inferior a 4 tal i com es mostra a la Figura 2.10. L'altre motiu és que el BB no utilitza els valors límit dels paràmetres fet que, en certs casos, és impossible d'assolir.

TABLE 3.28 Number of Runs Required by Central Composite and Box-Behnken Designs

Number of Factors	Central Composite	Box-Behnken
2	13 (5 center points)	-
3	20 (6 centerpoint runs)	15
4	30 (6 centerpoint runs)	27
5	33 (fractional factorial) or 52 (full factorial)	46
6	54 (fractional factorial) or 91 (full factorial)	54

Figura 2.10 Nombre de simulacions necessàries segons el nombre de paràmetres i el tipus de DOE.
Font: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3363.htm>

Ara que ja s'han definit els paràmetres i s'ha escollit el tipus de disseny d'experiments que s'utilitzarà, fent ús del programa MATLAB es poden obtenir les 15 combinacions de paràmetres necessàries per a obtenir una superfície de resposta. Executant la comanda `>> bbdesign(3)`, MATLAB genera el contingut de la Taula 2.2.

Degut al canvi de la profunditat de passada serà necessari crear 15 programes diferents per obtenir la trajectòria desitjada de l'eina. Tal i com s'ha comentat anteriorment, aquests paràmetres s'introdueixen a un programa, aquest s'executa amb el Python i finalment s'envia la trajectòria a la màquina de CNC.

Taula 2.2 Combinacions dels paràmetres de procés

Experiment	S	F	Δz
1	0	1500	0.35
2	0	3000	0.35
3	2000	1500	0.35
4	2000	3000	0.35
5	0	2250	0.2
6	0	2250	0.5
7	2000	2250	0.2
8	2000	2250	0.5
9	1000	1500	0.2
10	1000	1500	0.5
11	1000	3000	0.5
12	1000	3000	0.5
13	1000	2250	0.35
14	1000	2250	0.35
15	1000	2250	0.35

2.5. Adquisició de dades

Tal i com s'ha comentat anteriorment, aquest treball es focalitzarà en l'anàlisi de la força màxima de deformació, la temperatura màxima que s'assoleix, l'altura màxima de la piràmide fabricada i la rugositat superficial de les parets de l'interior.

El centre de mecanitzat porta instal·lada una taula dinamomètrica de la marca Kistler® del model 9257B que permetrà mesurar les forces que es presenten sobre la xapa quan aquesta és deformada. Una tarja d'adquisició de dades DaqBoard® 505 permetrà obtenir les forces i aquestes seran processades pel programari DaqView 9.0.0. La Figura 2.11 mostra aquesta taula instal·lada a la bancada del centre de mecanitzat.

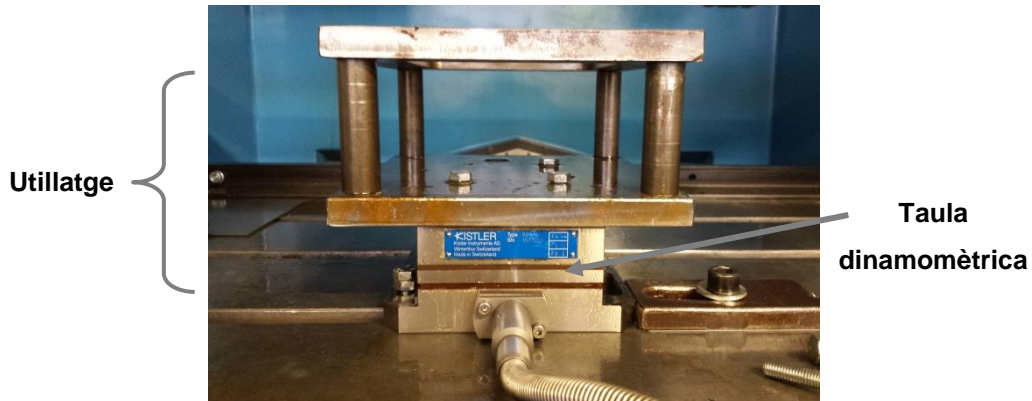


Figura 2.11 Taula dinamomètrica Kistler unida a l'utillatge i a la bancada

La taula i la tarja d'adquisició de dades proporcionen 10 valors de la força de deformació per segon. Un cop ha finalitzat el procés, es recullen totes les dades i fent ús del MATLAB s'obté el valor màxim, que és el que realment interessa.

Per mesurar l'altura màxima, s'utilitzarà el mateix centre de control numèric. La manera d'obtenir aquest valor és llegir directament el valor de Z que mostra la pantalla en el moment que finalitza el procés o, si s'escau, en el moment de la fractura de la peça. Aquest mètode és possible perquè abans d'iniciar la deformació s'ha definit el zero de la màquina on la coordenada Z correspon al punt de contacte amb la xapa.

Una altra magnitud a mesurar és la temperatura màxima que s'assoleix durant el procés de deformació. Per obtenir imatges termogràfiques es fa servir la càmera IRBIS ImageIR 3300. S'ha establert una freqüència d'adquisició de una imatge cada 10 segons i el programa *Irbis 3 Professional* les emmagatzema per tal de poder-les analitzar una per una posteriorment.

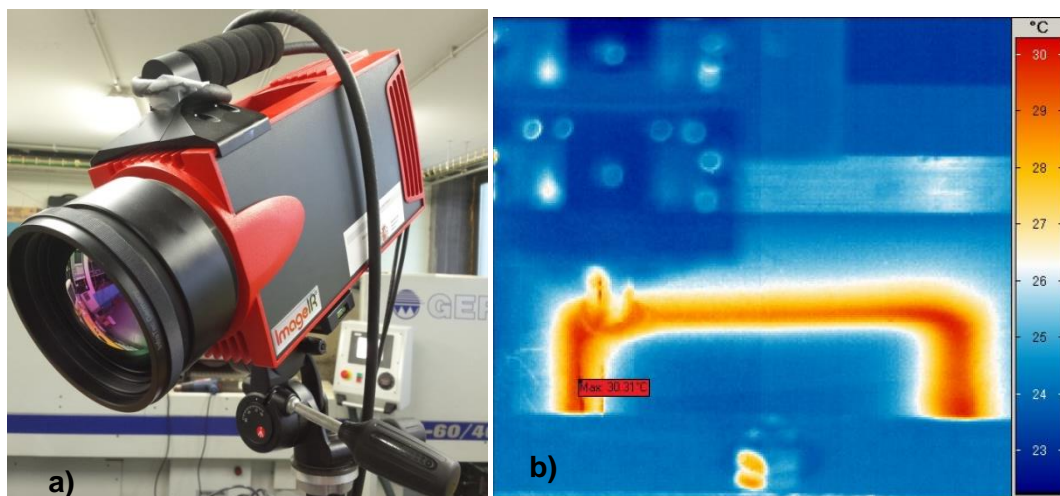


Figura 2.12 a) Càmera termogràfica utilitzada durant l'experimentació. b) Exemple d'imatge termogràfica

El darrer paràmetre que queda per mesurar és la rugositat superficial de les parets internes de la piràmide. El rugosímetre que s'ha utilitzat per prendre les mesures és el "Mitutoyo Surfrest SV1000". El programa Surfpack-SV v1.300 permetrà representar un perfil de la xapa i obtenir les mesures de rugositat.

Per tal de poder realitzar unes mesures correctes, abans de començar l'anàlisi s'ha calibrat el rugosímetre fent ús d'una placa de rugositat coneguda ($2.97\mu\text{m}$) i del mateix programari "Surfpack".

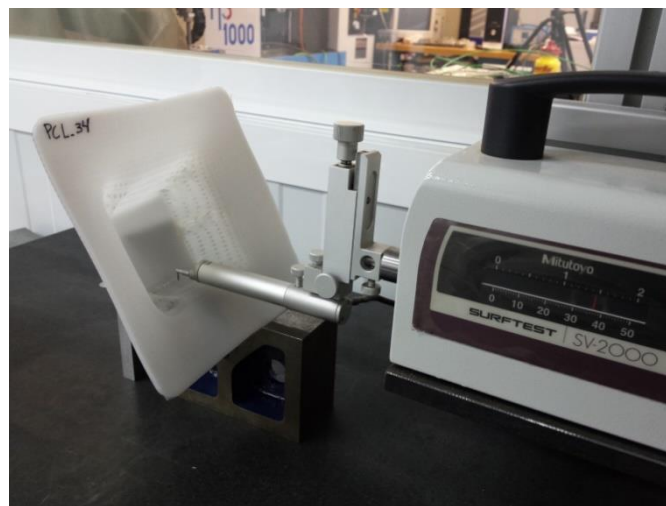


Figura 2.13 Rugosímetre emprat per a l'obtenció de resultats

També s'ha fet ús d'una màquina de coordenades de la marca *Mitutoyo* model *Crysta-Apex C544*. S'ha utilitzat per palpar els perfils de certes piràmides un cop han estat fabricades per així poder-los comparar amb el perfil teòric. Aquesta màquina es pot veure a la Figura 2.14.

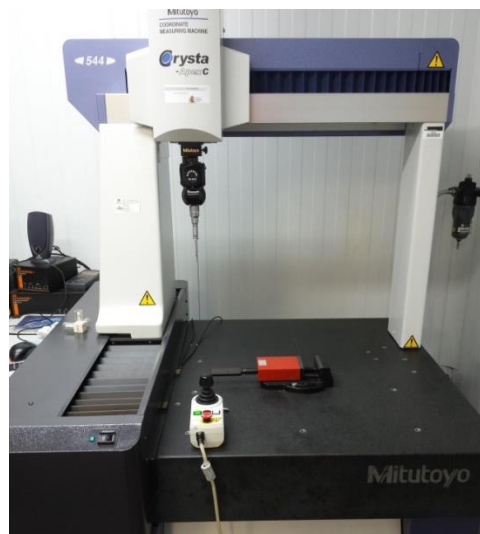


Figura 2.14 Màquina de coordenades Mitutoyo Crysta-Apex C544

2.6. Metodologia de l'anàlisi estadística

Aquest apartat es centrarà en l'explicació del procediment que cal seguir per a obtenir uns resultats estadístics correctes.

Una vegada recollides totes les dades de cada una de les magnituds es procedeix a introduir-les al programa Minitab v16. Amb el disseny d'experiments i els resultats el programa genera una equació, que serveix per predir valors de la magnitud desitjada, una taula de valors estadístics i unes superfícies de resposta.

Els resultats que proporciona el programa, concretament els que serveixen per construir l'equació esmentada, prenen els paràmetres de procés codificats (-1, 0, 1) tal i com s'ha explicat a la secció 2.4 del present treball. Això indica que per obtenir uns resultats coherents i amb les unitats correctes caldrà introduir el valor dels paràmetres d'aquesta manera.

En la taula de valors estadístics que genera el Minitab es poden apreciar els trams lineal, quadràtic i el d'interacció separats per files. Entre els valors de les columnes es poden trobar els graus de llibertat i, el més important de tots, el p-valor, que correspon a columna P. La darrera columna no venia escrita per defecte pel programa però s'ha afegit per indicar si la variable és significativa (S) o no significativa (NS). El fet que una variable sigui significativa implica que un petit canvi en ella genera una variació important sobre la magnitud que s'està estudiant. Per contra, una variable no significativa no crea grans modificacions en la magnitud per molt que aquesta variï. Per determinar la qualificació S/NS de les variables s'ha analitzat el p-valor de cada un dels paràmetres de procés. Aquells que presentin un p-valor inferior a 0.05 seran qualificats com a S ja que el contrast es realitza amb una confiança del 95%.

Les superfícies de resposta són un altre resultat que proporciona el Minitab. Aquestes venen representades com a una superfície en l'espai de manera que l'eix vertical correspon sempre a la magnitud que s'està estudiant. Els dos eixos restants fan referència a dos paràmetres de procés però, degut a que n'hi ha tres en total i només es disposa de dos eixos, caldrà representar diverses superfícies tot fixant al valor mig la variable que no apareix (0 segons la codificació).

L'anàlisi prèvia que s'explica a l'annex C permet intuir quins paràmetres seran prescindibles a l'hora de crear el model. Aquells que siguin no significatius en principi es poden descartar, però si el terme corresponent al quadrat d'aquest paràmetre o a la interacció amb un altre és significatiu, aleshores s'haurà de tenir en compte. En el cas

que només hi hagi un dels paràmetres qualificat com a significatiu se n'haurà d'afegir un altre per tal que es pugui representar una superfície de resposta, sinó només es podria dibuixar una corba. El criteri que es segueix per determinar quin paràmetre s'afegeix en el cas que només n'hi hagi un de significatiu és segons el que té el p-valor més proper al 5%. Tot i això, es pot donar el cas que s'esculli una amb un p-valor més gran ja que es realitzen diferents combinacions per tal de veure quina dóna uns valors d' R^2 més adequats.

Si es dóna un dels casos en què s'ha eliminat un terme lineal, com que només en restaran dos, només caldrà representar una superfície de resposta.

Per comprovar que el model s'ajusta bé s'analitza el coeficient R^2 que ha proporcionat el programa i que interessa que sigui proper al 100% i el p-valor, corresponent a la fila de Regressió que com més inferior sigui, millor. Dels resultats del Minitab es pot veure com apareixen diferents tipus de coeficient R^2 . El primer de tots és més general i s'escriu *R-cuad.* En principi, si es tenen en compte tots els termes de l'ajust quadràtic del model, el valor d'aquest coeficient serà més elevat perquè s'està forçant que s'ajusti als resultats obtinguts, però això no implica que pugui ser capaç de predir de forma acurada resultats que no s'hagin considerat al DOE i a més a més la complexitat del model augmenta notablement. El segon fa referència a l' R^2 predit, s'escriu *R-cuad. (pred.)* i indica com de bé el model prediu valors d'una determinada magnitud (alçada, força, temperatura o rugositat) tenint en compte diferents combinacions de paràmetres que inicialment no estaven contemplades al DOE proposat. El darrer tipus d' R^2 que apareix és el *R-cuad. (ajust.)*. Aquest valor permet comparar models amb diferents nombres de paràmetres ja que el que s'ajusti més al 100% serà el millor. Per tant, en aquest treball s'intentarà maximitzar els valors de *R-cuad. (pred.)* i *R-cuad. (ajust.)* per tal de proporcionar el model més simple possible i que permeti una predicció més encertada.

3. Resultats i discussió

En aquest apartat es presentaran els resultats que s'han anat obtenint durant el procés de deformació dels diferents materials polimèrics biocompatibles aplicant la tecnologia ISF. Tal i com s'ha comentat amb anterioritat, els resultats que s'han obtingut fan referència a alçada màxima de la piràmide, força màxima de deformació, temperatura màxima i rugositat superficial de l'interior de la peça. Les dades s'agrupen segons el tipus de material i, dins de cada un, es comenten els resultats de manera general per tal de definir els aspectes que hi ha en comú. Per a més informació en detall de cada una de les peces produïdes es pot consultar l'annex B. El motiu pel qual les taules d'aquest apartat mostren els resultats d'alçada com un percentatge és perquè, en els casos de profunditat de passada igual a 0.35 mm, l'alçada màxima teòrica (43mm) no és múltiple d'aquesta. En aquests casos la màquina de control numèric s'aturava a una alçada de 42.700 mm i el percentatge total de l'alçada està referenciat a aquest valor. Per a les profunditats de 0.2 i 0.5 mm sí que s'arribava a 43mm i aquests percentatges estan referenciats a aquest valor. D'aquesta manera, aquells experiments que mostrin un resultat del 100% en l'alçada assolida són els que han arribat a finalitzar el procés de deformació sense ruptura.

Els resultats estadístics que apareixen al llarg d'aquest apartat corresponen als models definitius. Tal i com s'explica a l'annex C, després d'obtenir uns resultats preliminars s'han fet unes modificacions pertinents per tal de simplificar i millorar els models per convertir-los en definitius. La metodologia que s'ha seguit per obtenir i tractar aquestes dades és la que s'ha descrit anteriorment a l'apartat 2.6.

3.1. UHMWPE

Després d'haver obtingut i processat les dades necessàries s'ha construït una taula resum per tal de compactar els resultats i per facilitar-ne les comparacions. La Taula 3.1 mostra tots aquests resultats per a cada un dels experiments realitzats.

Taula 3.1 Resultats de les diferents magnituds en les xapes d'UHMWPE

Experiment	Alçada	Força (N)	Temperatura màxima (°C)	Rugositat (µm)
1	100.00%	818.05	50.86	0.651
2	100.00%	747.58	48.31	0.537
3	90.16%	581.63	59.70	0.426
4	91.80%	558.92	84.56	0.400
5	99.53%	727.72	55.38	0.594
6	100.00%	774.19	44.93	0.514
7	90.23%	554.77	83.93	0.539
8	84.88%	587.48	77.91	0.462
9	100.00%	635.68	67.36	0.528
10	100.00%	636.66	69.07	0.398
11	100.00%	596.08	68.17	0.582
12	100.00%	591.00	79.39	0.620
13	100.00%	643.44	69.45	0.793
14	100.00%	595.00	70.07	0.564
15	100.00%	611.80	80.39	0.709

S'observa que la majoria de les peces no han trencat durant el procés de deformació mentre que la resta ha trencat al voltant del 90% del total de l'alçada requerida, exceptuant l'experiment 8 que ha trencat a un 85% aproximadament. Pel que fa la força, el valor màxim s'ha donat a l'experiment 1 amb un valor de 818.05N. Si s'analitzen els resultats en els quals l'eina tenia rotació s'aprecia com la força màxima disminueix i com la temperatura màxima augmenta. Dins els experiments realitzats amb rotació, els que utilitzen la rotació al màxim (peces 3, 4, 7 i 8) presenten menys força i més temperatura que els que s'han realitzat a una rotació intermèdia de 1500rpm (peces 9-15). En cap cas s'ha arribat a superar la temperatura de fusió d'aquest material que és de 130°C aproximadament. Pel que fa les rugositats superficials, es pot observar com no prenen valors molt atípics (l'interval és entre 0.4 i 0.8 µm aproximadament).

Per poder comparar millor aquests valors de rugositat és necessari tenir en compte els valors inicials de les xapes de partida. Aquestes presentaven marques en forma de línia que anaven d'un costat a un altre degudes al procés de tall d'aquestes quan van ser fabricades. Per tal de tenir una referència s'han pres mesures de rugositat sobre una xapa abans de que aquesta sigui deformada i s'han obtingut els següents valors:

- Mesura paral·lela a les marques esmentades: 0.535µm
- Mesura perpendicular a les marques esmentades: 1.492µm

Es pot apreciar un canvi important en la mesura paral·lela o perpendicular de les rugositats superficials interiors. Per aquest motiu s'ha optat per mesurar totes les piràmides en la direcció paral·lela a les línies.

Tenint en compte aquest fenomen, si es comparen els valors obtinguts després de deformar amb els d'abans, es pot comprovar com l'acabat superficial de la piràmide gairebé no varia.

D'altra banda, si s'analitzen les peces de manera visual, es pot apreciar fàcilment com la forma final d'aquestes no s'ajusta a la forma teòrica esperada. El material presenta molta recuperació elàstica, causant una curvatura inversa a la del radi de generatriu. Tot i la prevenció que s'ha tingut en compte contra la torsió, la base petita de la piràmide es veu lleugerament torsionada respecte la base gran. A part també es pot apreciar com les cantonades de la base petita són més transparents que la resta de material i com han aparegut arrugues en aquestes.

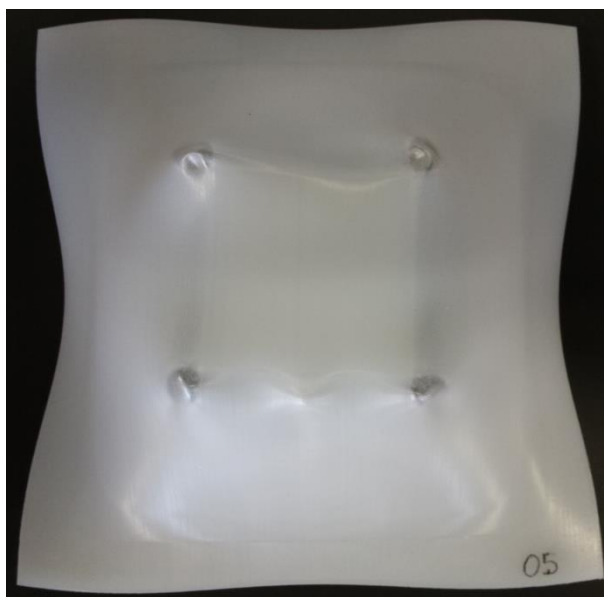


Figura 3.1 Peça 05 de l'experiment 09

A la Figura 3.1 es pot veure com les cantonades són transparents tot i que a la imatge apareixen d'un color diferent. Es veu com les arestes de la base petita no són paral·leles a les de la base gran, fet que permet comprovar l'efecte de la torsió. També es poden observar les arrugues esmentades als extrems superiors.

Les peces poden trencar segons els paràmetres de procés escollits. Aquestes falles es poden donar segons tres modes diferents:

- Mode 1: Fractura. Apareix una fractura en el tram on finalitza la paret.
- Mode 2: Arrugues. Les arrugues apareixen a les parets inclinades i es donen abans que les falles pel mode 1.
- Mode 3: Fractura obliqua. És semblant al mode 1 però aquesta fractura es propaga al llarg de la paret inclinada.

La Figura 3.2 mostra un dibuix amb els diferents tipus de falla, la seva forma i la posició on es solen donar.

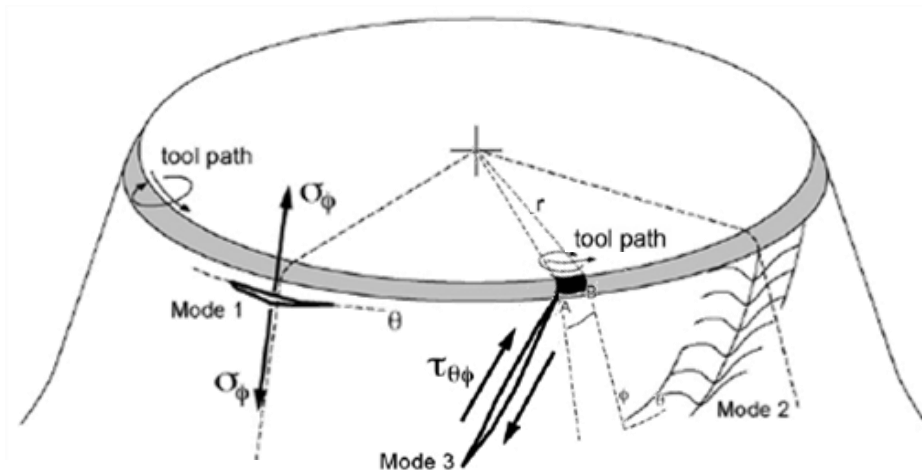


Figura 3.2 Modes de falla en la tecnologia SPIF (adaptada de Franzen et al. 2008)

La falla dels experiments realitzats que han trencat majoritàriament seguint el mode 1. La fractura es veu propagada tal i com s'ha descrit abans. Tal i com es pot veure a la Taula B.1 de l'annex B l'experiment 8 presenta un mode diferent perquè en el moment de trencar, l'eina va arrossegar material i el va deformar de manera diferent.

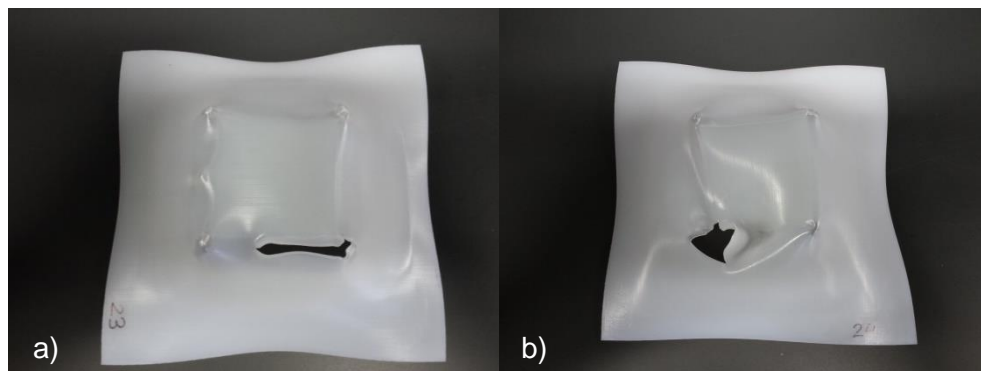


Figura 3.3 a) Falla de mode 1 de l'experiment 7 b) Falla de l'experiment 8

Per comprovar les diferències que han aparegut entre la peça deformada i la geometria teòrica s'ha utilitzat la màquina de coordenades explicada anteriorment. La màquina ha palpat el perfil d'alguna de les peces i ha generat un arxiu de text amb les

coordenades dels punts. Aquests s'han exportat a un full de càlcul i posteriorment s'han representat de manera conjunta. S'ha fet aquesta operació per a un experiment amb rotació (15) i per a un altre sense (1). La comparació dels perfils es pot veure a la Figura 3.4.

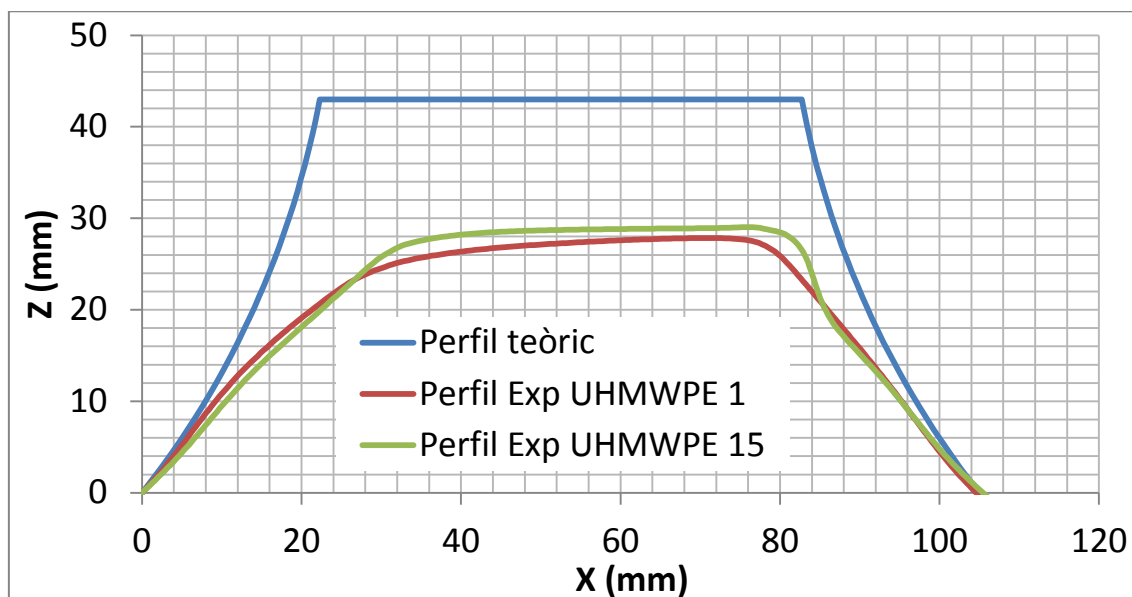


Figura 3.4 Comparació teòrica i experimental de diferents perfils d'UHMWPE

De la Figura 3.4 es pot veure com el material té molta recuperació elàstica. El perfil teòric arriba a una alçada de 43mm i els perfils experimentals es queden al voltant de 30mm. Mentre s'està deformant, el material arriba a l'alçada de 43mm però quan es deixa d'aplicar la força, el material intenta tornar a la seva posició inicial i per això es genera aquesta diferència d'alçades.

La informació més detallada de cada una de les peces, juntament amb imatges, es troba a l'annex B.1.

3.1.1. Alçada

En aquest apartat s'entrarà més en detall en l'alçada màxima a la qual han arribat les piràmides durant el procés de deformació. S'obindrà una equació que permetrà predir valors d'alçada en funció dels paràmetres significatius i algun no significatiu que s'hagi hagut d'incloure.

L'annex C.1.1 mostra com les úniques variables significatives són S i S^2 . En principi el model definitiu hauria de contemplar només la variable S però, tal i com s'ha explicat anteriorment, no es podria generar una superfície. El que s'ha fet per obtenir el model

definitiu ha estat incloure també la profunditat de passada (Δz) ja que, comparat amb la velocitat d'avanç (F), té un p-valor inferior.

L'equació que permet predir valors d'alçada en funció de S i Δz és:

$$Alçada = 100 - 5.306 \cdot S - 0.610 \cdot \Delta z - 5.423 \cdot S^2 - 1.452 \cdot S \cdot \Delta z \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Unes altres dades d'interès que es poden extreure dels resultats del Minitab són els coeficients R^2 . Tal i com s'ha explicat a l'apartat 2.6, el programa dona diferents valors d'aquest coeficient i aquests són: "*R-cuad. (pred.)=81.20% R-cuad. (ajusted)=93.78%*".

La taula de valors estadístics obtinguda per a aquest model és la següent:

Taula 3.2 Taula de valors definitius generada pel Minitab. Variable: Alçada

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	4	346.478	346.478	86.620	53.76	0.000	S
Lineal	2	228.246	228.246	114.123	70.83	0.000	S
S (rpm)	1	225.265	225.265	225.265	139.80	0.000	S
Δz (mm)	1	2.981	2.981	2.981	1.85	0.204	NS
Quadràtic	1	109.781	109.781	109.781	68.13	0.000	S
S^2 (rpm)	1	109.781	109.781	109.781	68.13	0.000	S
Interacció	1	8.451	8.451	8.451	5.24	0.045	S
S (rpm)* Δz (mm)	1	8.451	8.451	8.451	5.24	0.045	S
Error residual	10	16.113	16.113	1.611			
Falta d'ajust	4	14.769	14.769	3.692	16.49	0.002	S
Error pur	6	1.344	1.344	0.224			
Total	14	362.591					

L'únic paràmetre qualificat com a NS és la profunditat de passada però ja era d'esperar ja que en l'anàlisi preliminar també ho era.

Finalment s'analitzaran les superfícies de resposta que, en aquest cas, només serà una ja que es tenen en compte només dos paràmetres de procés.

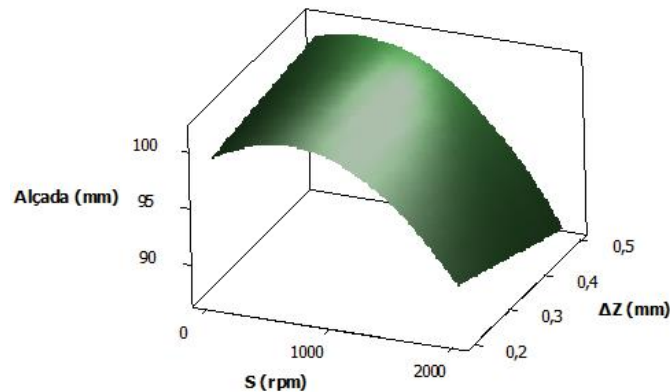


Figura 3.5 Superfície de resposta per l'alçada en funció de S i Δz

Per comprovar que el paràmetre S és significatiu i que el Δz és no significatiu es pot fer ús de la Figura 3.5. S'aprecia com la superfície es manté recta al llarg de l'eix de la profunditat de passada. Per contra, al llarg de l'eix de la velocitat de rotació es veu com la superfície és corba. Això torna a indicar que per petits canvis de Δz l'alçada no es veurà pràcticament afectada mentre que una petita variació de S sí que fa canviar el valor de la magnitud que s'està mesurant.

Finalment cal analitzar si el model que s'ha seguit s'ajusta bé o no. Els coeficients R^2 i el p-valor corresponent a la fila de Regressió són els indicadors. Com que prenen uns valors de 81.20%, 93.78% i 0.000 respectivament es pot dir que l'ajust és correcte.

3.1.2. Força màxima

Seguint el mateix procediment utilitzat en l'apartat anterior es procedeix a obtenir l'equació que defineix la força màxima, la taula de valors estadístics i les superfícies de resposta.

L'equació que permet predir valors de força màxima en funció de S i F és:

$$F_{max} = 615.67 - 98.09 \cdot S - 22.30 \cdot F + 53.13 \cdot S^2 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=91.42% R-cuad. (ajusted)=94.11%*".

En aquest cas la taula de valors estadístics s'ha reduït més ja que no inclou cap terme d'interacció.

Taula 3.3 Taula de valors definitius generada pel Minitab. Variable: Força màxima

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	3	91497	91497	30499.0	75.59	0.000	S
Lineal	2	80959	80959	40479.7	100.32	0.000	S
S (rpm)	1	76980	76980	76979.7	190.78	0.000	S
F (mm/min)	1	3980	3980	3979.8	9.86	0.009	S
Quadràtic	1	10538	10538	10537.7	26.12	0.000	S
S² (rpm)	1	10538	10538	10537.7	26.12	0.000	S
Error residual	11	4439	4439	403.5			
Falta d'ajust	5	1600	1600	320.1	0.68	0.658	NS
Error pur	6	2838	2838	473.0			
Total	14	95936					

Es pot observar com tots els termes de la Taula 3.3 estan qualificats com a significatius exceptuant la falta d'ajust.

La superfície de resposta que s'ha obtingut per a la força màxima és la que es presenta a la Figura 3.6

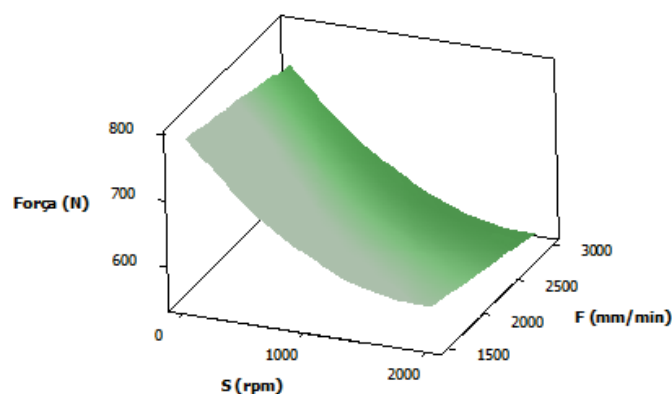


Figura 3.6 Superfície de resposta per la força màxima en funció de S i F

Te la Taula 3.3 es coneix que ambdós paràmetres de procés són significatius. Si s'analitza la superfície de resposta de la Figura 3.6 es pot veure com S és molt més significativa que F ja que aquesta darrera presenta una tendència més recta al llarg de l'eix.

Ara, per comprovar que el model seguit s'ajusta correctament es tornen a analitzar els diferents coeficients R^2 i el p-valor de la fila de Regressió. Aquests són 91.42%, 94.11% i 0.000 respectivament i indiquen que l'ajust és correcte.

3.1.3. Temperatura màxima

En aquest apartat es repeteix el mateix que s'ha fet per l'alçada i per la força màxima però ara considerant la temperatura. En l'anàlisi preliminar només hi havia un terme significatiu però, tal i com s'ha fet amb l'alçada, se n'ha introduït un altre (F) per poder obtenir una superfície de resposta.

Analitzant les dades obtingudes pel programari es pot representar l'equació que es mostra a continuació i que està en funció de les velocitats de rotació i d'avanç:

$$T = 74.034 + 13.328 \cdot S + 4.180 \cdot F - 9.044 \cdot S^2 - 3.584 \cdot F^2 + 6.853 \cdot S \cdot F \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Els diferents valors d'R² que s'han obtingut per aquest model són: "R-cuad. (pred.)=67.84% R-cuad. (ajusted)=82.32%".

La taula que conté tots els resultats estadístics referents a la temperatura màxima que s'assoleix durant el procés de deformació es mostra a continuació:

Taula 3.4 Taula de valors definitius generada pel Minitab. Variable: Temperatura màxima

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	5	2084.64	2084.64	416.93	14.04	0.001	S
Lineal	2	1560.76	1560.76	780.38	26.28	0.000	S
S (rpm)	1	1420.98	1420.98	1420.98	47.85	0.000	S
F (mm/min)	1	139.78	139.78	139.78	4.71	0.058	NS
Quadràtic	2	336.05	336.05	168.03	5.66	0.026	S
S² (rpm)	1	288.34	303.82	303.82	10.23	0.011	S
F² (mm/min)	1	47.72	47.77	47.72	1.61	0.237	NS
Interacció	1	187.83	187.83	187.83	6.33	0.033	S
S (rpm)*F (mm/min)	1	187.83	187.83	187.83	6.33	0.033	S
Error residual	9	267.26	267.26	29.70			
Falta d'ajust	3	54.61	54.61	18.20	0.51	0.688	NS
Error pur	6	212.65	212.65	35.44			
Total	14	2351.90					

Aquesta taula presenta més termes ja que n'hi ha dos de quadràtics i un d'interacció. Com que en l'anàlisi preliminar la F era no significativa, en la taula torna a aparèixer com a tal. Igualment per al seu quadrat.

La superfície de resposta obtinguda és la que es mostra a la Figura 3.7.

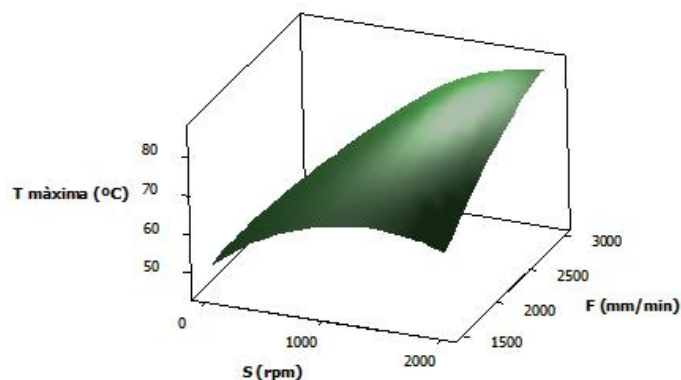


Figura 3.7 Superfície de resposta per la temperatura màxima en funció de S i F

En aquest cas no es correspon gaire el fet que la variable F sigui no significativa i que presenti una tendència corba al llarg del seu eix a diferència de les magnituds analitzades amb anterioritat.

Com que els coeficients R^2 prenen uns valors de 67.84% i 82.32% i el p-valor del terme de regressió val 0.001 es considera que el model s'ajusta correctament.

3.1.4. Rugositat superficial

Si es segueix el mateix procediment que amb els anteriors paràmetres de procés es pot obtenir l'equació que permet predir les magnituds, la taula de valors estadístics i la bondat d'ajust. Després d'analitzar el model previ s'ha observat que els resultats no són tan bons com en els altres casos. Com que els valors d' R^2 eren molt baixos i cap dels termes era significatiu es va optar per a realitzar diferents combinacions de paràmetres per obtenir uns resultats millors. El model que presentava uns millors resultats i que s'ha considerat com a definitiu només contempla la velocitat de rotació (S) i la profunditat de passada (Δz).

L'equació obtinguda en funció d'aquestes dues variables i els diferents coeficients R^2 es presenten a continuació:

$$R = 0.59914 - 0.05863 \cdot S - 0.03113 \cdot \Delta z - 0.08377 \cdot S^2 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

"*R-cuad. (pred.)=0.00% R-cuad. (ajusted)=17.91%*".

Si es comparen aquests valors amb els previs de l'annex C.1.4 es pot veure com el coeficient predit s'ha mantingut igual a zero i com l'ajustat ha millorat.

Taula 3.5 Taula de valors definitius generada pel Minitab. Variable: Rugositat superficial

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	3	0.061442	0.020481	0.020481	2.02	0.17	NS
Lineal	2	0.035245	0.017623	0.017623	1.74	0.221	NS
S (rpm)	1	0.027495	0.027495	0.027495	2.71	0.128	NS
Δz (mm)	1	0.007750	0.007750	0.007750	0.76	0.401	NS
Quadràtic	1	0.026197	0.026197	0.026197	2.58	0.136	NS
S² (rpm)	1	0.026197	0.026197	0.026197	2.58	0.136	NS
Error residual	11	0.111639	0.010149	0.010149			
Falta d'ajust	5	0.051863	0.010373	0.010373	1.04	0.472	NS
Error pur	6	0.059777	0.009963	0.009963			
Total	14						

Tal i com s'ha comentat al principi d'aquest subapartat, cap dels termes és significatiu.

A continuació s'analitzarà la superfície de resposta que s'ha obtingut per la rugositat superficial en funció de S i Δz .

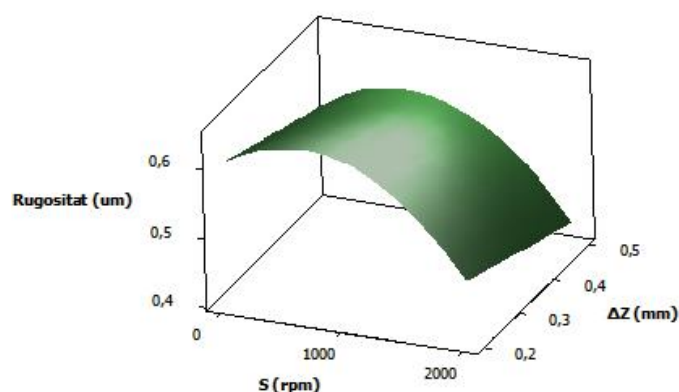


Figura 3.8 Superfície de resposta per la rugositat superficial en funció de S i Δz

La superfície no es correspon amb les qualificacions de S/NS. En teoria la corba hauria de ser molt plana en ambdós eixos i no presenta aquest comportament.

Els valors dels coeficients R^2 que apareixen al principi d'aquest subapartat indiquen que el model no s'ajusta gens bé. El p-valor del terme Regressió és superior al 5% i ajuda a afirmar que el model no presenta un ajustament correcte.

Degut al mal ajust d'aquest model no es podran predir valors de rugositat donades una velocitat de rotació i una profunditat de passada. Això també indica que la superfície de resposta no és correcta i que no podrà ser utilitzada per determinar valors de la magnitud.

El fet que aquests resultats no siguin correctes pot ser degut a les marques de fabricació que es troben al llarg de la peça comentades a l'apartat 3.1.

3.2. PCL

Per a aquest material s'ha construït una taula amb el mateix format que l'anterior. La Taula 3.6 mostra els resultats per a cada un dels experiments.

Taula 3.6 Resultats de les diferents magnituds en les xapes de PCL

Experiment	Alçada	Força (N)	Temperatura màxima (°C)	Rugositat (µm)
1	95.08%	320.78	37.24	1.023
2	94.26%	343.10	34.66	0.716
3	96.72%	275.32	74.38	1.880
4	95.08%	282.30	53.46	1.735
5	83.72%	330.25	32.92	0.859
6	100.00%	355.89	36.58	0.579
7	86.05%	281.23	49.34	1.775
8	100.00%	266.34	54.18	2.102
9	96.28%	314.38	37.07	0.608
10	97.67%	293.05	39.82	1.393
11	100.00%	309.16	39.36	0.622
12	100.00%	291.63	40.19	0.509
13	89.34%	325.57	36.94	0.585
14	100.00%	296.22	42.51	0.464
15	100.00%	280.30	40.49	0.598

Analitzant la columna corresponent a l'alçada, es pot comprovar com moltes de les xapes han trencat durant el procés de deformació, fet que amb l'UHMWPE només passava en una minoria.

La força de deformació s'ha reduït aproximadament a la meitat respecte a l'UHMWPE en tots els experiments. El valor màxim de força de la taula anterior és de 355.89N i s'ha donat en l'experiment 6 que, si es compara amb la força màxima de deformació de l'altre material (818.05N en l'experiment 1), es veu com és molt inferior. Això és un clar indicatiu de que el material PCL és més fàcil de deformar que l'UHMWPE.

De manera semblant al material anterior, la temperatura màxima que s'assoleix en els experiments que tenen rotació és major que en la resta. Els experiments en els quals l'eina girava a 2000rpm la temperatura és major encara. La temperatura màxima correspon a l'experiment 3 i pren un valor de 74.38°C. Aquesta temperatura és superior a la temperatura de fusió del material i és per això que, a simple vista, es poden veure defectes de rugositat causats per aquest fenomen. Tot i que la

temperatura màxima dels experiments 4, 7 i 8 no supera la de fusió, es pot observar com també han fos. Aquests experiments tenen en comú que la velocitat de rotació és la màxima. Per tant, es pot afirmar que una velocitat de rotació massa elevada fa que la temperatura augmenti considerablement i que el material fongui durant el procés de deformació. Els dos materials necessiten menys força per ser deformats quan la rotació de l'eina s'incrementa.

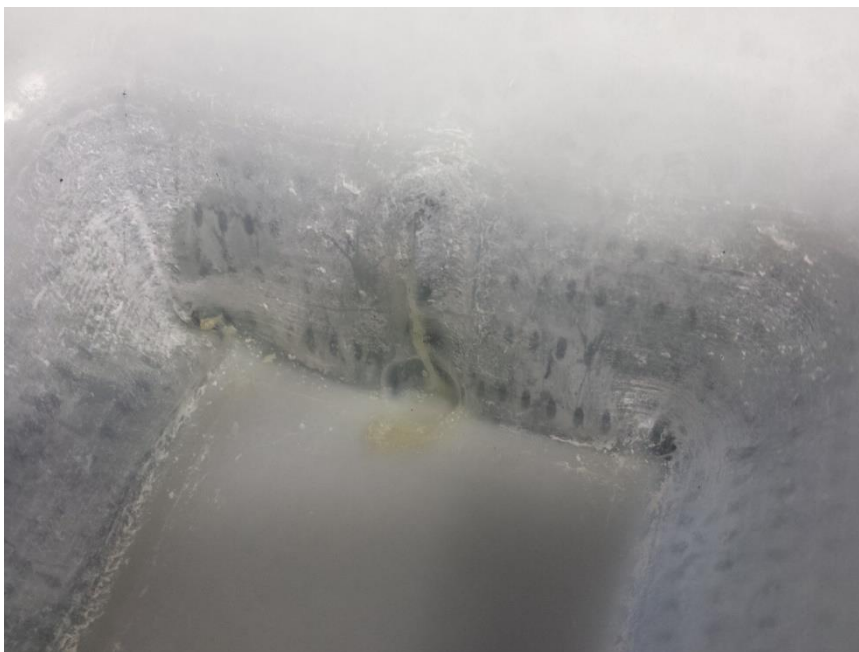


Figura 3.9 Peça corresponent a l'experiment 3. Es pot observar la petjada de l'eina i com el material ha fos

Si s'analitzen les rugositats superficials d'aquestes peces es pot observar com apareixen valors relativament alts. En més d'un cas es supera la unitat però el cas extrem és el de l'experiment 8, que presenta una rugositat de 2.102 micres deguda a la proximitat de defectes a la zona de mesura. La Taula A.1 de l'annex A mostra valors de les rugositats de les xapes de partida de PCL, que prenen valors d'entre 0.250 i 0.600 μm en zones sense defectes i valors de 0.600 a 1 μm i més allà on hi havia defectes de fabricació. Aquestes làmines van ser fabricades de manera individual per un procés similar a l'explicat a l'apartat 2.2.2 i com que una pot ser molt diferent d'una altra, s'ha fet aquest anàlisi prèvia dels defectes i de les rugositats.

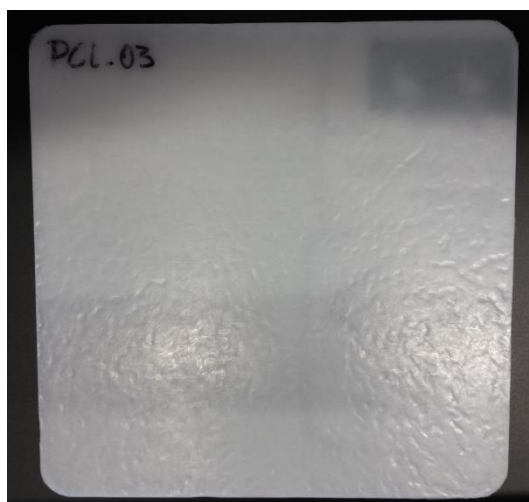


Figura 3.10 Xapa de PCL amb irregularitats degudes al procés de fabricació

Aquelles peces en les que el material ha fos la rugositat augmenta considerablement perquè han aparegut irregularitats. Referent a la resta d'experiments, les rugositats mesurades prenen un valor proper al de les xapes de partida, fet que indica que, si no s'ha assolit la temperatura de fusió del material, l'acabat superficial no es veu molt afectat pel procés de deformació.

Si s'inspeccionen aquestes piràmides de manera visual es pot observar com la forma final s'ajusta més a la teòrica en comparació amb l'UHMWPE. Es pot apreciar la curvatura del radi de generatriu i la base petita es veu molt més definida. Les fractures són d'una mida considerable i es veuen molts defectes de fabricació de la xapa en més d'una piràmide.

Les fractures s'han ocasionat en les peces trencades no es corresponen amb cap dels modes explicats a l'apartat 3.1 (trencaven degut als defectes de fabricació), excepte aquelles que han arribat a fondre, que han presentat una arruga all llarg del punt on s'incrementa la profunditat tal i com s'aprecia a la Figura 3.12.

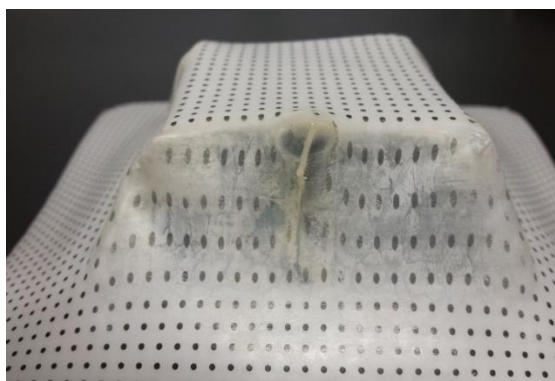


Figura 3.11 Mode de falla 2. Arruga al punt de descens de l'eina de l'experiment 3

Per comprovar si la forma final s'ajusta a la teòrica s'ha seguit el mateix procediment descrit en l'apartat anterior. Els experiments que s'han escollit són els mateixos però ara per a aquest material.

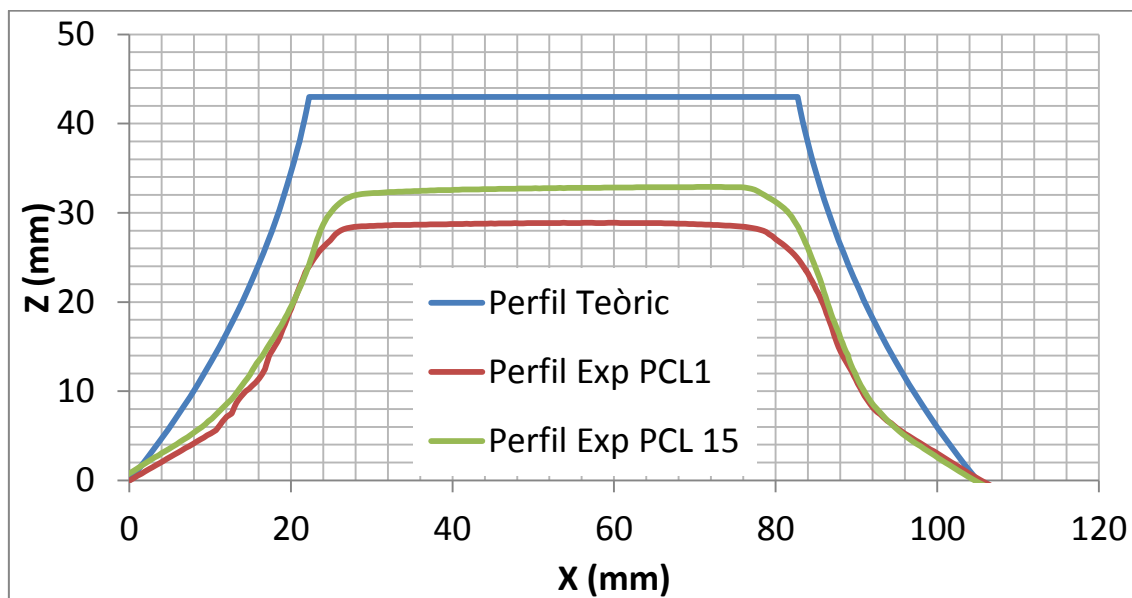


Figura 3.12 Comparació teòrica i experimental de diferents perfils de PCL

La Figura 3.12 mostra com aquest material també presenta recuperació elàstica però no tanta com el material anterior. S'aprecia una diferència relativament important entre l'experiment que no té rotació (1) amb el que sí que en té (15). Tot i que l'alçada és inferior a la teòrica, el perfil en general és força correcte, a diferència del material UHMWPE que presentava un perfil molt més diferent i amb una curvatura inversa.

L'annex B.2 conté més detalls sobre els acabats d'aquestes peces.

3.2.1. Alçada

De la mateixa manera que s'ha fet amb el material UHMWPE es fa ara amb el PCL. Els resultats preliminars que s'han modificat per obtenir un model definitiu es troben a l'annex 3.2.1.

El model preliminar no contenia cap terme significatiu. Com que se n'han de considerar dos per tal de poder obtenir una superfície de resposta s'ha optat per escollir la velocitat de rotació i la profunditat de passada ja que era la combinació que donava un millor ajust.

L'equació i els coeficients R^2 que s'han obtingut són els següents:

$$Alçada = 95.6142 + 0.5981 \cdot S + 3.9535 \cdot \Delta z \quad (\text{Eq. 3.5})$$

“ R -cuad. (pred.)=0.00% R -cuad. (ajusted)=21.01%”.

El valor ajustat ha augmentat considerablement ja que en l'anàlisi preliminar prenia un valor del 0.00%.

Taula 3.7 Taula de valors definitius generada pel Minitab. Variable: Alçada

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	2	127.902	127.902	63.951	2.86	0.096	NS
Lineal	2	127.902	127.902	63.951	2.86	0.096	NS
S (rpm)	1	2.862	2.862	2.862	0.13	0.727	NS
Δz (mm)	1	125.041	125.041	125.041	5.60	0.036	S
Error residual	12	268.118	268.118	22.343			
Falta d'ajust	6	181.115	181.115	30.186	2.08	0.197	NS
Error pur	6	87.003	87.003	14.500			
Total	14	396.021					

No apareixen termes quadràtics ni d'interacció perquè si es tenien en compte el model empitjorava. Aquesta és la combinació que donava un resultat millor.

La superfície de resposta que s'ha obtingut en funció dels dos paràmetres lineals de la Taula 3.7 és la següent:

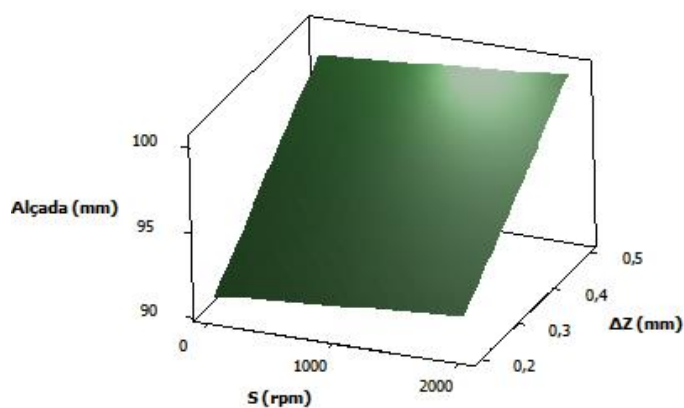


Figura 3.13 Superfície de resposta per l'alçada en funció de S i Δz

La superfície de resposta és pràcticament plana. Es pot comprovar com la variable S és no significativa perquè manté una tendència molt recta, mentre que la Δz és significativa ja que si es varia aquesta, l'alçada també ho fa.

Com que els coeficients R^2 prenen uns valors de 0.00% i 21.01% i el p-valor del terme de regressió val 0.096 es considera que el model no s'ajusta correctament. No es podran predir valors d'alçada amb aquests paràmetres de procés.

Igual que ha passat amb la rugositat superficial de l'UHMWPE aquests resultats no són els desitjats. En aquest cas pot ser degut als defectes de fabricació que contenen les xapes de PCL. Aquest fenomen no es controlable i fa que la fractura aparegui quan no hauria de fer-ho.

3.2.2. Força màxima

Seguint el mateix procediment utilitzat per l'alçada es procedeix a obtenir l'equació que defineix la força màxima, la taula de valors estadístics i la superfície de resposta.

L'equació que permet predir valors de força màxima en funció de S i Δz és:

$$F_{max} = 304.368 - 30.604 \cdot S - 3.516 \cdot \Delta z - 10.132 \cdot S \cdot \Delta z \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=63.79% R-cuad. (ajusted)=75.45%*".

Aquests coeficients han millorat molt respecte els corresponents a l'anàlisi preliminar. El predit valia 0.00% i l'ajustat 53.18%.

La taula de valors estadístics corresponent al model definitiu es mostra a continuació:

Taula 3.8 Taula de valors definitius generada pel Minitab. Variable: Força màxima

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	3	8002.10	8002.10	2667.37	15.34	0	S
Lineal	2	7591.47	7591.47	3795.74	21.83	0	S
S (rpm)	1	7492.59	7492.59	7492.59	43.09	0	S
Δz (mm)	1	98.88	98.88	98.88	0.57	0.467	NS
Interacció	1	410.63	410.63	410.63	2.36	0.153	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	410.63	410.63	410.63	2.36	0.153	NS
Error residual	11	1912.56	1912.56	173.87			
Falta d'ajust	5	570.07	570.07	114.01	0.51	0.762	NS
Error pur	6	1342.49	1342.49	223.75			
Total	14	9914.67					

La profunditat de passada no és significativa però s'ha inclòs per poder representar la superfície de resposta, que es mostra a la figura Figura 3.14.

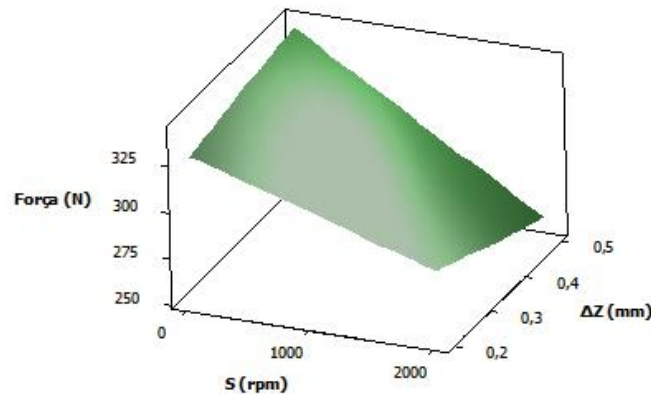


Figura 3.14 Superfície de resposta per la força màxima en funció de S i Δz

Es pot apreciar com la profunditat de passada gairebé no provoca canvis en la força màxima. Per contra, la velocitat de rotació presenta un pendent considerable que fa que la força variï quan es modifica el règim de gir.

Els coeficients R^2 indiquen que el model s'ajusta relativament bé. D'altra banda, el p-valor de la regressió és nul. Aquesta dada ajuda a afirmar que l'ajust del model és mitjanament bo i que es podran predir valors.

3.2.3. Temperatura màxima

Es repeteix el mateix que s'ha fet per l'alçada i per la força màxima però ara considerant la temperatura. Amb els resultats que proporciona Minitab es pot construir l'equació, en aquest cas en funció de S i F, que permetrà predir valors.

$$T = 39.483 + 11.245 \cdot S - 2.605 \cdot F + 7.112 \cdot S \cdot F \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Els coeficients R^2 obtinguts amb aquests model definitiu són: " R -cuad. (pred.)=50.88% R -cuad. (ajusted)=71.71%".

El fet que aquests coeficients no siguin tan proper al 100% pot ser degut a reflexos captats per la càmera durant el procés de deformació.

La Taula 3.9 mostra els valors estadístics proporcionats pel programa.

Taula 3.9 Taula de valors definitius generada pel Minitab. Variable: Temperatura màxima

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regresió	3	1254.73	1254.73	418.24	12.83	0.001	S
Lineal	2	1065.89	1065.89	532.94	16.34	0.001	S
S (rpm)	1	1011.60	1011.60	1011.60	31.02	0	S
F (mm/min)	1	54.29	54.29	54.29	1.66	0.223	NS
Quadràtic	1	188.84	188.84	188.84	5.79	0.035	NS
S² (rpm)	1	188.84	188.84	188.84	5.79	0.035	NS
Error residual	11	358.67	358.67	32.61			
Falta d'ajust	5	320.24	320.24	64.05	10.00	0.007	S
Error pur	6	38.44	38.44	6.41			
Total	14	1613.40					

La velocitat d'avanç no és significativa però s'ha hagut d'incloure per tal de tenir dos paràmetres per analitzar i així poder construir la superfície de resposta. Aquesta es mostra a la

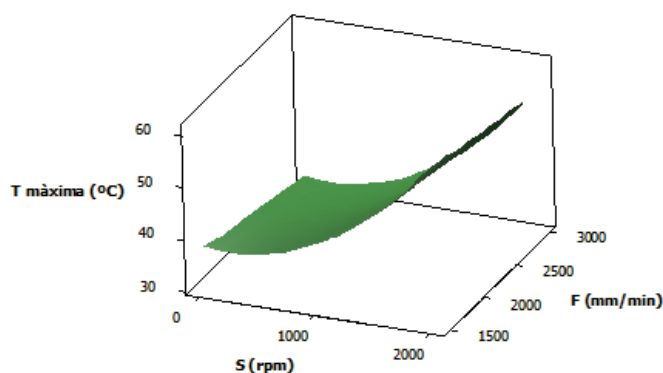


Figura 3.15 Superfície de resposta per la temperatura màxima en funció de S i F

Novament es torna a observar com el comportament al llarg de l'eix d'una variable no significativa segueix una tendència lineal i com el d'una significativa varia a mesura que canvia el valor del paràmetre.

Dels coeficients R^2 i el p-valor de la regressió es pot extreure que les prediccions del model seran força correctes.

3.2.4. Rugositat superficial

Aquesta és la darrera magnitud a analitzar d'aquest material. El procediment és el mateix que en els casos anteriors. L'equació que permet predir valors de rugositat superficial i que en aquest cas depèn de tots els termes (lineals, quadràtics i d'interacció) i els coeficients R^2 que s'han obtingut són els següents:

$$R = 0.68271 + 0.53938 \cdot S - 0.16525 \cdot F + 0.08988 \cdot \Delta z + 0.65091 \cdot S^2 - 0.22450 \cdot F \cdot \Delta z \quad (\text{Eq. 3.8})$$

“*R-cuad. (pred.)=76.10% R-cuad. (ajusted)=89.63%*”.

Aquests valors són molt millors si els comparem amb els obtinguts amb la rugositat superficial de l’UHMWPE. La causa de la millora podria ser que les làmines de partida de PCL no contenien aquestes marques degudes al procés de fabricació.

La taula de valors estadístics es mostra a continuació:

Taula 3.10 Taula de valors definitius generada pel Minitab. Variable: Rugositat superficial

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	5	4.39384	4.39384	0.87877	25.19	0	S
Lineal	3	2.61048	2.61048	0.87016	24.95	0	S
S (rpm)	1	2.32740	2.32740	2.32740	66.72	0	S
F (mm/min)	1	0.21846	0.21846	0.21846	6.26	0.034	S
Δz (mm)	1	0.06462	0.06462	0.06462	1.85	0.207	NS
Quadràtic	1	1.58176	1.58176	1.58176	45.35	0	S
S² (rpm)	1	1.58176	1.58176	1.58176	45.35	0	S
Interacció	1	0.20160	0.20160	0.20160	5.78	0.04	S
F (mm/min)*Δz (mm)	1	0.20160	0.20160	0.20160	5.78	0.04	S
Error residual	9	0.31394	0.31394	0.03488			
Falta d'ajust	7	0.30302	0.30302	0.04329	7.93	0.117	NS
Error pur	2	0.01092	0.01092	0.00546			
Total	14	4.70778					

El terme corresponent a la profunditat de passada, que esta qualificat com a no significatiu, s’ha tingut en compte a l’hora de crear el model definitiu perquè aquest, presentava uns millors resultats que no pas prescindint del paràmetre.

Com que en aquest cas s’han considerat tots els termes lineals s’hauran de representar tres superfícies de resposta diferents tal i com s’ha comentat a l’apartat 2.6. Aquestes superfícies estan representades a la Figura 3.16.

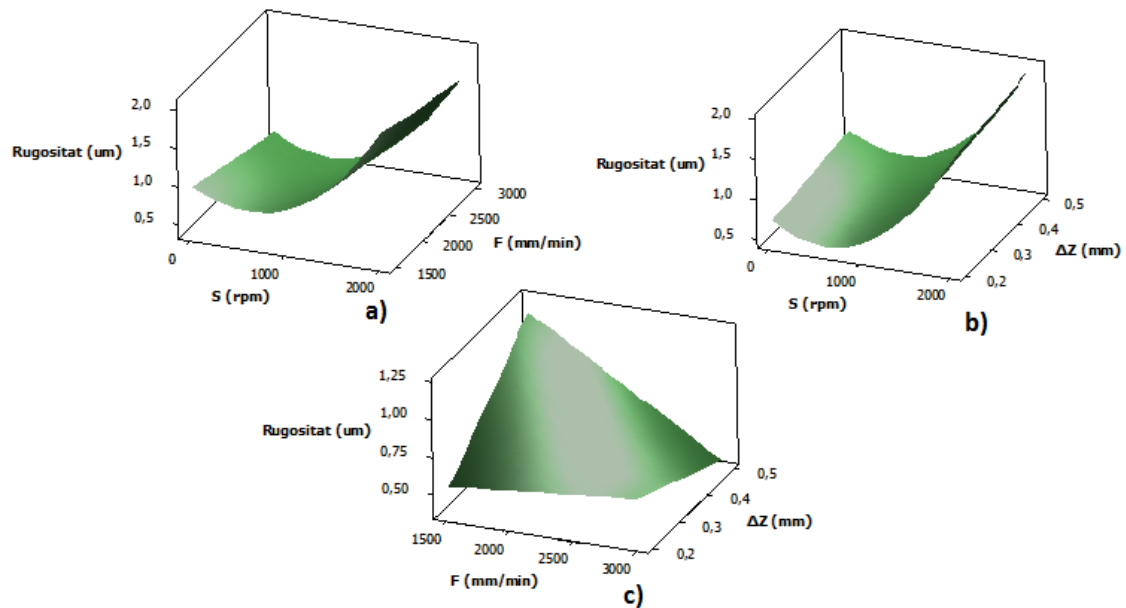


Figura 3.16 Superfícies de resposta per la rugositat superficial. a) $\Delta z=0.35\text{mm}$ b) $F=2250\text{mm/min}$ c) $S=1000\text{rpm}$

De la Figura 3.16 a) i b) es pot veure com el paràmetre Δz és no significatiu. El paràmetre de procés F també sembla no significatiu ja que presenta un comportament lineal al llarg del seu eix però, si s'analitza la qualificació que se li ha donat a la Taula 3.10 es comprova com realment és significatiu. En canvi, la variable S presenta una tendència molt corba al llarg dels eixos on apareix.

Amb p-valor de la regressió i els valors dels coeficients R^2 es pot interpretar que el model s'ajusta correctament. Això vol dir que es podran predir valors de rugositat superficial en funció de cada un dels paràmetres de procés.

4. Resum de l'estudi de costos

Considerant les corresponents despeses de material i de mà d'obra, així com les despeses indirectes per l'aplicació de materials polimèrics biocompatibles en la tecnologia de deformació incremental de xapa, el pressupost total ascendeix a 9537.57€ (NOU MIL CINQ-CENTS TRENTA-SET EUROS AMB SETANTA-SET CÈNTIMS).

5. Conclusions

Aquest apartat presentarà les conclusions a les quals s'ha arribat després d'haver analitzat en detall els resultats obtinguts a l'apartat Resultats i discussió del present treball. Les conclusions es presenten de manera separada per cada un dels materials i posteriorment es destacaran els aspectes més importants del conjunt dels dos.

5.1. UHMWPE

Un dels aspectes a destacar dels resultats obtinguts utilitzant aquest material és que només han trencat en un terç dels experiments realitzats. D'entrada pot semblar un bon resultat i pot fer pensar que és un material adequat per deformar-se amb la tecnologia ISF però la recuperació elàstica és tal que la geometria final no s'ajusta a la forma teòrica. L'angle de paret variable obtingut en cada un dels experiments no és com el teòric ja que la curvatura ha esdevingut inversa tal i com es pot apreciar en la Figura 3.4.

Els resultats mostren com la força necessària per deformar les xapes d'UHMWPE arriba fins a uns 800N aproximadament. Si s'aplica velocitat de rotació a l'eina aquesta força es redueix considerablement i la temperatura màxima de deformació augmenta. Aquest augment de temperatura no és preocupant ja que la temperatura de fusió del material és gairebé dues vegades més gran que la màxima que s'ha assolit.

Els valors de rugositat són molt propers als inicials per la qual cosa es pot dir que el procés de deformació no altera gaire l'acabat superficial de la peça.

Les modificacions sobre els models inicials han permès fer-los més senzills i millorar el seu ajust de manera considerable. La Taula 5.1 mostra com han variat els coeficients R^2 pel model previ i pel definitiu.

Taula 5.1 Comparació de l'ajust dels models previs i definitius (UHMWPE)

	Alçada		Força màxima	
	R^2 (pred.)	R^2 (ajust.)	R^2 (pred.)	R^2 (ajust.)
Model previ	0.6287	0.9350	0.7364	0.9235
Model definitiu	0.8120	0.9378	0.9142	0.9411
	Temperatura màxima		Rugositat superficial	
	R^2 (pred.)	R^2 (ajust.)	R^2 (pred.)	R^2 (ajust.)
Model previ	0.0000	0.7226	0.0000	0.0758
Model definitiu	0.6784	0.8232	0.0000	0.1791

Els models obtinguts per l'alçada i la força màxima s'ajusten molt bé ja que ambdós coeficients R^2 són propers al 100% i perquè els p-valor de les regressions són nuls. El model per a la temperatura màxima no s'ajusta del tot bé però es podria predir algun valor tot i cometent un cert error. El pitjor model de tots és el corresponent a la rugositat superficial i es podran predir valors per a aquesta magnitud.

5.2. PCL

Aquest material ha trencat en molts dels experiments realitzats. La causa d'aquesta ruptura han estat els defectes de fabricació que contenien les xapes de partida. La forma final de la piràmide s'ajusta molt més a la teòrica però la recuperació elàstica també hi és present.

Els valors de força màxima de deformació són més baixos que en el cas de l'UHMWPE. Aquesta es redueix quan s'aplica rotació a l'eina però l'increment de temperatura que això suposa fa que s'assoleixi la temperatura de fusió del material i que aquest tingui un pitjor acabat superficial.

Es creu que degut a aquests defectes de fabricació esmentats els models obtinguts per predir resultats no s'ajusten gaire bé (excepte en el cas de la rugositat) tot i haver-los simplificat per millorar-los. La següent taula mostra la comparativa entre els coeficients R^2 del model previ i el definitiu:

Taula 5.2 Comparació de l'ajust dels models previs i definitius (PCL)

	Alçada		Força màxima	
	R^2 (pred.)	R^2 (ajust.)	R^2 (pred.)	R^2 (ajust.)
Model previ	0.0000	0.0000	0.0000	0.5318
Model definitiu	0.0000	0.2101	0.6379	0.7545
	Temperatura màxima		Rugositat superficial	
	R^2 (pred.)	R^2 (ajust.)	R^2 (pred.)	R^2 (ajust.)
Model previ	0.0000	0.7145	0.6199	0.9279
Model definitiu	0.5088	0.7171	0.7610	0.8963

L'ajust dels models millora considerablement però en el cas de l'alçada no és suficient com per predir valors. Per a la resta de magnituds, i igual que per la temperatura de l'UHMWPE, es podran predir valors però s'haurà de ser conscient que comportaran errors.

5.3. Conclusió general

Aquest treball mostra una primera experimentació amb materials polimèrics biocompatibles utilitzant la tecnologia de deformació incremental de xapa. El fet que aquests tipus de materials en la tecnologia ISF s'estiguin estudiant des de fa pocs anys, fa que es desconegui el comportament d'aquests en aquest procés i que l'obtenció de làmines de partida sigui difícil. Tal i com s'ha explicat a l'apartat 2.2. hi ha molt pocs fabricants que proporcionin aquest material en forma de xapa. En el cas de l'UHMWPE s'ha pogut obtenir comercialment, requerint un procés de fabricació especial, i per tant més costós. Pel que fa a la PCL, la fabricació individual de xapes fa que no es pugui assegurar una repetibilitat per a totes les peces i això ha comportat que les piràmides trenquessin de manera inesperada en algun dels experiments.

Malgrat els resultats no han estat els millors possibles, aquest primer contacte amb els materials polimèrics biocompatibles amb l'ISF ha aportat nou coneixement sobre el comportament d'aquests. S'ha demostrat, tal i com s'havia comprovat amb els polímers no biocompatibles, que la velocitat de rotació fa que la força necessària per deformar es redueixi un 30% aproximadament en el cas de l'UHMWPE i en un 20% per la PCL. També s'ha pogut apreciar el gran efecte que té la recuperació elàstica en els dos materials ja que l'alçada final era força inferior a l'esperada (veure Figura 3.4) i perquè l'UHMWPE no respectava la geometria teòrica.

El que es podria fer de cares al futur és ampliar el disseny d'experiments tot introduint nous paràmetres de procés, com poden ser el diàmetre de l'eina o el gruix de la xapa, per tal d'ampliar el coneixement respecte aquests dos materials.

Finalment, i com a tancament del treball, es mostra la Taula 5.3 amb una ampliació de la taula d'especificacions descrita a l'apartat 1.3. que indica si aquestes s'han complert correctament o no.

Taula 5.3 Taula d'especificacions actualitzada

Categoria	Descripció	R/C	
Objectiu	Demostrar la viabilitat d'utilitzar polímers biocompatibles en <i>Single Point Incremental Forming</i> .	R	✓
Recursos	Centre de mecanitzat Kondia HS-1000 adaptat per a aquesta tecnologia.	R	✓
	Obtenció de dades de força amb la taula dinamomètrica Kistler 9257B.	R	✓
	Prendre imatges de temperatura durant el procés de deformació amb càmera termogràfica IRBIS ImageIR 3300.	R	✓
	Obtenció de dades de rugositats superficials amb el rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV1000.	R	✓
	Dibuix dels perfils de les piràmides fent ús de la màquina de coordenades Mitutoyo model Crysta-Apex C544.	C	✓
Mides	Geometria de les piràmides igual per a cada un dels experiments. Les mides s'especifiquen a l'apartat 2.1. Geometria.	R	✓
	Les mides de les xapes de partida han d'adequar-se al sistema de fixació.	R	✓
Material	Làmines de PCL	R	✓
	Làmines de UHMWPE.	R	✓
	Lubricant Houghton TD-52.	R	✓
	Optimitzar l'ús del lubricant.	C	✓
Eines	Eina de punta esfèrica de 10mm de diàmetre.	R	✓
	Claus angleses i allen pel muntatge del suport i pel canvi de làmina.	R	✓
	Peu de rei per a diverses mesures.	R	✓
Deformació	Obtenir el nombre de peces necessari pel disseny d'experiments sense importar l'ordre en què es fabriquen.	R	✓
	Control continu de la xapa durant el procés de deformació per possibles parades d'emergència.	R	✓
	Repetir els experiments que presentin dades atípiques o gràfiques il·legibles.	R	✓
Resultats	Fer anàlisi estadística ANOVA i construir superfícies de resposta per predir resultats.	R	✓
	Optimitzar els paràmetres de procés.	C	✗
Termini	Lliurament del treball a la convocatòria de Juny de 2015.	R	✓
Costos	Minimitzar el cost del material.	R	✓
Altres	Facilitar l'ordre i la comprensió dels resultats per a una possible ampliació del disseny d'experiments.	R	✓

6. Bibliografia

- Aerens, R., Eyckens, P., Van Bael, A., Duflou, J.R., (2010). Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(9-12), pp.969-982.
- Ambrogio, G., Denapoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., & Muzzupappa, M. (2005). Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, 156-162.
- Ambrogio, G., Filice, L., Manco, G.L. (2008) Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 257-260.
- Bagudanch, I. (2011). Disseny dels elements constitutius per adaptar un centre de mecanitzat a la tecnologia ISF. Treball final de carrera.
- Bagudanch, I., Garcia-Romeu, M.L., Centeno, G., Elías-Zúñiga, A., Ciurana, J. (2015). Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. *Journal of materials processing technology*, 219, pp. 221-229.
- Davarpanah, M.A., Mirkouei, A., Yu, X., Malhotra, R., (2015). Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers. *Journal of materials processing technology*, 222, pp, 287-300.
- Duflou, J.R., Lauwers, B., Verbert, J., Gelaude, F., Tunckol, Y. (2005). Medical application of single point incremental forming: Cranial plate manufacturing. *Virtual Modelling and Rapid Manufacturing - Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* , pp. 161-166
- Fiorentino, A., Marzi, R., Ceretti, E., (2012). Preliminary results on Ti incremental sheet forming (ISF) of biomedical devices: biocompatibility, surface finishing and treatment. *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol. 5, No. 1, pp.36-45.
- Franzen, V., Kwiatkowski, L., Martins, P.A.F. & Tekkaya, A.E. (2008), Single point incremental forming of PVC, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 1, pp. 462-469.
- Le, V.S., Ghiotti, A. & Lucchetta, G. (2008), Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials, *Proceedings of the 11th ESAFORM Conference on Material Forming*.
- Oleksik, V., Pascu, A., Deac, C., Fleaca, R., Roman, M., Bologa, O. (2010). The influence of geometrical parameters on the incremental forming process for knee implants analyzed by numerical simulation. *AIP Conference Proceedings* 1252 , pp. 1208-1215.
- Reddy, N.V., Lingam. R., Cao, J. (2014). Incremental metal forming processes in manufacturing. *Handbook of manufacturing engineering and technology*, pp. 411-452.

Tanaka, S., Nakamura, T., Hayakawa, K., Nakamura, H., Motomura, K. (2007). Residual stress in sheet metal parts made by incremental forming process. AIP Conference Proceedings 908 , pp. 775-780

Pàgines web:

<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3363.htm> (consultada el febrer de 2015)

<http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics/how-high-should-r-squared-be-in-regression-analysis> (consultada el juny de 2015)

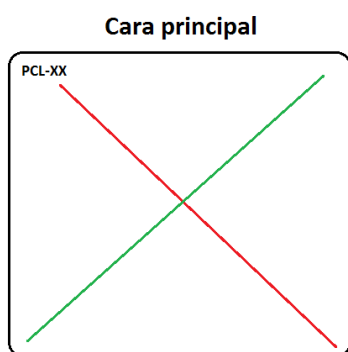
<http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics/multiple-regression-analysis-use-adjusted-r-squared-and-predicted-r-squared-to-include-the-correct-number-of-variables>
(consultada el juny de 2015)

https://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-082714-135653/unrestricted/How_to_Use_Minitab_4_Design_of_Experiments.pdf (consultada el juny de 2015)

ANNEXOS

A. Anàlisi de les xapes de partida de PCL

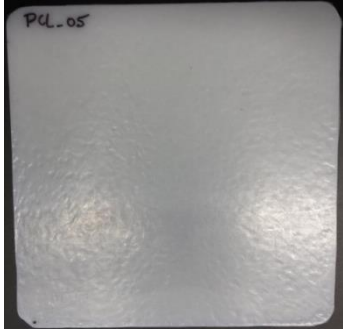
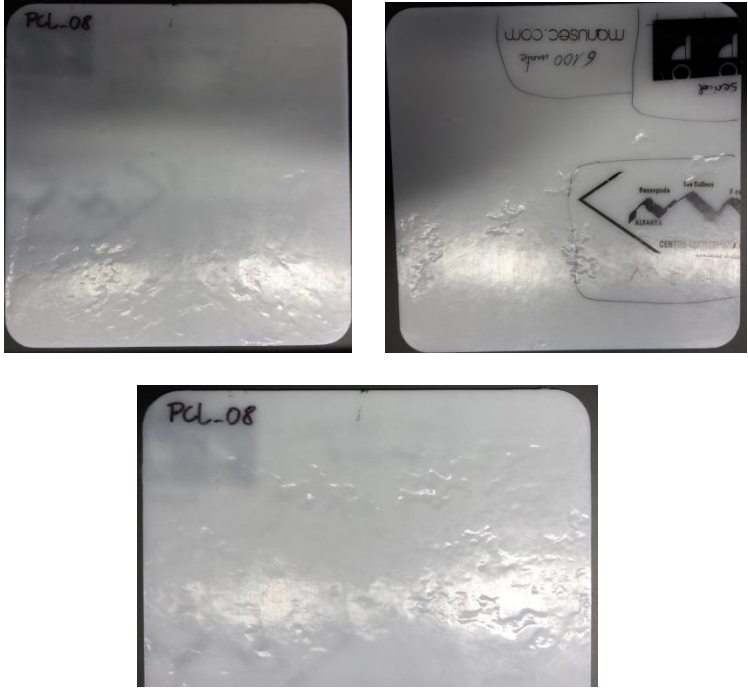
Per tal d'evitar futurs imprevistos s'ha fet una anàlisi de les xapes que no tenien un acabat superficial del tot correcte. S'ha construït una taula amb la descripció de cadascuna de les plaques de Policaprolactona (PCL). Per poder seguir millor l'anàlisi es mostren els següents detalls:

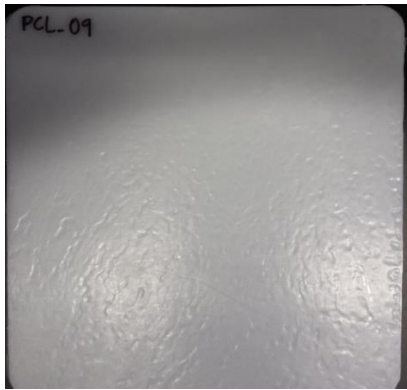



La cara principal és la que conté la codificació de la xapa. La secundària és l'altra i que normalment serà més llisa.

- Diagonal principal
- Diagonal secundària

Material	Nº de xapa	Observacions
PCL	03	<p>La superfície no és del tot llisa però és uniforme per tota la xapa. S'observa on han fos els "pellets" però no hi ha defectes grans.</p>
PCL	04	<p>La xapa és molt llisa al llarg de la diagonal secundària. Per sota d'aquesta s'observa una rugositat important juntament amb alguna cavitat puntual. A la part inferior esquerra s'observen també cavitats més pronunciades que les anteriors.</p>

PCL	05	<p>L'acabat d'aquesta xapa és força llis però també és fàcil identificar on hi havia els "pellets" a l'hora de fondre. Els dos defectes més grans es troben a l'extrem dret inferior i a l'esquerre inferior.</p> 
PCL	08	<p>La superfície és molt llisa al 50% de la xapa. La resta conté defectes d'una considerable longitud (10-60mm) en comptes de cavitats puntuals com s'havia observat en peces anteriors. Conté grans defectes a la cara secundària de la xapa, cosa que no s'havia observat en cap de les anteriors ja que eren perfectament llises a simple vista.</p> 

PCL	09	<p>La superfície és rugosa a tota la xapa. Els defectes s'allarguen seguint una tendència segons la diagonal secundària i s'observen unes irregularitats majors al llarg de l'extrem dret.</p> 
PCL	10	<p>Aquesta xapa ha estat codificada per la cara secundària (la més llisa) per la qual cosa els defectes es troben a l'altra. De manera semblant a la xapa PCL-09, els defectes s'allarguen al llarg de la diagonal secundària però en aquest cas són més pronunciats. S'observen dues zones molt llises i d'una mida considerable a la part inferior d'aquesta cara.</p> 

Observacions generals:

Les xapes que contenen una major part de la superfície completament llisa presenten defectes majors a la resta d'aquesta. Per contra, els defectes d'aquelles que són més rugoses són menys considerables.

Mesura de rugositats

Per poder analitzar millor les xapes i els seus defectes s'ha optat per realitzar un estudi sobre les rugositats superficials d'aquestes. Les mesures s'han pres al centre de cada una d'elles i a les zones on hi havia les imperfeccions més importants. Aquestes

mesures s'han pres fent ús del rugosímetre "Mitutoyo SurfTest SV1000", explicat en detall a l'apartat 2.5.

A continuació es mostra una taula amb les diferents mesures de rugositats:

Taula A.1 Rugositats superficials de les xapes de partida de PCL

Nº de xapa	Posició de la mesura	Ra (μm)
PCL-03	a) Centre de la xapa	0,307
	b) Defecte de l'extrem superior dret	0,706
PCL-04	a) Centre de la xapa	0,324
	b) Defecte cavitat inferior esquerra	6,789
PCL-05	a) Centre de la xapa	0,335
	b) Extrem dret	0,681
	c) Extrem esquerra	1,000
PCL-08	a) Centre de la xapa	0,220
	b) Extrem superior esquerra	0,903
PCL-09	a) Centre de la xapa	0,565
	b) Extrem inferior esquerra	0,648
PCL-10	a) Cara secundària	0,246
	b) Centre de la xapa	0,581
	c) Part molt llisa de la cara principal	0,252
	d) Defecte important	1,449
PCL-11	a) Centre de la xapa	0,222
	b) Extrem inferior dret	0,568

La xapa PCL-11 correspon a una de les que es va fabricar de manera diferent a les anteriors i que, en principi, ha de tenir un millor acabat. La fabricació d'aquesta està explicada a l'apartat 2.2.2. Les diferències entre els dos tipus de fabricació de xapa són la pressió aplicada i el temps de permanència d'aquesta. Com es pot apreciar, aquesta darrera xapa també presenta una rugositat mitjana major en els defectes però és inferior a la dels altres.

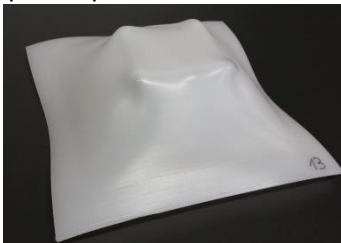
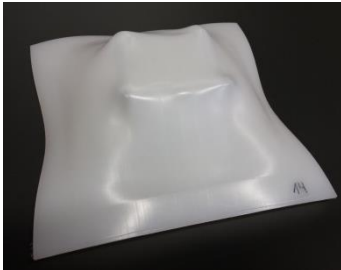

Un cop analitzats aquests resultats es va decidir que les xapes que s'utilitzarien per a deformar no serien cap de les de la Taula A.1 (exceptuant la PCL-11) perquè contenen més defectes i rugositats superiors. Per tal que els resultats de futures proves no es veiessin alterats, aquestes es van descartar.



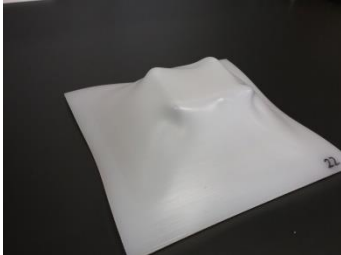

B. Observacions de les piràmides

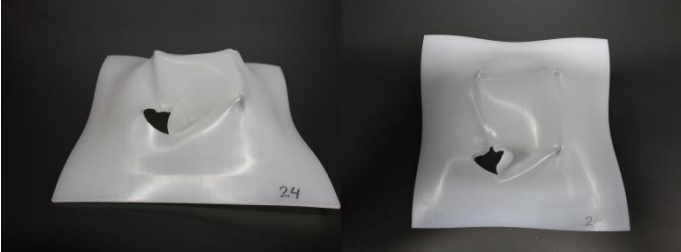
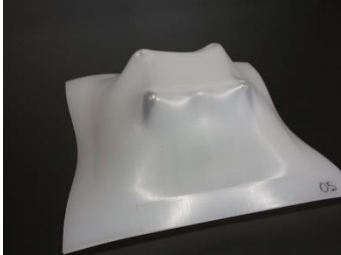

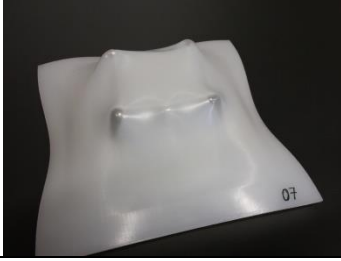
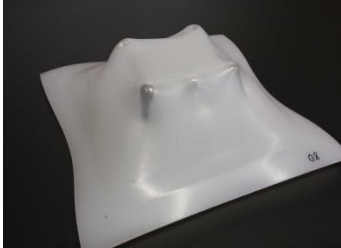
En aquest annex s'inclou una petita descripció de cada una de les piràmides fabricades, tant pel material Policaprolactona (PCL) com per l' "Ultra-High-molecular-weight polyethylene" (UHMWPE). També s'inclouen fotografies d'aquestes peces per ajudar a comprendre la descripció i per comprovar els defectes i les peculiaritats descrites.


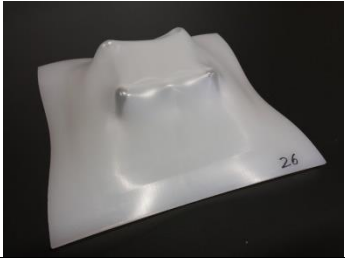
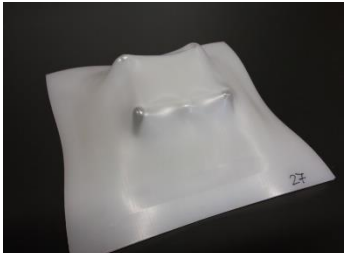
B.1 UHMWPE

Taula B.1 Descripció de totes les peces d'UHMWPE

Experiment	Observacions
1	<p>S'observa molt poca torsió. La piràmide no té les arestes ben definides i a les cantonades s'aprecien uns pics importants.</p> 
2	<p>Aquesta peça és molt semblant a la de l'experiment 1 però té un acabat lleugerament millor en dues de les cantonades.</p> 
3	<p>La peça va trencar en una cantonada. La fractura es va propagar a causa de la velocitat d'avanç de l'eina. Les cantonades són més transparents i contenen diverses arrugues de mida petita. Les arestes no estan ben definides.</p> 


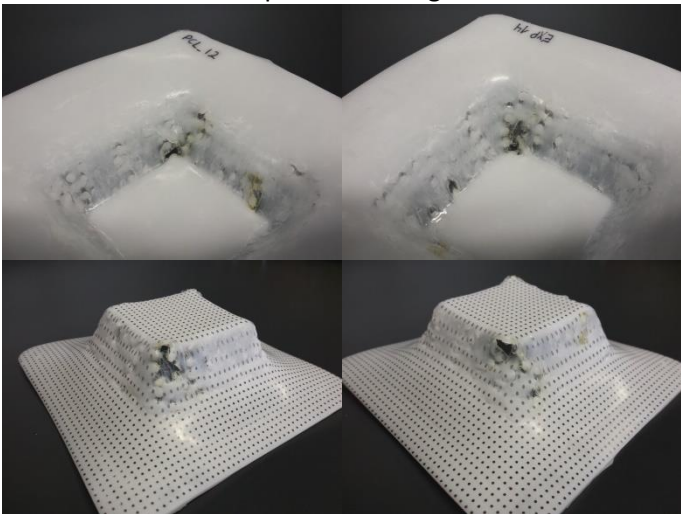
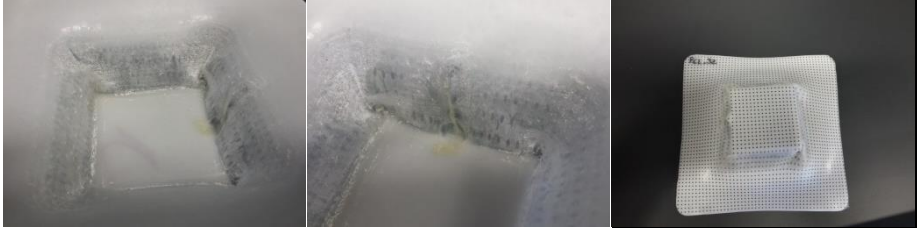
<p>4</p>	<p>La fractura d'aquesta peça també va començar per una cantonada però diferent a la de l'experiment 3. La fractura també s'ha allargat pel mateix motiu. Pel que fa les cantonades, aquestes presenten petites arrugues però en més quantitat.</p> 
<p>5</p>	<p>En aquesta peça no s'hi aprecien arrugues. El cos de la piràmide està lleugerament torsionat i la definició de les arestes no és la millor.</p> 
<p>6</p>	<p>Acabat molt semblant al de l'experiment 5.</p> 
<p>7</p>	<p>Presenta la fractura al llarg d'una aresta degut a l'avanç de l'eina. Aquesta també ha començat per una cantonada i s'ha engrandit amb el pas de l'eina. A diferència de les altres peces que han trencat, aquesta gairebé no té arrugues a les cantonades, fet que s'havia donat en els altres. S'observa una mica de torsió i les arestes no s'aprecien amb claredat.</p> 

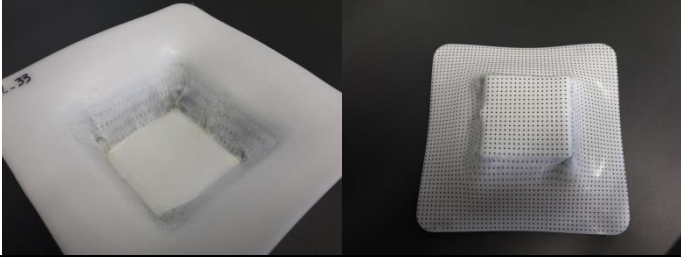
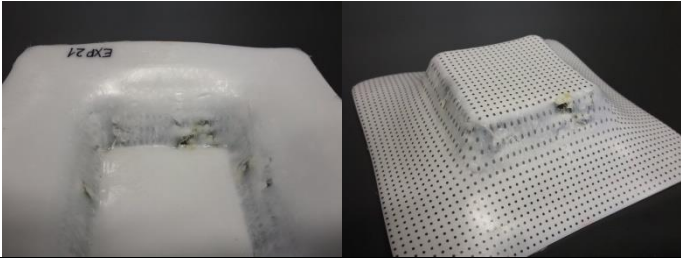
<p>8</p>	<p>La fractura només ha tingut lloc en una cantonada de la piràmide. La forma final d'aquesta part és molt diferent ja que la recuperació elàstica va fer que l'eina arrossegues part del material fins el punt que es pot apreciar la cavitat d'aquesta. La resta d'arestes estan força ben definides i els extrems presenten poques arrugues.</p> 
<p>9</p>	<p>Les cantonades són més transparents que la resta de material i presenten arrugues. S'aprecia una mica de torsió i la base petita de la piràmide no està ben definida.</p> 
<p>10</p>	<p>Acabat molt semblant al de l'experiment 9.</p> 
<p>11</p>	<p>Acabat molt semblant al de l'experiment 9.</p> 
<p>12</p>	<p>Acabat molt semblant al de l'experiment 9.</p> 

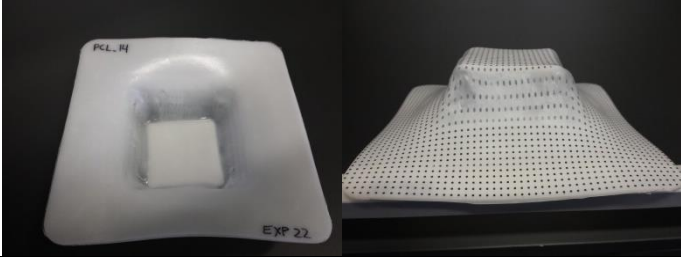
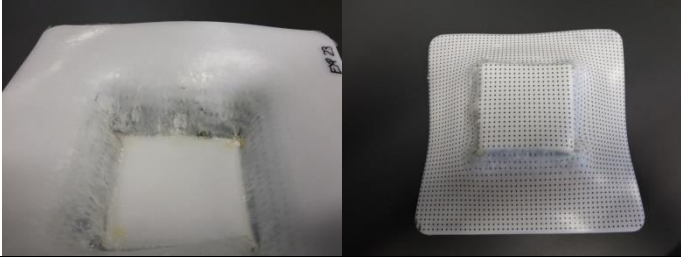
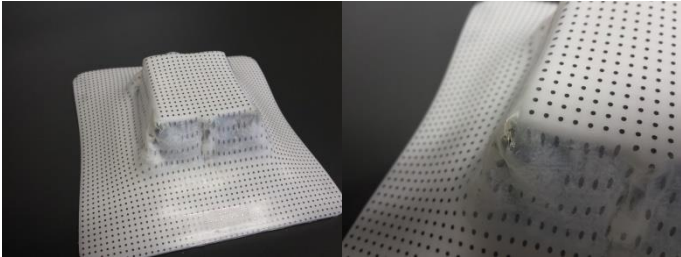
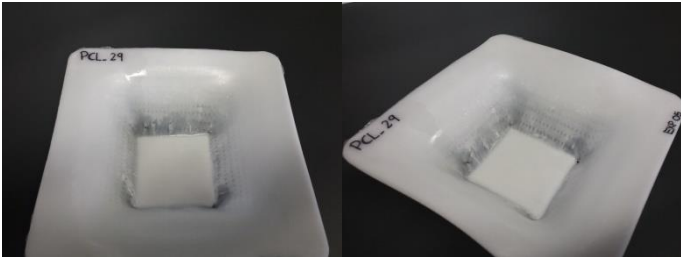
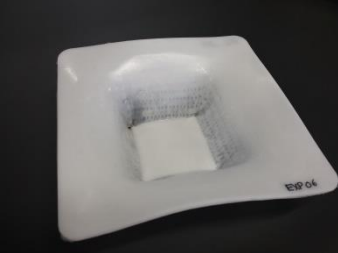
<p>13</p>	<p>La peça mostra petites transparències als extrems i, aquests, també s'arruguen. La base petita de la piràmide no està gaire ben definida i es troba una mica torsionada.</p> 
<p>14</p>	<p>Acabat molt semblant al de l'experiment 13.</p> 
<p>15</p>	<p>Acabat molt semblant al de l'experiment 13.</p> 

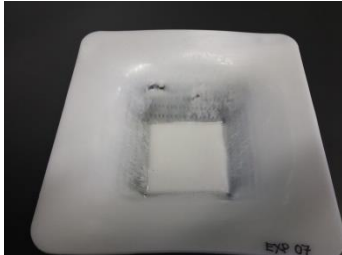
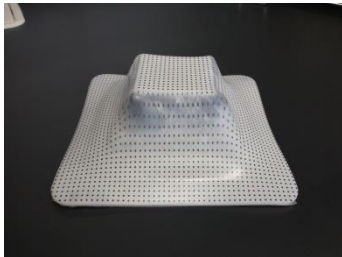
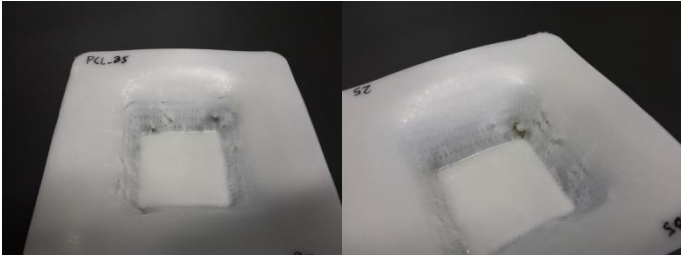
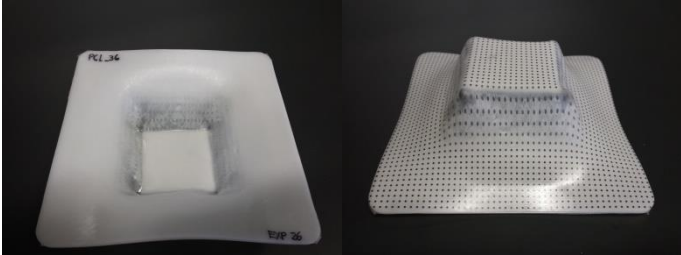
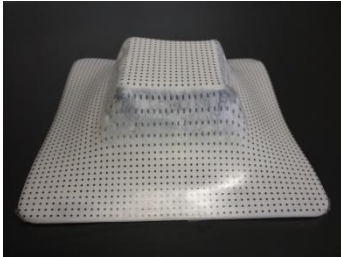
B.2 PCL

Taula B.2 Descripció de totes les peces de PCL

Experiment	
1	<p>S'aprecia una gran quantitat de pellets a les parets de la piràmide. La fractura ha tingut lloc en una cantonada. Conté un defecte important que no ha arribat a ser fractura ja que s'ha creat una pel·lícula de material.</p> 
2	<p>En aquesta peça s'observen molts pellets mal fosos durant el procés de fabricació de la xapa. Una característica interessant d'aquest experiment és que conté 2 fractures. Una és més sobtada i l'altra acaba trencant la pel·lícula de material que s'havia format durant el procés de deformació. La base petita de la piràmide no es veu torsionada respecte la base gran.</p> 
3	<p>Aquest experiment permet veure com el material ha fos durant la deformació. Sobretot s'aprecia en el punt on l'eina canviava el sentit de gir ja que és on roman més temps. La peça es veu molt torsionada i presenta unes arrugues als extrems de la piràmide i una altra al llarg del descens de l'eina. No apareixen defectes de fabricació. Les parets són molt rugoses.</p> 
4	<p>El resultat d'aquest experiment és semblant al de l'experiment 3 però té un acabat molt millor. Les zones on el material ha fos s'han reduït molt i les parets interiors no són tan rugoses. També han aparegut arrugues als extrems però no són tan exagerades.</p>

			
5		<p>La fractura d'aquesta peça no es troba en un extrem, sinó en una aresta. Aquesta és deguda a un defecte de fabricació ja que en aquest cas, n'apareixen més d'un i d'una mida considerable. No ha aparegut gaire torsió perquè no s'ha assolit l'alçada màxima.</p>	

<p>6</p>	<p>Tot i que aquesta peça ha arribat al 100% de l'alçada, es pot observar com no és tan alta com les altres que també havien arribat a l'alçada màxima. Es veu força torsió i només té un defecte important.</p> 
<p>7</p>	<p>El material també ha fos en la producció d'aquesta peça. En aquest cas, la peça ha trencat a prop del punt de descens de l'eina. Les arrugues a les cantonades també són presents i la rugositat a les parets interiors és apreciable. Conté pocs defectes de fabricació de la xapa.</p> 
<p>8</p>	<p>Aquesta peça ha trencat justament a l'altura màxima. La fractura és molt petita i es troba localitzada en una cantonada. Les arrugues són més importants que en els altres casos.</p> 
<p>9</p>	<p>La torsió és major en aquesta peça. S'aprecien uns 10 defectes causats pels pellets i una ruptura en un dels extrems. La fractura ha tingut lloc en una cantonada de la piràmide.</p> 
<p>10</p>	<p>Tot i que l'acabat és molt similar al de l'experiment 9, aquest no presenta tants defectes. La fractura també s'ha donat en un extrem i és més gran que l'anterior.</p> 

<p>11</p>	<p>L'acabat és molt semblant al dels experiments 9 i 10. La gran diferència és que aquest no va trencar i que presenta dos defectes importants molt propers en una de les parets. També presenta algun defecte de menor importància.</p> 
<p>12</p>	<p>La forma d'aquesta peça és com la de l'experiment 11. No presenta defectes importants.</p> 
<p>13</p>	<p>La forma de la piràmide és molt correcta. La torsió és mínima i les arestes es veuen ben definides. Aquesta peça conté molts pellets mal fosos durant el procés de fabricació de la làmina. Aquests defectes han causat la ruptura d'aquesta peça, que té lloc en una cantonada de la piràmide.</p> 
<p>14</p>	<p>L'acabat és molt correcte. La base petita de la piràmide es veu poc torsionada respecte la base gran i les cantonades d'aquesta són poc més transparents que la resta del material. No s'aprecien defectes importants en la peça final.</p> 
<p>15</p>	<p>L'acabat és molt semblant al de l'experiment 14 però en aquest cas els extrems són més transparents. També conté un defecte important.</p> 

C. Resultats preliminars a l'anàlisi estadístic

En aquest annex s'inclouran tots aquells resultats preliminars que s'han obtingut amb el programa Minitab v16. El motiu pel qual es fa aquest estudi és perquè, d'entrada, no es coneixen quins paràmetres són significatius i quins no. Un cop coneguts aquests es podrà simplificar el model per tal d'obtenir uns millors resultats, concretament el que s'aconsegueix és un increment del coeficient R^2 ajustat i predit. Els models definitius són els que es presenten en els diferents subapartats de l'apartat 3 Resultats i discussió.

C.1. UHMWPE

C.1.1. Alçada

Els resultats de l'ANOVA que s'han obtingut es mostren a la Taula C.1. D'altra banda, els valors dels diferents coeficients R^2 són:

"*R-cuad. (pred.)=62.87% R-cuad. (ajusted)=93.50%*".

Les superfícies de resposta obtingudes tenint en compte els models lineal, quadràtic i d'interacció són les següents:

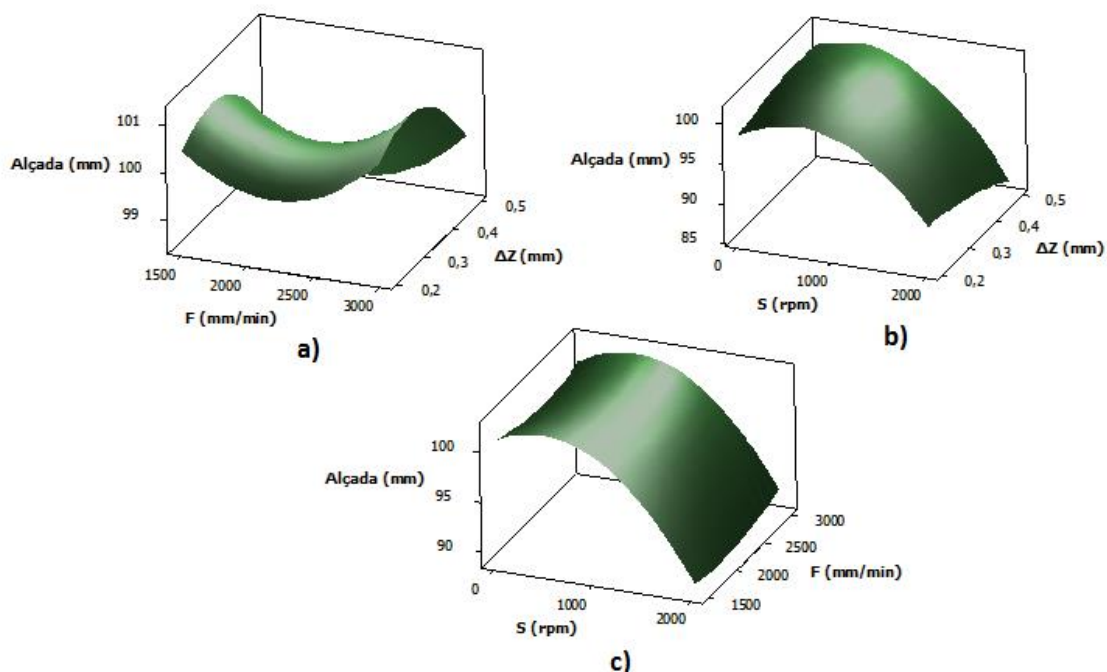


Figura C.1 Superfícies de resposta per l'alçada. a) S=1000rpm b) F=2250mm/min c) Δz=0.35mm

Taula C.1 Taula de valors generada pel Minitab per l'alçada

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	9	354.177	354.177	39.353	23.38	0.001	S
Lineal	3	228.582	228.582	76.194	45.27	0.000	S
S (rpm)	1	225.265	225.265	225.265	133.85	0.000	S
F (mm/min)	1	0.336	0.336	0.336	0.20	0.674	NS
Δz (mm)	1	2.981	2.981	2.981	1.77	0.241	NS
Quadràtic	3	116.472	116.472	38824.000	23.07	0.002	S
S² (rpm)	1	109.781	108.575	108.575	64.52	0.000	S
F²(mm/min)	1	3.603	3.088	3.088	1.83	0.234	NS
Δz² (mm)	1	3.088	3.088	3.088	1.83	0.234	NS
Interacció	3	9.122	9.122	3.041	1.81	0.263	NS
S (rpm)*F (mm/min)	1	0.672	0.672	0.672	0.40	0.555	NS
S (rpm)* Δz (mm)	1	8.451	80451.000	8.451	5.02	0.075	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	0.000	0.000	0.000	0.00	1.000	NS
Error residual	5	8.415	80415.000	1.683			
Falta d'ajust	3	8.415	8.415	2.805	*	*	
Error pur	2	0.000	0.000	0.000			
Total	14	362.591					

Observant la columna corresponent a la qualificació de Significatiu/No Significatiu es pot veure com molts elements, entre ells els paràmetres de procés F i Δz, són No Significatius. Per tal de simplificar el model i poder obtenir-ne un de millor el que es fa és prescindir d'aquests termes NS. Si es dona el cas que un paràmetre és NS però el terme quadràtic o d'interacció corresponent a ell és S no es podrà prescindir d'aquest. El model definitiu es mostra a l'apartat 3.1.1.

C.1.2. Força màxima

De la mateixa manera que s'ha fet amb l'alçada es fa l'estudi preliminar per a la força màxima. Els valors dels diferents coeficients R^2 són:

“ R -cuad. (pred.)=73.64% R -cuad. (ajusted)=92.35%”.

Les superfícies de resposta obtingudes tenint en compte els models lineal, quadràtic i d'interacció són les següents:

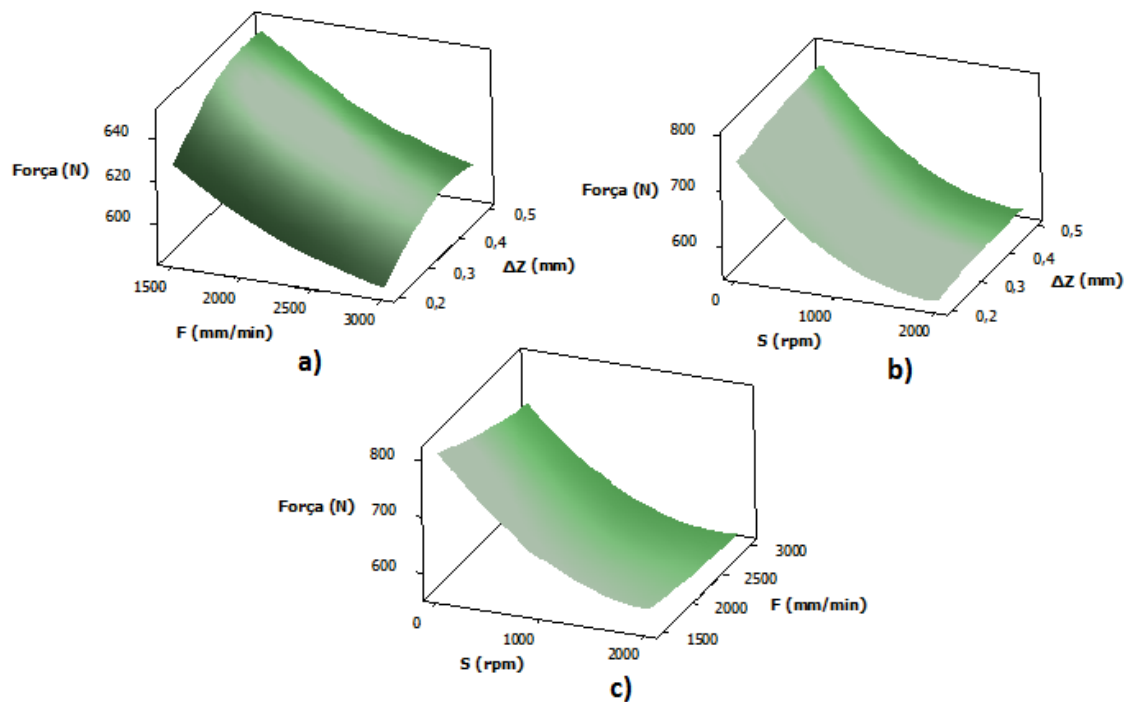


Figura C.2 Superfícies de resposta per la força màxima. a) $S=1000\text{rpm}$ b) $F=2250\text{mm/min}$ c) $\Delta z=0.35\text{mm}$

Taula C.2 Taula de valors generada pel Minitab per la força màxima

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	9	93315.7	93315.7	10368.4	19.79	0.002	S
Lineal	3	81664.2	81664.2	27221.4	51.95	0	S
S (rpm)	1	76979.7	76979.7	76979.7	146.91	0	S
F (mm/min)	1	3979.8	3979.8	3979.8	7.60	0.04	S
Δz (mm)	1	704.7	704.7	704.7	1.34	0.299	NS
Quadràtic	3	11024.5	11024.5	3674.8	7.01	0.031	S
S² (rpm)	1	10537.7	10368.8	10368.8	19.79	0.007	S
F²(mm/min)	1	207.4	170.9	170.9	0.33	0.593	NS
Δz^2 (mm)	1	279.4	279.4	279.4	0.53	0.498	NS
Interacció	3	626.9	626.9	209.0	0.40	0.76	NS
S (rpm)*F (mm/min)	1	570.4	570.4	570.4	1.09	0.345	NS
S (rpm)* Δz (mm)	1	47.3	47.3	47.3	0.09	0.776	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	9.2	9.2	9.2	0.02	0.9	NS
Error residual	5	2620.0	2620.0	524.0			
Falta d'ajust	3	1410.1	1410.1	470.0	0.78	0.605	NS
Error pur	2	1209.9	1209.9	604.9			
Total	14	95935.7					

Es simplificarà el model de la mateixa manera que s'ha explicat en l'apartat anterior corresponent a l'alçada. El model definitiu es mostra a l'apartat 3.1.2.

C.1.3. Temperatura màxima

Es segueix el mateix procediment que en el cas de l'alçada i la força màxima. Els valors dels diferents coeficients R^2 són:

“ R -cuad. (pred.)=0.00% R -cuad. (ajusted)=72.26%”.

Les superfícies de resposta obtingudes tenint en compte els models lineal, quadràtic i d'interacció són les següents:

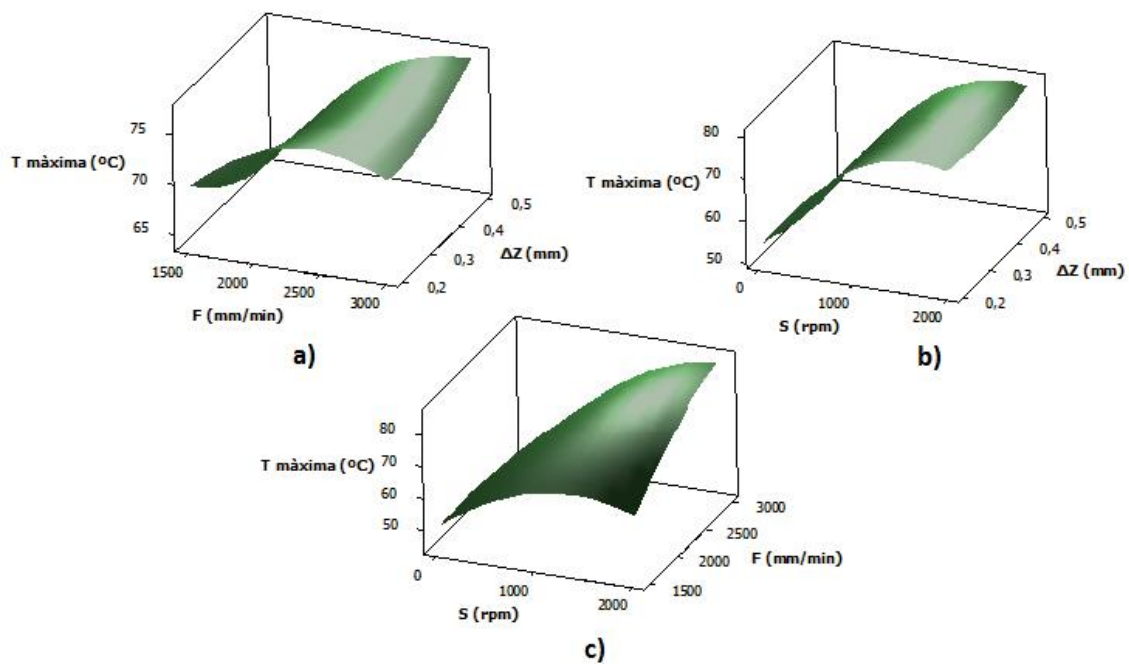


Figura C.3 Superfícies de resposta per la temperatura màxima. a) S=1000rpm b) F=2250mm/min c) $\Delta z=0.35$ mm

Taula C.3 Taula de valors generada pel Minitab per la temperatura màxima

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	9	2118.92	2118.92	235.44	5.05	0.045	S
Lineal	3	1562.32	1562.32	520.77	11.18	0.012	S
S (rpm)	1	1420.98	1420.98	1420.98	30.50	0.003	S
F (mm/min)	1	139.78	139.78	139.78	3.00	0.144	NS
Δz (mm)	1	1.57	1.57	1.57	0.03	0.862	NS
Quadràtic	3	341.25	341.25	113.75	2.44	0.180	NS
S² (rpm)	1	288.34	298.96	295.96	6.35	0.053	NS
F²(mm/min)	1	47.72	45.05	45.05	0.97	0.371	NS
Δz^2 (mm)	1	5.20	5.20	5.20	0.11	0.752	NS
Interacció	3	215.34	215.34	71.78	1.54	0.313	NS
S (rpm)*F (mm/min)	1	187.83	187.83	187.83	4.03	0.101	NS
S (rpm)* Δz (mm)	1	4.91	4.91	4.91	0.10	0.759	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	22.61	22.61	22.61	0.49	0.517	NS
Error residual	5	232.98	232.98	46.60			
Falta d'ajust	3	157.45	157.45	52.48	1.39	0.444	NS
Error pur	2	75.52	75.52	37.76			
Total	14	2351.90					

El model definitiu es mostra a l'apartat 3.1.3.

C.1.4. Rugositat superficial

Es segueix el mateix procediment que en el cas de l'alçada, força màxima i temperatura màxima. Els valors dels diferents coeficients R^2 són:

“ R -cuad. (pred.)=0.00% R -cuad. (ajusted)=7.58%”.

Les superfícies de resposta obtingudes tenint en compte els models lineal, quadràtic i d'interacció són les següents:

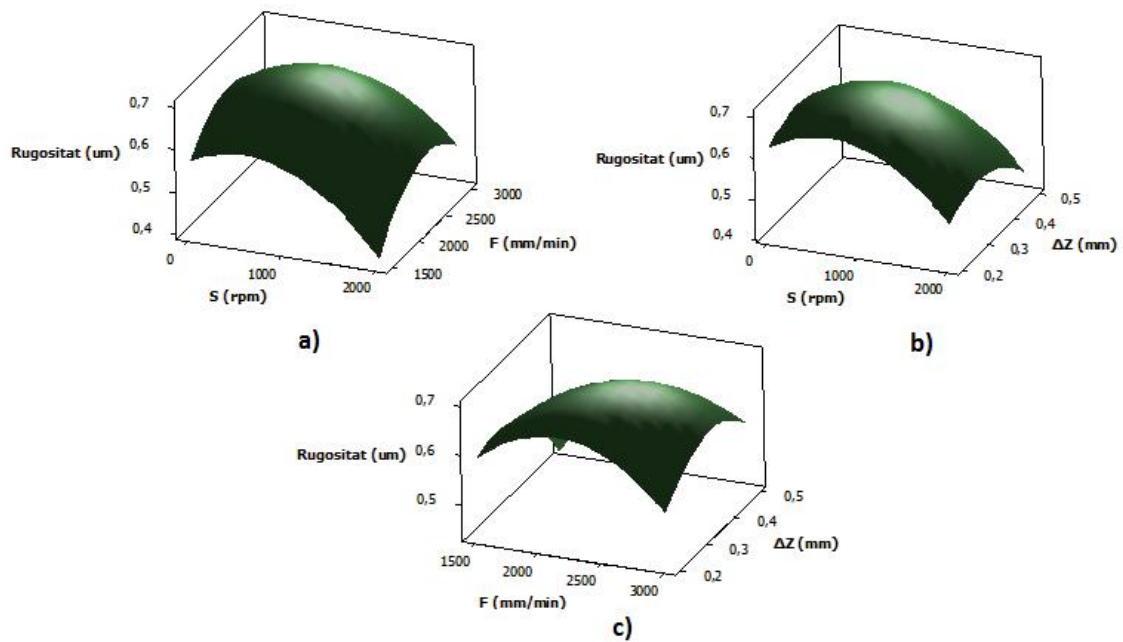


Figura C.4 Superfícies de resposta per la rugositat superficial. a) $\Delta z=0.35\text{mm}$ b) $F=2250\text{mm/min}$ c) $S=1000\text{rpm}$

Taula C.4 Taula de valors generada pel Minitab per la rugositat superficial

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	9	0.115953	0.115953	0.012884	1.13	0.472	NS
Lineal	3	0.037557	0.037557	0.012519	1.10	0.432	NS
S (rpm)	1	0.027495	0.027495	0.027495	2.41	0.182	NS
F (mm/min)	1	0.002312	0.002312	0.002312	0.20	0.672	NS
Δz (mm)	1	0.007750	0.007750	0.007750	0.68	0.448	NS
Quadràtic	3	0.069401	0.069401	0.023134	2.02	0.229	NS
S² (rpm)	1	0.026197	0.033294	0.033294	2.91	0.149	NS
F² (mm/min)	1	0.026896	0.030046	0.030046	2.63	0.166	NS
Δz^2 (mm)	1	0.016308	0.016308	0.016308	1.43	0.286	NS
Interacció	3	0.008994	0.008994	0.002998	0.26	0.850	NS
S (rpm)*F (mm/min)	1	0.001936	0.001936	0.001936	0.17	0.698	NS
S (rpm)* Δz (mm)	1	0.000002	0.000002	0.000002	0.00	0.989	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	0.007056	0.007056	0.007056	0.62	0.468	NS
Error residual	5	0.057129	0.057129	0.011426			
Falta d'ajust	3	0.030288	0.030288	0.010096	0.75	0.614	NS
Error pur	2	0.026841	0.026841	0.013420			
Total	14	0.173082					

El model definitiu es mostra a l'apartat 3.1.4.

C.2. PCL

C.1.1. Alçada

S'ha seguit el mateix procediment que amb l'UHMWPE per obtenir els resultats de l'ANOVA. Els valors dels diferents coeficients R^2 són:

"R-cuad. (pred.)=0.00% R-cuad. (ajusted)=0.00%".

Les superfícies de resposta obtingudes tenint en compte els models lineal, quadràtic i d'interacció són les següents:

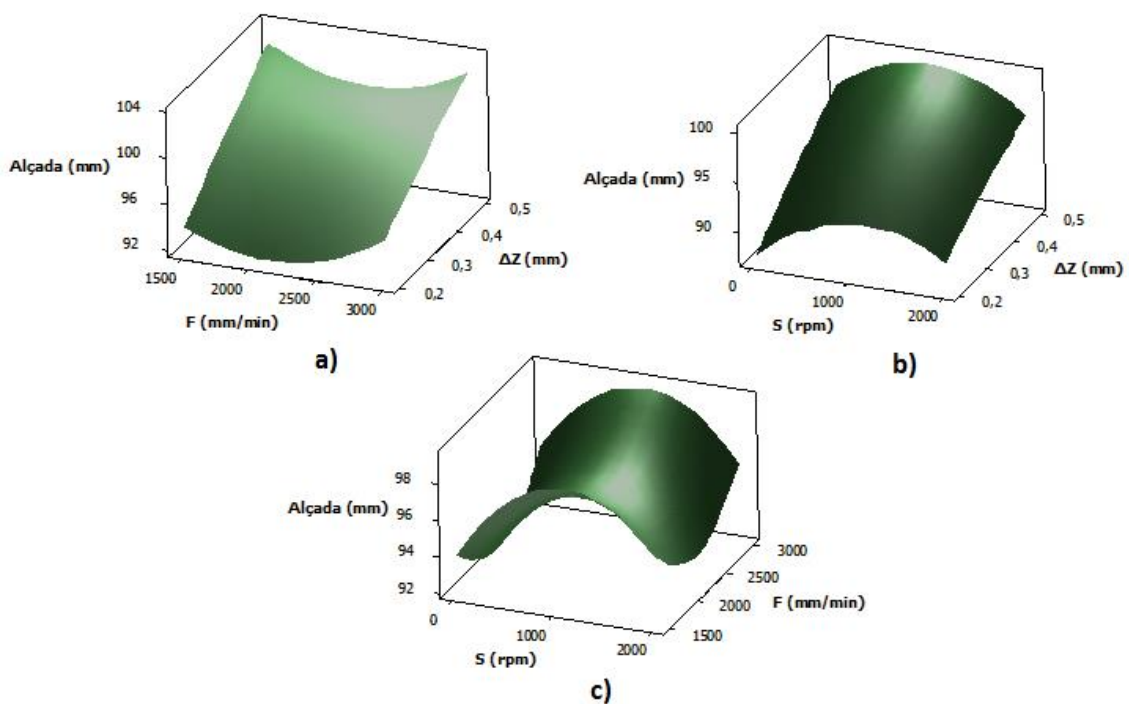


Figura C.5 Superfícies de resposta per l'alçada. a) S=1000rpm b) F=2250mm/min c) $\Delta z=0.35$ mm

Taula C.5 Taula de valors generada pel Minitab per l'alçada

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	9	207.331	207.331	23.037	0.61	0.755	NS
Lineal	3	129.511	129.511	43.170	1.14	0.416	NS
S (rpm)	1	2.862	20862.000	2.862	0.08	0.494	NS
F (mm/min)	1	1.609	1.609	1.609	0.04	0.845	NS
Δz (mm)	1	125.041	125.041	125.041	3.31	0.128	NS
Quadràtic	3	75.813	75.813	25.271	0.67	0.606	NS
S² (rpm)	1	52.489	47.955	47.955	1.27	0.311	NS
F² (mm/min)	1	22.727	22.030	22.030	0.58	0.479	NS
Δz^2 (mm)	1	0.598	0.598	0.598	0.02	0.905	NS
Interacció	3	2.007	2.007	0.669	0.02	0.996	NS
S (rpm)*F (mm/min)	1	0.168	0.168	0.168	0.00	0.949	NS
S (rpm)* Δz (mm)	1	1352.000	1.352	1.352	0.04	0.857	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	0.487	0.487	0.487	0.01	0.914	NS
Error residual	5	188.690	188.690	39.738			
Falta d'ajust	3	112.993	112.993	37.664	1.00	0.537	NS
Error pur	2	75.696	75.696	37.848			
Total	14	396.021					

El model definitiu es mostra a l'apartat 3.2.1.

C.2.2. Força màxima

De la mateixa manera que s'ha fet amb l'alçada es fa l'estudi preliminar per a la força màxima. Els valors dels diferents coeficients R^2 són:

“ R -cuad. (pred.)=0.00% R -cuad. (ajusted)=53.18%”.

Les superfícies de resposta obtingudes tenint en compte els models lineal, quadràtic i d'interacció són les següents:

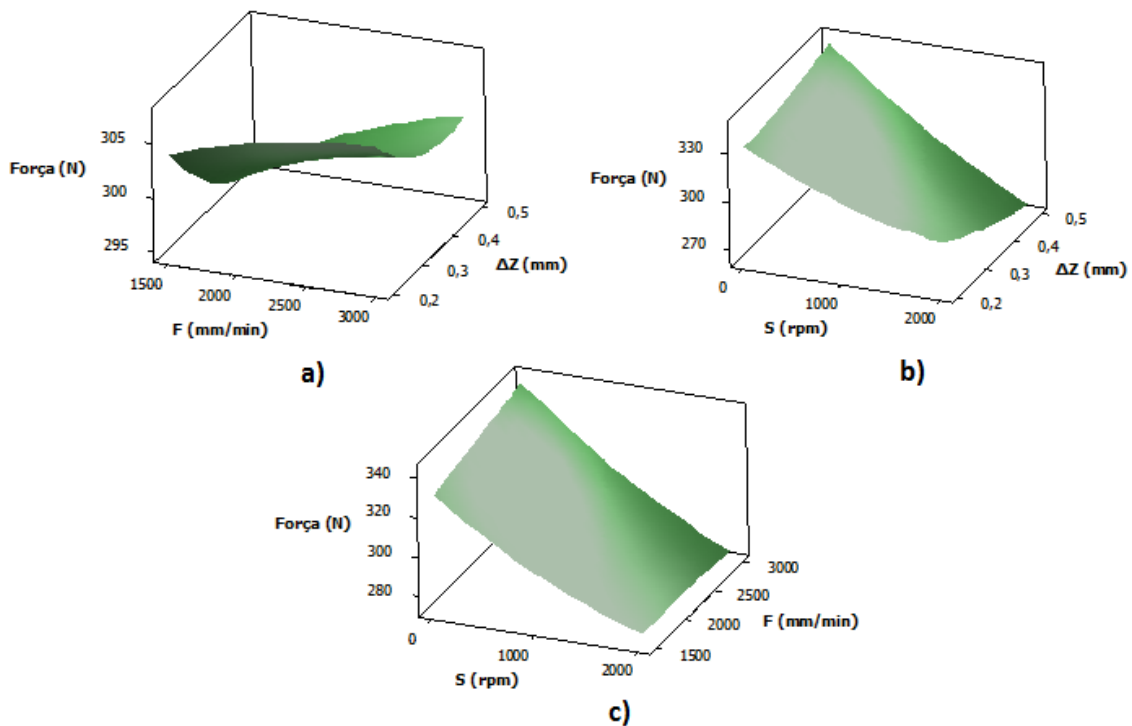


Figura C.6 Superfícies de resposta per la força màxima. a) S=1000rpm b) F=2250mm/min c) $\Delta z=0.35$ mm

Taula C.6 Taula de valors generada pel Minitab per la força màxima

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	9	8260.48	8260.48	917.83	2.77	0.137	NS
Lineal	3	7655.64	7655.64	2551.88	7.71	0.025	S
S (rpm)	1	7492.59	7492.59	7492.59	22.65	0.005	S
F (mm/min)	1	64.16	64.16	64.16	0.19	0.678	NS
Δz (mm)	1	98.88	98.88	98.88	0.30	0.608	NS
Quadràtic	3	131.82	131.82	43.94	0.13	0.936	NS
S² (rpm)	1	110.03	112.74	112.74	0.34	0.585	NS
F² (mm/min)	1	3.83	2.64	2.64	0.01	0.932	NS
Δz^2 (mm)	1	17.96	17.96	17.96	0.05	0.825	NS
Interacció	3	473.02	473.02	157.67	0.48	0.712	NS
S (rpm)*F (mm/min)	1	58.77	58.77	58.77	0.18	0.691	NS
S (rpm)* Δz (mm)	1	410.63	410.63	410.63	1.24	0.316	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	3.63	3.63	3.63	0.01	0.921	NS
Error residual	5	1654.18	1654.18	330.84			
Falta d'ajust	3	599.70	599.70	199.90	0.38	0.782	NS
Error pur	2	1054.48	1054.48	527.24			
Total	14	9914.67					

El model definitiu es mostra a l'apartat 3.2.2.

C.2.3. Temperatura màxima

Es segueix el mateix procediment que en el cas de l'alçada i la força màxima. Els valors dels diferents coeficients R^2 són:

“ R -cuad. (pred.)=0.00% R -cuad. (ajusted)=71.45%”.

Les superfícies de resposta obtingudes tenint en compte els models lineal, quadràtic i d'interacció són les següents:

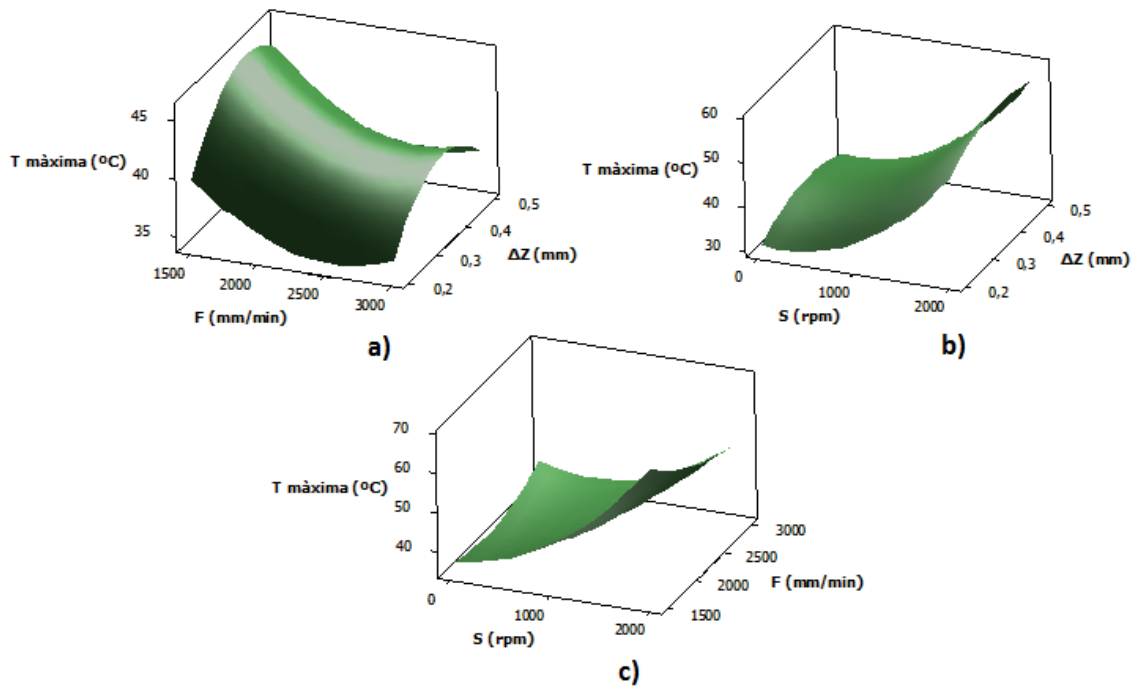


Figura C.7 Superfícies de resposta per la temperatura màxima. a) S=1000rpm b) F=2250mm/min c) Δz=0.35mm

Taula C.7 Taula de valors generada pel Minitab per la temperatura màxima

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	9	1448.87	1448.87	160.99	4.89	0.048	S
Lineal	3	1084.13	1084.13	361.38	10.98	0.012	S
S (rpm)	1	1011.60	1011.60	1011.60	30.74	0.003	S
F (mm/min)	1	54.29	54.29	54.29	1.65	0.255	NS
Δz (mm)	1	18.24	18.24	18.24	0.55	0.490	NS
Cuadrat	3	279.38	279.38	93.13	2.83	0.146	NS
S² (rpm)	1	188.84	183.52	183.52	5.58	0.065	NS
F² (mm/min)	1	37.92	31.16	31.16	0.95	0.375	NS
Δz^2 (mm)	1	52.62	52.62	52.62	4.60	0.262	NS
Interacció	3	85.36	85.36	28.45	0.86	0.517	NS
S (rpm)*F (mm/min)	1	84.09	84.09	84.09	2.56	0.171	NS
S (rpm)* Δz (mm)	1	0.35	0.35	0.35	0.01	0.922	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	0.92	0.92	0.92	0.03	0.874	NS
Error residual	5	164.53	164.53	32.91			
Falta d'ajust	3	148.63	148.63	49.54	6.23	0.141	NS
Error pur	2	15.90	15.90	7.95			
Total	14	1613.40					

El model definitiu es mostra a l'apartat 3.2.3.

C.1.4. Rugositat superficial

Es segueix el mateix procediment que en el cas de l'alçada, força màxima i temperatura màxima. Els valors dels diferents coeficients R^2 són:

“ R -cuad. (pred.)=61.99% R -cuad. (ajusted)=92.79%”.

Les superfícies de resposta obtingudes tenint en compte els models lineal, quadràtic i d'interacció són les següents:

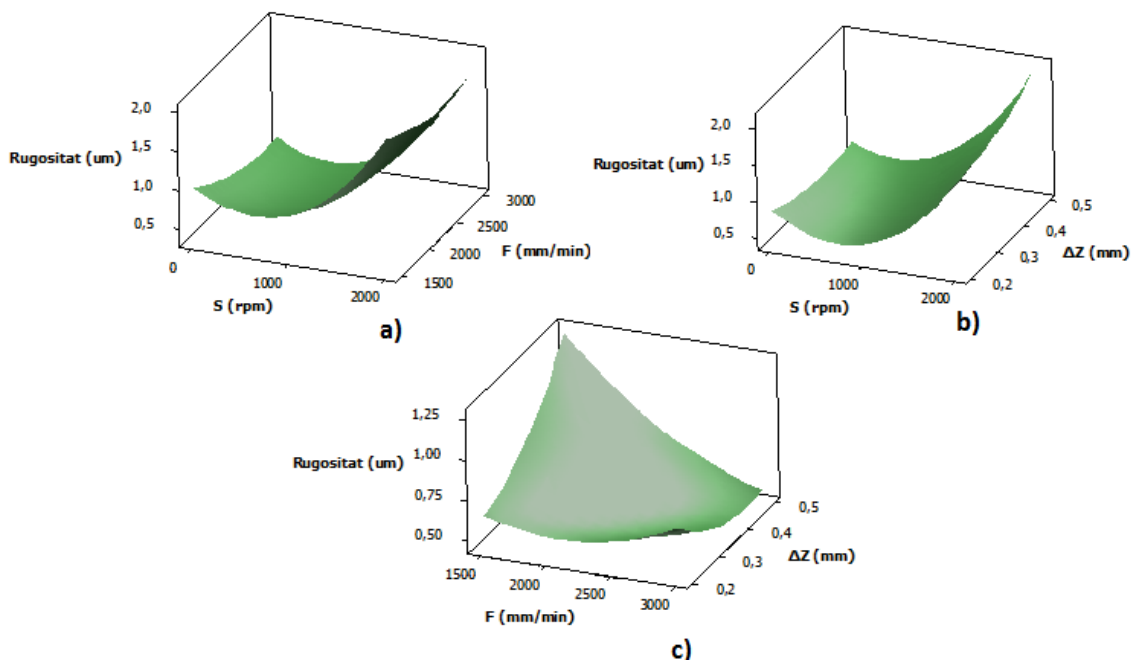


Figura C.8 Superfícies de resposta per la rugositat superficial. a) $\Delta z=0.35\text{mm}$ b) $F=2250\text{mm/min}$ c) $S=1000\text{rpm}$

Taula C.8 Taula de valors generada pel Minitab per la rugositat superficial

Font	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P	S/NS
Regressió	9	4.58657	4.58657	0.50962	21.02	0.002	S
Lineal	3	2.61048	2.61048	0.87016	35.89	0.001	S
S (rpm)	1	2.32740	2.32740	2.32740	96.01	0.000	S
F (mm/min)	1	0.21846	0.21846	0.21846	9.01	0.030	S
Δz (mm)	1	0.06462	0.06462	0.06462	2.67	0.163	NS
Quadràtic	3	1.67581	1.67581	0.55860	23.04	0.002	S
S² (rpm)	1	1.58176	1.64575	1.64575	67.89	0.000	S
F² (mm/min)	1	0.04764	0.05484	0.05484	2.26	0.193	NS
Δz^2 (mm)	1	0.04642	0.04642	0.04642	1.91	0.225	NS
Interacció	3	0.30027	0.30027	0.10009	4.13	0.080	NS
S (rpm)*F (mm/min)	1	0.00656	0.00656	0.00656	0.27	0.625	NS
S (rpm)* Δz (mm)	1	0.09211	0.09211	0.09211	3.80	0.109	NS
F (mm/min)*Δz (mm)	1	0.20160	0.20160	0.20160	8.32	0.034	NS
Error residual	5	0.12121	0.12121	0.02424			
Falta d'ajust	3	0.11029	0.11029	0.03676	6.73	0.132	NS
Error pur	2	0.10920	0.01092	0.00546			
Total	14	4.70778					

El model definitiu es mostra a l'apartat 3.2.4.

D. Estudi de costos

D.1 Introducció

Aquest annex presentarà les despeses associades a la realització d'aquest treball final de grau, concretament a l'aplicació de materials polimèrics biocompatibles utilitzant el procés de deformació incremental de xapa, anomenat en anglès *Incremental Sheet Forming* (ISF).

En aquest document es detallaran tant les despeses de material com les de mà d'obra. Cal remarcar que els preus unitaris indicats en aquest pressupost corresponen als preus del mes de Juny del 2015 i que poden variar.

També inclourà les despeses indirectes addicionals com un percentatge del cost total del pressupost.

D.2 Despeses de material

Les despeses corresponents al material utilitzat en aquest treball final de grau es mostren detallades a la Taula D.1.

Taula D.1 Despeses de material del present treball

Descripció del material	Quantitat	Preu unitari (€)	Subtotal (€)
Xapes de Policaprolactona (150x150x2 mm)	50.00	3.50	175.00
Xapes d' UHMWPE (150x150x2 mm)	30.00	1.75	52.50
Lubricant Houghton TD-52	0.50	15.00	7.50
Cargols M8	8.00	0.88	7.04
		TOTAL	242.04 €

D.3 Despeses de mà d'obra

Les despeses corresponents a la mà d'obra es mostren a la Taula D.2 amb una breu descripció del concepte, la quantitat i el preu unitari.

Taula D.2 Despeses de mà d'obra del present treball

Descripció	Quantitat	Preu unitari (€)	Subtotal (€)
Recerca bibliogràfica	30.00	12.00	360.00
Aprenentatge de maquinària i hardware	20.00	6.00	120.00
Producció de peces	50.00	40.00	2000.00
Obtenció de resultats	45.00	30.00	1350.00
Tractament de dades i anàlisi de resultats	65.00	30.00	1950.00
Redacció del treball	90.00	20.00	1800.00
Reunions	20.00	20.00	400.00
		TOTAL	7980.00 €

D.4 Despeses indirectes

Els costos indirectes que es consideren per a la correcta execució del treball corresponen al 16% del cost total d'aquest. Els costos indirectes s'atribueixen a despeses d'electricitat, aigua, transport, etc.

Taula D.3 Percentatge i total de les despeses indirectes

Descripció	Percentatge aplicat	Quantitat	Subtotal
Despeses indirectes	16.00%	8222.04 €	1315.53 €

D.5 Despesa Total

Considerant les corresponents despeses de material i de mà d'obra, així com les despeses indirectes per l'aplicació de materials polimèrics biocompatibles en la tecnologia de deformació incremental de xapa, el pressupost total ascendeix a 9537.57€ (NOU MIL CINQ-CENTS TRENTA-SET EUROS AMB SETANTA-SET CÈNTIMS).

Girona, 12 de Juny del 2015

Marc López Montenegro