

Treball final de grau

Estudi: Grau en Tecnologies Industrials

Títol: Aplicació de la tecnologia Incremental Sheet Forming (ISF) en polímers biocompatibles per a la fabricació de pròtesis cranials.

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Adrià Garcia Castillo

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 (mes/any) Febrer/2016

ÍNDEX

MEMÒRIA.....	3
1 INTRODUCCIÓ.....	4
1.1 Antecedents.....	4
1.2 Objecte.....	6
1.3 Abast i especificacions.....	7
2 EXPERIMENTACIÓ.....	10
2.1 Geometria.....	10
2.2 Material.....	11
2.3 Descripció del muntatge.....	12
2.3.1 Màquina.....	12
2.3.2 Eina.....	13
2.3.3 Motlle.....	14
2.3.4 Utiltatge.....	16
2.3.5 Lubricant.....	17
2.4 Disseny d'experiments (DOE).....	17
2.5 Adquisició de dades.....	19
2.6 Anàlisi estadística.....	23
3 Resultats i discussió.....	25
3.1 Alçada.....	27
3.2 Força màxima.....	29
3.3 Temperatura màxima.....	31
3.4 Rugositat superficial.....	32
3.5 Precisió dimensional.....	34
3.6 Comparació de resultats SPIF amb TPIF i discussió.....	38
3.6.1 Alçada.....	38
3.6.2 Força màxima.....	39
3.6.3 Temperatura màxima.....	39
3.6.4 Rugositat superficial.....	40
3.6.5 Discussió.....	40
4 Cas d'estudi (pròtesi cranial).....	42
4.1 Resultats obtinguts.....	45
4.2 Anàlisi dels resultats.....	46
5 Resum de l'estudi de costos.....	48
6 Conclusions.....	49

7 Bibliografia.....	53
ANNEXOS	54
A. Dimensionat del motlle (piràmide truncada).....	55
B. Observacions de les piràmides.....	57
C. Resultats preliminars a l'anàlisi estadística.....	60
C.1 Alçada.....	60
C.2 Força màxima	62
C.3 Temperatura màxima	64
C.4 Rugositat superficial.....	66
D. Diagrama de forces.....	68
E. Imatges de la càmera termogràfica	72
F. Anàlisi estadística amb SPIF	76
F.1 Alçada.....	76
F.2 Força màxima	77
F.3 Temperatura màxima	78
F.4 Rugositat.....	79
G. Estudi de costos	80
G.1 Introducció	80
G.2 Despeses de materials	81
G.3 Despeses de mà d'obra.....	82
G.4 Despeses indirectes.....	83
G.5 Despesa total	84

MEMÒRIA

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

En aquests últims anys s'han fet molts avenços en el mètode de deformació incremental de xapa (ISF). El Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció (GREP) porta estudiant i experimentant uns anys amb aquest mètode i la seva aplicació en la biomedicina.

Al llarg dels anys els processos més utilitzats per a la conformació de xapa a nivell industrial han sigut el doblegat, el tall i l'embotició. El mètode de deformació incremental de xapa (ISF) ha esdevingut el resultat de l'evolució de les tècniques utilitzades fins al moment. Aquest procés consisteix en deformar localment la xapa que es vol mecanitzar, aquesta xapa és subjectada en un Centre de Control Numèric (CNC). L'eina que s'utilitza és un punxó de punta semiesfèrica, la qual no ha estat dissenyada per cap peça en concret i d'aquesta manera es poden fabricar molts tipus de peces utilitzant la mateixa eina. Per tant, es pot deduir que els costos de fabricació utilitzant aquest mètode seran més baixos respecte altres tipus de metodologies, és per això que és un mètode ideal per a la fabricació de lots reduïts de peces o fabricació de peces úniques. Un altre aspecte important a l'hora de fer servir l'ISF és la utilització de lubricant ja que així es disminueix molt la fricció que hi ha entre la xapa i l'eina.

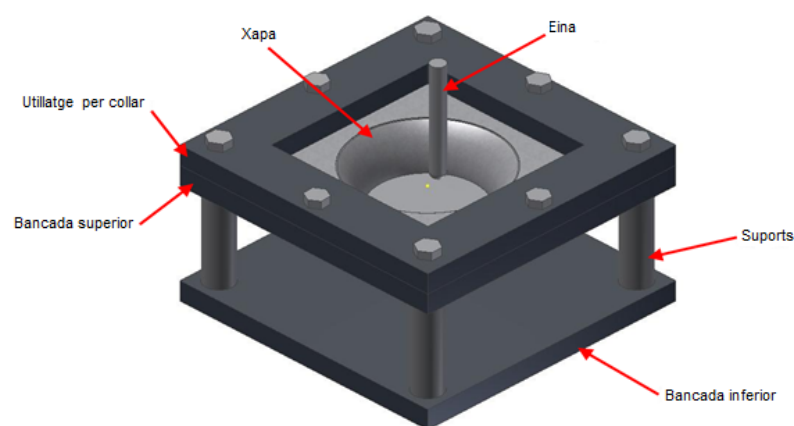


Figura 1.1 Esquema bàsic ISF (Bagudanch et al., 2014)

La deformació incremental de xapa té dues vessants principals, el SPIF i el TPIF. La diferència bàsica resideix en els punts de contacte on estarà aplicada la força que farà deformar la xapa.

El *Single Point Incremental Forming* (SPIF) només té un punt de contacte, que està situat entre la xapa i l'eina, es pot dir que la deformació que pateix la xapa en aquest cas és lliure, ja que l'eina no troba cap impediment a l'hora d'aplicar la força (Figura 1.1). L'inconvenient més gran a l'hora d'utilitzar aquesta variant és que la xapa sofreix una recuperació elàstica (*Springback* en anglès).

El *Two Point Incremental Forming* (TPIF) en canvi té dos punts de contacte, de la mateixa manera que en el SPIF hi haurà contacte entre l'eina i la xapa i també apareixerà un altre contacte, en aquest darrer cas serà entre la xapa i una matriu (Figura 1.2). La diferència bàsica entre els dos mètodes és l'aparició de la matriu en el TPIF, aquesta pot ser total, parcial, positiva o negativa. El principal avantatge respecte el SPIF és que amb aquesta segona metodologia hi ha una millora important en la precisió dimensional. D'altra banda com a inconvenient es pot ressaltar que s'ha de fabricar prèviament un motlle, encara que només serà necessari fabricar-lo un primer cop i després ja es podrà utilitzar per la resta d'operacions amb la mateixa finalitat. Aquest motlle sol estar fabricat de fusta o resines polimèriques, ja que és fàcil de mecanitzar i tenen un cost inferior a un d'alumini, per exemple.

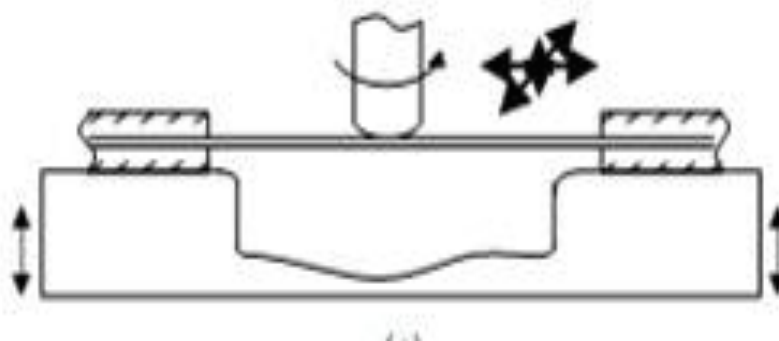


Figura 1.2 Conformat amb TPIF (matriu negativa). Font: <http://www.monografias.com/trabajos94/aspectos-esenciales-del-estampado-incremental-punto-simple/aspectos-esenciales-del-estampado-incremental-punto-simple.shtml>

Els materials més utilitzats per l'ISF són els materials metàl·lics ja que s'aconsegueix un bon acabat final, però alguns d'ells tenen la desavantatge que són molt difícils de deformar en fred i per tant s'ha de fer a temperatures elevades. Un altre tipus de materials amb els que s'està treballant en els darrers anys són els polimèrics. A diferència dels metàl·lics són fàcilment mecanitzables a temperatures ambientals, en canvi pateixen una recuperació elàstica que amb els metàl·lics no existeix. Així, depenent del resultat final que es vulgui aconseguir es pot triar entre els dos tipus de

materials dels que s'ha parlat. Si es desitja un acabat final molt precís i per això no es té en compte haver d'aclimatar la zona de treball a temperatures elevades, el que faria augmentar pressupost econòmic, els materials metàl·lics serien la millor opció. En canvi si no importa tenir peces que tinguin un marge d'error en l'acabat més gran, no es desitja haver d'augmentar la temperatura de la zona de treball i es disposa d'un pressupost més ajustat, els materials polimèrics serien els més recomanables en aquest cas.

Amb l'ISF es poden aconseguir fabricar peces amb la forma que es desitja, el que ha provocat que sigui molt interessant per molts tipus de camps diferents, com per exemple la medicina. Els anomenats materials biocompatibles o biomaterials són materials farmacològicament inerts que tenen la funció de ser implementats dins d'un sistema viu amb la funció principal de substituir o regenerar teixits vius. El primer descobriment sobre aquests materials que es coneix va ser a la segona guerra mundial, on van descobrir que els pilots ferits per fragments de les seves pròpies cabines, fetes de polimetilmetacrilat (PMMA), no presentaven cap tipus de reacció per cossos estranys en el seu cos com passava amb el vidre, per exemple¹. Hi ha diferents tipus de biomaterials coneguts com, per exemple, els metàl·lics i polímers, dels que ja se n'ha parlat, o també ceràmics i compostos.

Més de cinquanta milions de persones en tot el món tenen implantat algun tipus de pròtesis i és un fet ben conegut en la nostra societat la necessitat de tot tipus d'implants i és molt estrany que no es conegui algun cas en l'entorn proper de família i amics. Segons els demògrafs és molt probable que d'aquí cinc anys hi hagi més persones de més de seixanta anys que nens menors de quinze i la utilització de pròtesis va molt lligada a l'edat de les persones². Els factors decisius a l'hora d'avaluar aquests materials són la biocompatibilitat i la duració, ja que han de romandre en contacte amb teixits vius i és molt important que no es produeixin reaccions no desitjades en la interfície teixit-material i que mantinguin les prestacions durant el temps que hagin d'estar en servei.

1.2 Objecte

L'objecte principal és fabricar pròtesis cranials utilitzant el mètode de deformació incremental de xapa (ISF) amb materials polímers biocompatibles i estudiar-ne el

¹ http://www.aefi.org/curso-precios-download.asp?name=presentacion_cdeinegri.pdf.

² <http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/documentos/Biomateriales.pdf>.

resultat final. Per aconseguir-ho es faran comparacions amb les metodologies SPIF i TPIF utilitzant unes geometries de referència per, posteriorment, trobar els millors paràmetres amb els que fabricar les pròtesis. Es farà ús d'informació de projectes anteriors i s'adaptaran els resultats trobats per aquest projecte.

1.3 Abast i especificacions

Per a la realització d'aquest projecte s'utilitzarà un sol tipus de material: El "UHMWPE" o "polietilè d'ultra pes molecular". Es realitzarà l'estudi de la metodologia TPIF amb el material esmentat anteriorment. Per a la realització de l'estudi es fabricarà un número concret de peces i en cada tipus s'anirà variant:

- Velocitat de rotació
- Velocitat d'avanç
- Profunditat de passada
- Diàmetre de l'eina

Un cop assolits tots els experiments s'avaluaran paràmetres com: Força màxima, temperatura màxima, alçada màxima assolida i rugositat. A més, es farà ús d'un escàner 3D per mesurar l'error dimensional amb la peça teòrica. Finalment es compararan els resultats obtinguts amb els extrets de treballs anteriors on s'utilitzava el mètode SPIF i es procedirà a la fabricació de les pròtesis cranials utilitzant els millors paràmetres.

En la Taula 1.1 hi han recollides totes les especificacions que es volen realitzar al llarg d'aquest projecte. Aquesta taula conté les diferents especificacions, separades per les categories esmentades i una columna que indica si és requerida (R) o optativa (O).

Taula 1.1 Descripció de les especificacions del treball

Categoria	Descripció	R/O
Objectiu	Realitzar experiments amb la tecnologia <i>Incremental/Sheet Forming</i> utilitzant la variant TPIF i fabricar pròtesis cranials.	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
	Calcular la desviació dimensional utilitzant l'escàner 3D <i>David Laserscanner s/s-2</i> .	O
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 UHMWPE (150x150x2 mm)	R
	Làmines de UHMWPE (200x200x2 mm)	R
	Lubricant Houghton TD-52.	R
	Optimitzar l'ús del lubricant.	O
Eines	Eina de punta esfèrica de 6 mm de diàmetre.	R
	Eina de punta esfèrica de 10 mm de diàmetre.	R
	Eina de punta esfèrica de 14 mm 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
	Comparar els resultats obtinguts amb resultats extrets de treballs anteriors.	R
	Fabricació de pròtesis cranials per a la seva posterior valoració.	R

	Calcular la desviació dimensional utilitzant l'escàner 3D David Laserscanner sls-2 en les peces fabricades amb SPIF	O
	Fabricació de pròtesis usant SPIF	O
	Optimitzar els paràmetres de procés.	O
Termini	Lliurament del treball a la convocatòria de Febrer de 2016.	R
Costos	Minimitzar el cost del material.	R

2 EXPERIMENTACIÓ

2.1 Geometria

Quan es va començar a experimentar amb aquesta tecnologia es va començar amb formes bàsiques com piràmides truncades (Ambrogio et al., 2004) o cons truncats (Fratini et al., 2004) amb les que es determina la influència dels paràmetres del procés com les propietats del material, el diàmetre de l'eina o la profunditat de passada, per exemple.

Les geometries esmentades anteriorment han sigut molt estudiades i des de fa uns anys han aparegut geometries una mica més complexes que no tenen una gran funcionalitat industrial però són més idònies a l'hora d'experimentar amb elles i determinar aspectes com la formabilitat, deformacions i precisió. Així doncs, la geometria utilitzada per a la realització d'aquest projecte ha sigut una piràmide truncada amb angle de paret variable (*variable wall angle*) com es pot veure en la Figura 2.1. Les mesures de la geometria utilitzada són:

Amplada: 105 mm.

Angle paret inicial: 45°

Angle paret final: 80°

Radi de generatriu: 80 mm.

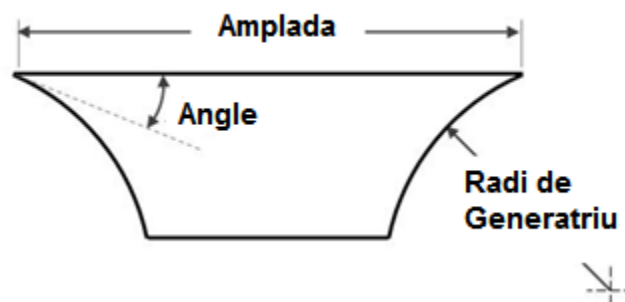


Figura 2.1 Esquema de la geometria (piràmide truncada) utilitzada

2.2 Material

En aquest projecte serà utilitzat un material biocompatible en particular anomenat “UHMWPE” (Ultra-high-molecular-weight polyethylene, de l'anglès). El seu ús es va popularitzar gràcies a una aplicació que es pot trobar en la majoria de cases: els taulers per picar aliments, de color blanc. El “UHMWPE” o “Polietilè d'Ultra Pes Molecular”, tal i com el seu nom indica, és un polietilè amb un pes molecular molt elevat, pot oscil·lar entre 3.5 i 4 milions. Per fer una breu estima dels valors dels que s'està parlant només cal dir que el pes molecular del PE (polietilè) utilitzat per canonades és de 400 mil.

Aquest material posseeix unes propietats molt interessants, per exemple: Té la major resistència a la abrasió que qualsevol termoplàstic (15 cops més que l'acer de carbó), una resistència excepcional a l'impacte, inclús a temperatures criogèniques, un coeficient de fricció extremadament baix, autolubrificació, és inolor, insípid i no tòxic, entre altres. Aquest polietilè té cadenes extremadament llargues, amb la enumeració del pes molecular en milions, generalment entre 2 i 6 milions. Es compon de cadenes extremadament llargues de polietilè (com es mostra en la

Figura 2.2) i queden alineades en la mateixa direcció, cada cadena s'enllaça a les altres i així permet que el conjunt pugui suportar grans càrregues extensibles. Degut a les característiques citades anteriorment, les aplicacions d'aquest material s'incrementen. Algunes de les seves principals aplicacions són les següents:

- En la producció de PVC per finestres i portes
- En material aïllant de cables
- En desenvolupament d'aplicacions defensives, com armilles antibales
- En el sector mèdic, implants i aparells ortopèdics.

L'aplicació a la que es dirigirà aquest treball és a la del sector mèdic. Aquest tipus de polietilens s'ha utilitzat durant tres dècades com a material per pròtesis totals de genolls i malucs. Les majors expectatives de vida, els accidents, la pràctica esportiva i l'obesitat obliguen a estendre la seva vida operativa. Es treballa en millorar el polietilè mitjançant canvis en la seva microestructura o en la seva superfície, irradiant el material amb radiació gamma o feixos d'electrons que reticulen les cadenes polimèriques amb els que es millora el desgast. L'estabilitat oxidativa després de la irradiació, s'aconsegueix mitjançant processos tèrmics que afecten a les propietats

mecàniques, així com la incorporació d'antioxidants com la vitamina E que atrapa els radicals generats. Es recobreix el "UHMWPE" amb una capa de carboni (DLC) que disminueix la fricció i endarrereix l'aparició de partícules del mateix material originades pel desgast³.

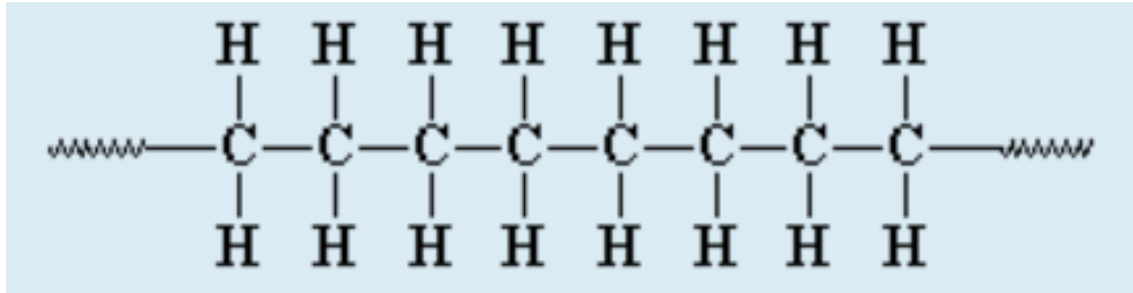


Figura 2.2 Estructura de cadenes de polietilè, que formaran UHMWPE.
Font: [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso07-08/pe/polietileno de alta densidad.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso07-08/pe/polietileno%20de%20alta%20densidad.htm)

2.3 Descripció del muntatge

2.3.1 Màquina

Per a la realització dels experiments pertinents la màquina utilitzada serà un centre de control numèric anomenat Kondia® HS1000 mostrat en la Figura 2.3. A part, en aquest centre de mecanitzat vertical serà afegida una taula dinamomètrica Kistler® 9257B, que serà muntada sobre la taula de treball i la seva funció serà mesurar les forces verticals que patirà la xapa de UHMWPE de 2mm. d'espessor durant el seu mecanitzat.



³ <http://www.unizar.es/actm/biomateriales%202014.pdf>

Figura 2.3 Centre de mecanitzat Kondia® HS1000

Per a construir la peça que volem hem de dissenyar un codi que llegirà i executarà el nostre CNC. Dins d'aquest codi hi ha la trajectòria que ha de seguir l'eina per a l'elaboració de la nostra piràmide truncada. Per fer aquest codi hem de tenir en compte els paràmetres que es volen usar. Els paràmetres que llegirà el nostre centre de mecanitzat són: La profunditat de baixada, velocitat d'avanç, velocitat de rotació de l'eina i diàmetre de l'eina. Hi ha diferents mètodes per a satisfer la profunditat de passada com es mostra en la Figura 2.4. Es realitzaran experiments modificant els paràmetres anteriors per, posteriorment, analitzar-los i poder triar els millors paràmetres de fabricació.

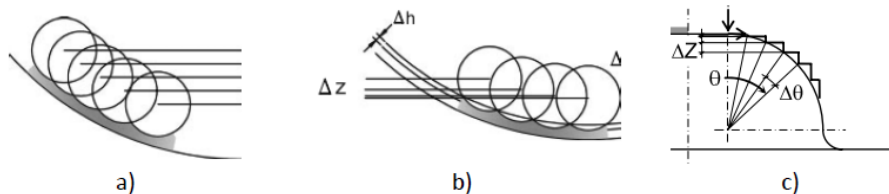


Figura 2.4 Tipus de passos incrementals a) Profunditat de baixada b) Altura de cresta c) Increment angular

A continuació es mostra els diferents valors que agafaran els nostres paràmetres:

- Profunditat de passada: 0.20, 0.35 i 0.50 mm.
- Velocitat d'avanç: 1500, 2250 i 3000 mm/minut.
- Velocitat de rotació: 0, 1000 i 2000 rpm.
- Diàmetre de l'eina: 6, 10 i 14 mm.

Cal dir que, a l'hora de triar la variació dels paràmetres, s'han utilitzat els mateixos valors que s'utilitzaven en treballs anteriors perquè, d'aquesta manera, la comparació de resultats és més senzilla.

2.3.2 Eina

Per al mecanitzat amb ISF l'eina que s'utilitza és un punxó amb punta semiesfèrica. Com ja s'ha comentat anteriorment s'utilitzaran eines de diàmetres diferents (6, 10 i 14 mm.) fabricades amb Vanadis 23. Aquest material és un acer pulvimetal·lúrgic d'alt

aliatge adequat per llargues sèries de producció sobretot per aplicacions que requereixin una gran demanda en resistència al desgast abrasiu/adhesiu i on hi hagi risc de deformació plàstica en la superfície de treball. Algunes de les seves propietats són: Elevada resistència al desgast, bona tenacitat i bona estabilitat dimensional. Les eines van fixades al capçal de la màquina gràcies al portaeines tipus *Weldon*.

L'eina rotarà en l'eix "z" a les diferents velocitats esmentades anteriorment. Seguirà una trajectòria alternada, de manera que quan el moviment d'avanç sigui a favor del sentit de les agulles del rellotge l'eina girarà en sentit contrari i al contrari. Aquest moviment té una explicació, si no es fes així podria aparèixer l'efecte de torsió, el que provocaria deformacions no desitjades en la peça. Les diferents eines es poden visualitzar en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Eina de 6 mm, eina de 10 mm i eina de 14 mm amb el portaeines (de dalt a baix)

2.3.3 Motlle

El motlle usat en els experiments va ser fabricat per un alumne en un projecte anterior (Puig, 2015). Primerament, es va haver de crear la geometria amb el programa SolidWorks en 3D per, a continuació, fabricar-la amb un centre de control numèric Deckel maho 64Vlinear localitzat a l'edifici P2 de l'Escola Politècnica Superior de l'UDG (Figura 2.6).

La fabricació del motlle es va fer amb un fresolí planer de 20 i 16 mm de diàmetre per les passades de desbast i planejat respectivament, una velocitat de gir de 3000 rpm, una velocitat d'avanç de 300 mm/min i profunditat de passada màxima de 0,5 mm.



Figura 2.6 Centre de mecanitzat Deckel maho 64Vlinear.

El motlle està fet d'alumini, ja que es pot considerar un material tou per ser mecanitzat. Durant la fabricació del motlle, es van realitzar una sèrie de 8 forats a cada cara, com es pot veure en la Figura 2.7, resultant un total de 16 forats roscats a M8. Els forats superiors serveixen per collar la xapa al motlle i així evitar qualsevol tipus de moviment imprevist durant el mecanitzat. Els forats inferiors, en canvi, serveixen per collar el motlle a la taula dinamomètrica, la qual va collada al centre de mecanitzat. Com es pot observar també hi ha un forat en la part inferior de la piràmide. Aquest forat s'ha hagut de fer per aquests experiments i no durant la fabricació del motlle, ja que es va comprovar que sense un forat on pogués passar aire es feia el buit durant el mecanitzat i la xapa es deformava de manera incorrecta.

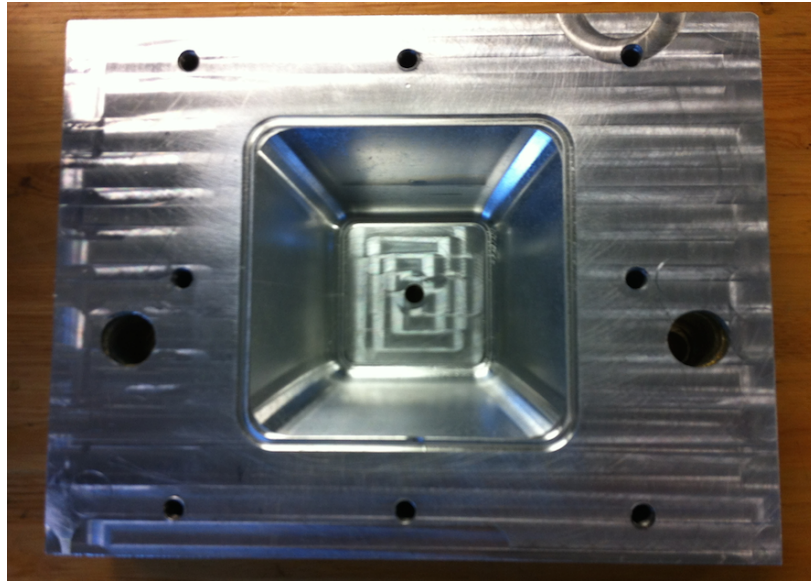


Figura 2.7 Motlle de la piràmide truncada utilitzada per TPIF

2.3.4 Utilitatge

L'utilitatge utilitzat va ser dissenyat en un projecte final de carrera anterior (Bagudanch, 2011). La funció d'aquest utilitatge és mantenir la xapa a una altura determinada i evitar que es pugui moure durant el procés de mecanitzat. Està format per una plataforma de fixació de 190x190x15 mm que impedeixen el moviment no desitjat de la xapa i el motlle o matriu. A diferència del SPIF, en aquest cas només és necessari una plataforma mentre que amb SPIF se n'han d'utilitzar dues, tal i com es mostra en la Figura 2.8.

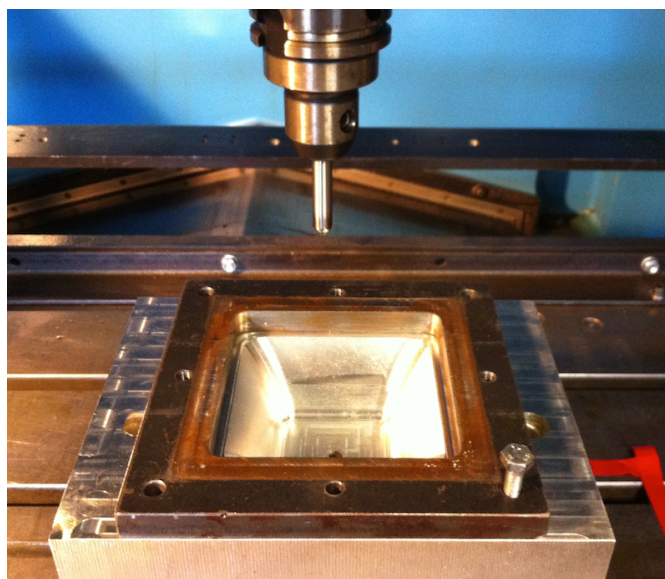


Figura 2.8 Utilitatge utilitzat en els experiments amb TPIF

2.3.5 Lubricant

El lubricant utilitzat pels experiments amb les xapes UHMWPE és el Houghton TD-52 i és un oli mineral parafínic amb additius lubricants. És adequat en processos de conformat, de tot tipus de metalls, per deformació plàstica (estampació, embotició profunda, etc.).

Els lubricants són molt necessaris i més en aquest cas, ja que es treballa amb materials polímers i aquests presenten grans canvis en el comportament a temperatures elevades. Els lubricants s'utilitzen per a reduir la fricció que hi ha entre l'eina i la xapa, d'aquesta manera es redueix considerablement la temperatura.

L'aplicació d'aquest lubricant serà de forma manual de manera que quedi una certa quantitat de lubricant sobre la xapa en la que es treballi, quedant la superfície de treball coberta per una capa del mateix, com es pot veure en la Figura 2.9.

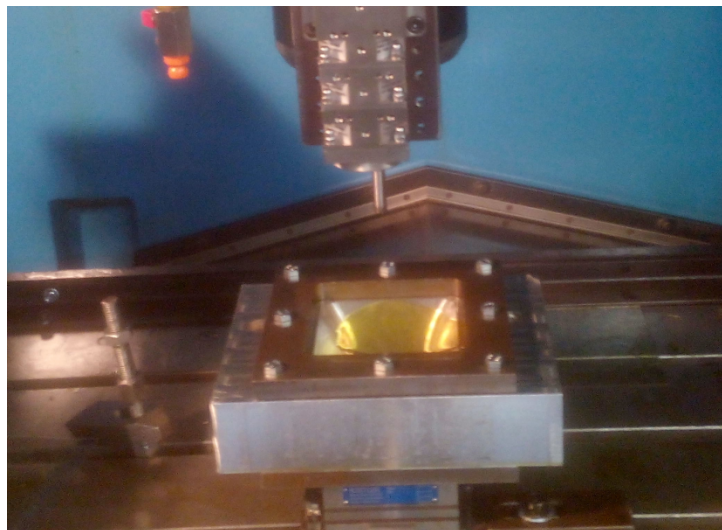


Figura 2.9 Muntatge experimental amb el lubricant aplicat a la xapa

2.4 Disseny d'experiments (DOE)

L'objectiu del present projecte és dissenyar experiments i es veurà com varien alguns paràmetres de la peça final obtinguda. Els paràmetres que es valoraran finalment són la força vertical que es necessita per deformar la xapa, la temperatura màxima a la que arribarà la deformació, l'alçada màxima que s'assolirà de la peça i la rugositat superficial mitjana de les parets interiors de la nostra peça. S'utilitzarà la tecnologia

ISF en la variant TPIF i es modificaran les mateixes variables que ja es modificaven amb SPIF en treballs anteriors. Aquestes modificacions amb les que es crearà el disseny dels experiments estaran formades per tres nivells, alt, mitjà i baix. Els paràmetres que es modificaran seran els de velocitat d'avanç, profunditat de passada, diàmetre de l'eina i velocitat de rotació, i prendran els valors que es mostren a la Taula 2.1.

Taula 2.1 Valors dels diferents paràmetres de procés

Paràmetre	Baix	Mig	Alt
S (velocitat de rotació, rpm)	0	1000	2000
F (velocitat d'avanç, mm/min)	1500	2250	3000
Δz (profunditat de passada, mm)	0.2	0.35	0.5
Dt (diàmetre de l'eina, mm)	6	10	14

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

S'utilitzarà un programa matemàtic que permetrà obtenir les combinacions necessàries, el Matlab utilitza una codificació pròpia amb valors de -1, 0 i 1 per definir els nivells baix, mitja i alt respectivament.

S'utilitzarà un tipus de DOE anomenat "*Box-Behnken*" (BB) ja que no necessita tantes simulacions com els de "*Central Composite Designs*", com es mostra a la Figura 2.10, a més també era el model que s'utilitzava en els experiments amb SPIF, el que farà la posterior comparació més senzilla.

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.

Un cop s'ha triat el tipus de disseny d'experiments que es farà, amb el Matlab podem obtenir les 27 combinacions dels paràmetres mencionats anteriorment tal i com es

mostra en la Taula 2.2. Un cop es tinguin les combinacions s'executaran amb el Python i s'enviaran les trajectòries a la màquina CNC.

Taula 2.2 Combinacions dels paràmetres de procés

Experiment	Dt (mm)	S (rpm)	F (mm/min)	Δz (mm)
1	6	0	2250	0,35
2	6	2000	2250	0,35
3	14	0	2250	0,35
4	14	2000	2250	0,35
5	10	1000	1500	0,2
6	10	1000	1500	0,5
7	10	1000	3000	0,2
8	10	1000	3000	0,5
9	6	1000	2250	0,2
10	6	1000	2250	0,5
11	14	1000	2250	0,2
12	14	1000	2250	0,5
13	10	0	1500	0,35
14	10	0	3000	0,35
15	10	2000	1500	0,35
16	10	2000	3000	0,35
17	6	1000	1500	0,35
18	6	1000	3000	0,35
19	14	1000	1500	0,35
20	14	1000	3000	0,35
21	10	0	2250	0,2
22	10	0	2250	0,5
23	10	2000	2250	0,2
24	10	2000	2250	0,5
25	10	1000	2250	0,35
26	10	1000	2250	0,35
27	10	1000	2250	0,35

2.5 Adquisició de dades

Com ja s'ha explicat anteriorment, l'objectiu dels experiments és analitzar la temperatura màxima, la força màxima, l'altura màxima assolida i la rugositat de les peces que es mecanitzaran.

Per calcular la força màxima es farà us de la taula dinamomètrica *Kistler® 9257B* que porta instal·lada el CNC, com es pot visualitzar en la Figura 2.11. S'aniran adquirint

valors de força gràcies a la tarja *DaqBoard® 505* i amb el programa *DaqView 9.0.0* podran ser analitzades. Un cop es tenen els valors de les forces, amb el programa Matlab i un petit algoritme es poden trobar els valors màxims, que al final és el que realment interessa.



Figura 2.11 Taula dinamomètrica Kistler® 9257B

A l'hora de calcular la temperatura màxima que s'assolirà durant el mecanitzat s'utilitzarà una càmera *IRBIS ImageIR 3300* mostrada en la Figura 2.12. Aquesta càmera pren imatges termogràfiques i amb el programa *Irbis 3 Professional* es guarden per una posterior lectura. A més aquest programa dona la opció de triar la freqüència amb la que es prenen les imatges i en aquests experiments s'ha decidit que es prendrà una imatge cada 10 segons.

A l'annex E es poden observar alguns exemples d'imatges preses per la càmera *IRBIS* on a més, s'hi pot veure la temperatura màxima a la que es treballava en aquell precís instant.



Figura 2.12 Càmera termogràfica IRBIS ImageIR 3300

El centre de control numèric mostra la profunditat de passada en la que s'està mecanitzant en tot moment, això és molt útil ja que es pot calcular l'altura màxima que s'assoleix en cada peça. L'única cosa que s'ha de fer és estar atent al procés i esperar a que el mecanitzat arribi al punt final, on s'obtindrà l'altura màxima en l'eix z, o just al moment en que es produeixi algun tipus de fractura en la xapa per parar el procés amb el botó d'emergència i llavors prendre nota de l'altura a la que s'ha produït aquesta fractura.

Un cop es tenen les peces acabades és el moment de mesurar la rugositat superficial de les parets internes de les piràmides truncades. Per fer-ho s'utilitza el rugosímetre *Mitutoyo Surftest SV1000* (Figura 2.13) i amb el programa *Surfpack-SV v1.300* es poden enregistrar els valors de rugositat superficial.

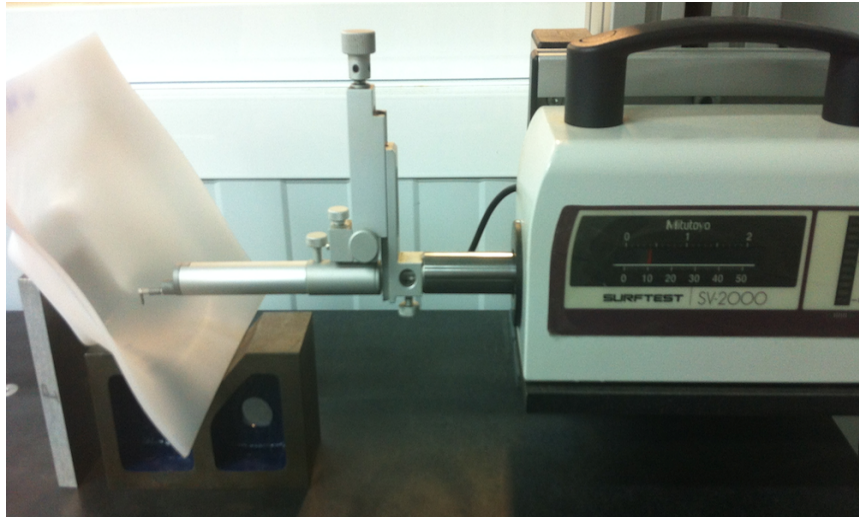


Figura 2.13 Rugosímetre en el moment de lectura d'una xapa de UHMWPE

Per poder fer una comparació de la forma i les dimensions finals de les peces fabricades s'ha fet ús d'un escàner 3D (Figura 2.14), amb el que s'obté una imatge digitalitzada. L'aparell amb el que es fan els escanejos és el *David Laserscanner s/s-2* juntament amb el seu corresponent software. Un cop s'obtenen els escanejos es fa ús del software *Sal 3D*, on s'introdueixen el model teòric i el fabricat, d'aquesta manera es pot analitzar les diferències que existeixen entre els dos models.

L'escàner David, utilitza la innovadora tecnologia "Structured Light", que permet un escaneig 3D precís en qüestió de segons. L'escàner és mòbil i permet situar-se fàcilment davant de la superfície a escanejar. Amb un sol clic i el software David comença a escanejar la peça en qüestió i segons més tard es pot veure el model digitalitzat en la pantalla de l'ordinador.

A l'apartat 3.5 s'explica detalladament quines peces seran escanejades per, posteriorment, ser analitzades.

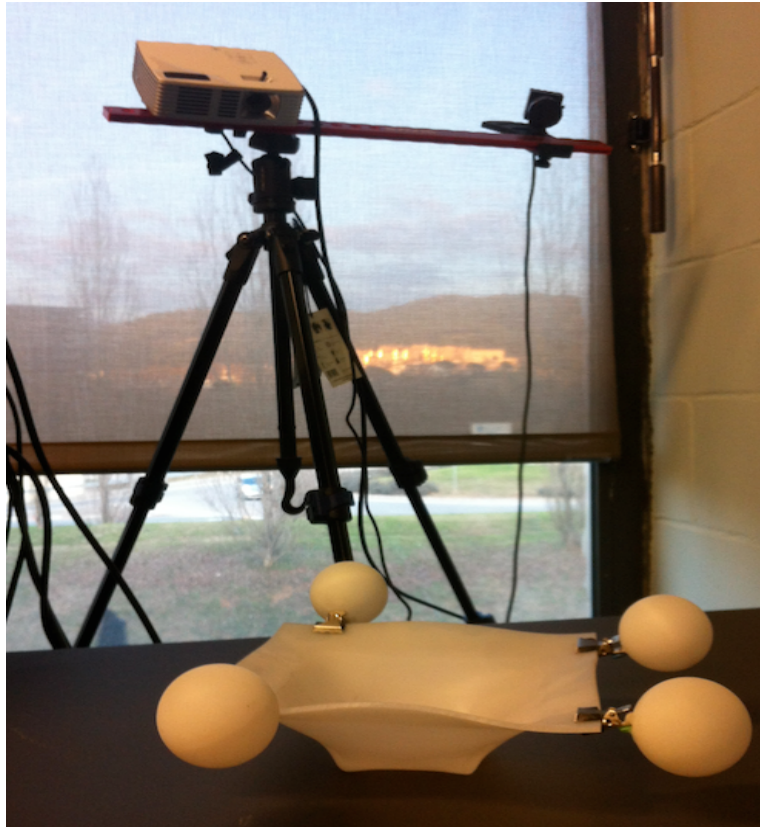


Figura 2.14 Escàner David durant el procés de escanejat d'una de les peces

2.6 Anàlisi estadística

Un cop es tenen tots els valors desitjats dels paràmetres que s'han esmentat en apartats anteriors es poden obtenir uns resultats estadístics amb el programa Minitab v16. Aquest software genera una equació per cada un dels paràmetres amb el que es poden predir els valors de cada magnitud. Aquest programa treballa amb els paràmetres codificats, com ja s'ha vist són -1, 0 i 1 i d'aquesta manera es poden obtenir resultats amb les unitats correctes i coherents.

La taula que genera el Minitab està dividida en tres files diferenciades, lineal, quadràtic i interaccions. Una de les columnes que apareixen és la dels graus de llibertat però la columna que més importància té en aquest cas es la última, la del p-valor (P). El p-valor determina quines variables són significatives o no significatives ja que el contrast es realitza amb una confiança del 95%. En definitiva, si el p-valor d'una variable és inferior a 0.05 és significativa i per contra si es superior a 0.05 és no significativa. El que sigui significativa o no ens determina quina rellevància té aquella variable en l'equació, si és no significativa no crea grans modificacions en la magnitud per molt

que es variï, en canvi, si el valor d'una variable significativa es varia el més mínim ja pot afectar dràsticament a la magnitud que s'està estudiant.

El Minitab també proporciona superfícies de resposta, que venen representades com una superfície en l'espai, on l'eix vertical sempre correspon a la magnitud que s'està estudiant i els altres dos eixos venen representats per paràmetres de procés, però degut a que només hi ha lloc per dos paràmetres i en aquest cas n'hi ha 4 s'hauran de fixar els valors mitjos de dos d'ells, que no apareixeran en la superfície (0 segons la codificació).

L'anàlisi previ que s'explica en l'annex C mostra com es pot intuir quins paràmetres es poden descartar depenent de si són significatius o no. D'aquesta manera sembla molt senzill però s'ha de tenir en compte que si un paràmetre es mostra com significatiu quan està al quadrat o quan està en una interacció amb un altre paràmetre directament s'ha de tenir present en el model. Si per qualsevol motiu només hi hagués un dels paràmetres com a significatiu se n'hauria d'afegir un altre, de manera que el que tingui el p-valor més proper a 0.05 hauria de ser tingut en compte en el model, ja que sinó seria impossible crear la superfície i només es podria dibuixar una corba.

Per determinar si el model s'ajusta bé s'analitza el coeficient R^2 que dona el programa. Quant més proper sigui aquest valor al 100% i el p-valor de la fila de Regressió sigui més proper a 0, millor serà el resultat obtingut. El software dona varis tipus de R^2 , el primer es mostra com R-cuad. i quan més termes de l'ajust quadràtic es tinguin en compte més alt és el seu valor, el que no implica directament que el model final pugui predir de millor forma els resultats. El segon tipus de R^2 és el *R-cuad. (pred.)*, que indica com de bé, el model en qüestió, prediu valors d'una determinada magnitud. L'últim tipus és el *R-cuad. (ajust.)* i 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 el present apartat es presentaran els resultats obtinguts al llarg del procés de deformació dels diferents experiments. Els resultats estadístics que es mostren a continuació corresponen als definitius, en l'annex C es mostren els resultats preliminars i posteriorment es fan les modificacions necessàries utilitzant els criteris explicats en l'apartat d'Anàlisi estadística.

La Taula 3.1 s'ha construït després d'obtenir i analitzar els pertinents resultats dels experiments. D'aquesta manera es mostren tots els valors explicats en l'apartat Adquisició de dades en una sola taula.

Taula 3.1 Resultats de les diferents magnituds en les xapes

Experiment	Força (N)	Temperatura màxima (°C)	Rugositat (μm)	Alçada màxima (mm)
1	470.73	50.26	0.438	43
2	566.59	67.37	0.365	41.65
3	859.56	48.49	0.641	43
4	780.70	98.59	0.363	34.65
5	773.38	76.49	0.366	43
6	796.37	78.33	0.437	43
7	732.51	75.18	0.369	43
8	765.17	75.26	0.321	43
9	606.28	63.77	0.479	43
10	752.72	64.81	0.352	43
11	1168.80	67.08	0.487	30.4
12	895.45	81.48	0.547	37
13	896.82	46.34	0.436	43
14	815.17	52.77	0.698	43
15	676.16	97.05	0.592	38.85
16	760.49	92.08	0.412	35.35
17	651.11	62.09	0.663	43
18	689.10	64.84	0.385	43
19	1100.70	63.49	0.287	30.8
20	893.30	62.58	0.454	31.15
21	776.11	49.74	0.340	43
22	909.61	49.71	0.519	43
23	682.60	93.04	0.347	36.4
24	744.18	75.95	0.339	33.5
25	728.26	88.15	0.382	43
26	764.73	77.95	0.477	43
27	812.88	78.74	0.432	43

S'observa que dels 27 experiments només 10 s'han trencat durant la deformació. Els experiments 11 i 19 són els que tenen un valor màxim de força més elevat i alhora són els que han trencat a les alçades més baixes pel que podem deduir algun tipus de relació entre la força màxima i l'alçada màxima. Els experiments on s'ha utilitzat l'eina de diàmetre més gran (peces 3, 4, 11, 12, 19 i 20) experimenten, de mitja, una força més alta que la resta. Els tres experiments amb temperatura més alta assolida (peces 4, 15 i 23) estan mecanitzades amb la velocitat de rotació de l'eina més gran i cap d'ells ha assolit l'alçada màxima. S'ha de dir també que en cap cas s'ha arribat a superar la temperatura de fusió d'aquest material que és de 130°C aproximadament. Les peces que han estat mecanitzades amb velocitat de rotació igual a 0 han sigut les que han experimentat una temperatura màxima notablement més baixa (peces 1, 3, 13, 14, 23 i 25). Ara ja es pot deduir que hi ha relació entre la temperatura màxima i la velocitat de rotació. En els valors de la rugositat no s'aprecia gaire variació, ja que estan entre 0.3 i 0.7 μm aproximadament.

S'ha de tenir en compte que a l'hora de calcular la rugositat hi ha dos maneres de fer-ho, ja que les xapes de partida presentaven marques en forma de línia que anaven de un costat a l'altre, fet causat pel procés de tall quan van ser fabricades. Per tant, es pot calcular la rugositat a favor d'aquestes línies o de manera perpendicular a elles. 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: 0.535 μm
- Mesura perpendicular a les marques esmentades: 1.492 μm

Com es pot observar hi ha una diferència important a l'hora de triar la metodologia, per això s'ha triat mesurar de manera paral·lela a les línies. Es pot apreciar que la variació de la rugositat inicial i les finals no és gaire notable, pel que es pot dir que l'acabat superficial pràcticament no varia.

Si s'analitzen visualment les peces, es pot observar com la majoria s'ajusta bé a la peça teòrica. Encara que s'han mecanitzat amb el motlle, en alguns casos la base petita presenta una petita torsió respecte la gran. Un fet que té més rellevància és el que succeeix a les cantonades de la base petita, ja que en pràcticament totes les peces es veuen més transparents que la resta del material. Justament quan hi ha hagut trencament de la xapa durant l'operació, ha sigut en les cantonades de la base petita per on hi ha hagut totes les ruptures.



Figura 3.1 Peça 03

Com es pot observar en la Figura 3.1 i com s'ha esmentat abans, les cantonades són pràcticament transparents i les arestes de la base petita no són paral·leles a les de la base gran, el que era d'esperar per l'efecte de torsió.

Tal i com es veu a la Taula B.1 de l'annex B, l'experiment 16 presenta un mode diferent de fractura perquè en el moment de trencar, van passar uns segons més del compte abans de parar la màquina i l'eina va esgarrar quasi tota la base de la piràmide.

3.1 Alçada

Dins aquest apartat s'aprofundirà sobre l'alçada màxima a la que han arribat les peces en el procés de la seva deformació, també s'obté una equació amb la que es pot predir valors d'alçada depenent dels paràmetres més significatius de deformació. A continuació es veurà quins paràmetres són els que més afecten a l'alçada. Es necessari un mínim de dos paràmetres per generar una superfície, sinó seria impossible generar-ne una i s'hauria d'incloure una altre variable encara que estigués dins de les no significatives.

Com es veu a la Taula 3.2 els valors significatius per a l'alçada són el diàmetre de l'eina (D_t) i la velocitat de rotació de l'eina (S). Com s'ha explicat en l'apartat 2.6 el programa dóna uns coeficients de R^2 i en aquest cas són els següents: *R-cuad. (pred.)=41,53% R-cuad. (ajusted)=66,48%*.

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

Font	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regressió	4	377,24	377,24	94,31	13,89	0
Lineal	2	323,24	323,24	161,62	23,81	0
Dt (mm)	1	205,43	205,43	205,427	30,26	0
S (rpm)	1	117,81	117,81	117,813	17,35	0
Quadràtic	1	41,75	558,8	41,75	6,15	0,021
Dt (mm)*Dt (mm)	1	41,75	41,75	41,75	6,15	0,021
Interacció	1	12,25	12,25	12,25	1,8	0,193
Dt (mm)*S (rpm)	1	12,25	12,25	12,25	1,8	0,193
Error residual	22	149,36	149,36	6,789		
Falta d'ajust	4	105,14	105,14	26,286	10,7	0
Error pur	18	44,22	44,22	2,457		
Total	26	526,6				

L'única combinació que seria prescindible, ja que té una P major a 0.05, és la interacció del diàmetre de l'eina amb la velocitat de rotació, però s'han obtingut millors resultats tenint en compte aquesta combinació que sense ella.

L'equació que permet predir l'alçada en funció de Dt i S és la següent:

$$\text{Alçada} = 41,14 - 4,13 \cdot \text{Dt} - 3,13 \cdot \text{S} - 2,5 \cdot \text{Dt}^2 - 1,75 \cdot \text{Dt} \cdot \text{S} \quad (1)$$

La superfície de resposta obtinguda es la següent:

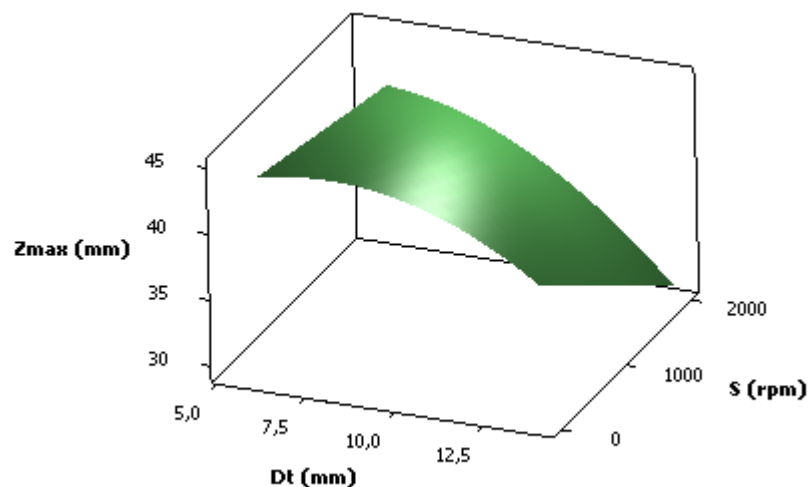


Figura 3.2 Superfície de resposta per l'alçada en funció de Dt i S

Com s'aprecia a la Figura 3.2 tant la S com la Dt són significatives però té més influència el diàmetre de l'eina ja que es veu clarament com quan s'augmenta aquest valor l'alçada disminueix. Quan s'augmenta la velocitat de rotació també hi ha una disminució de l'alçada però en aquest cas menor al cas anterior.

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 41,53%, 66,48% i 0 respectivament es pot dir que l'ajust és correcte tot i que les R^2 podrien donar valors més alts.

3.2 Força màxima

De la mateixa manera que s'ha fet en l'apartat anterior, es procedeix a trobar la taula de valors estadístics, l'equació que defineix la força màxima i les superfícies de resposta.

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=47,39% R-cuad. (ajusted)=63,05%*".

La taula de valors estadístics en aquest cas no contempla cap terme quadràtic però sí una interacció.

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

Font	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regressió	3	366113	366113	122038	15,79	0
Lineal	2	322057	322057	161028	20,83	0
Dt (mm)	1	320779	320779	320779	41,5	0
Δz (mm)	1	1278	1278	1278	0,17	0,688
Interacció	1	44056	44056	44056	5,7	0,026
Dt (mm)* Δz (mm)	1	44056	44056	44056	5,7	0,026
Error residual	23	177791	177791	7730		
Falta d'ajust	5	41546	41546	8309	1,1	0,396
Error pur	18	136245	136245	7569		
Total	26	543903				

Com mostra la Taula 3.3, no tots els termes són significatius. S'ha hagut d'entrar a l'equació la variable Δz tot i que és no significativa. Això és degut a que la interacció de Dt i Δz sí que era significativa.

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

$$F_{\max} = 780,35 + 163,5 \cdot Dt + 10,32 \cdot \Delta z - 104,95 \cdot Dt \cdot \Delta z \quad (2)$$

La superfície de desposta de $F_{\max}$ és la següent:

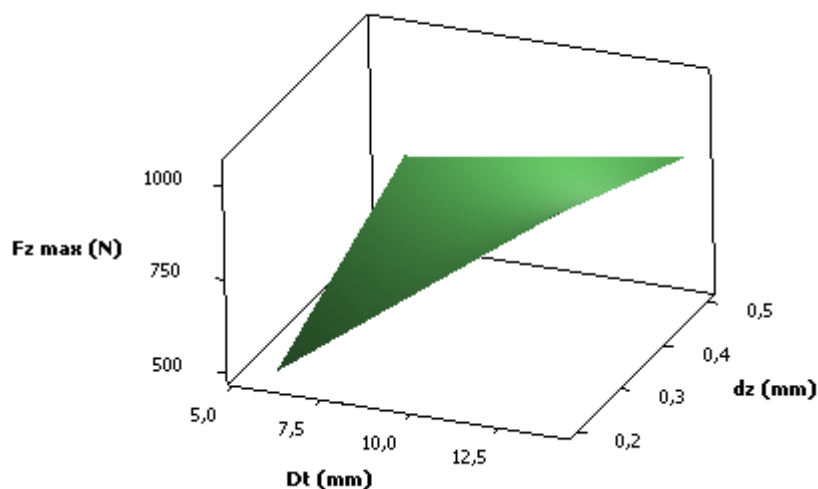


Figura 3.3 Superfície de resposta per la força màxima en funció de Dt i Δz

La superfície de resposta es pot observar a la Figura 3.3. Es pot veure que Dt és més significativa que Δz ja que aquesta última presenta una tendència més recta al llarg de l'eix.

A l'hora de comprovar que el model s'ajusta correctament s'ha d'analitzar els coeficients de R^2 i el p-valor de la fila de Regressió. Aquests són 47,39%, 63,05% i 0 respectivament. Tal i com ha passat amb l'alçada es veu que els coeficients de R^2 poden ser millors però es considera que l'ajust és correcte.

3.3 Temperatura màxima

En el present apartat s'ha procedit a fer el mateix que en els apartats anteriors però ara considerant la temperatura. Tal i com ha succeït amb l'alçada i la força hi ha hagut dos termes significatius.

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=72,91% R-cuad. (ajusted)=82,91%*".

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	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regressió	5	5312,8	5312,8	1062,56	26,23	0
Lineal	2	4482	4482	2240,99	55,31	0
Dt (mm)	1	196,6	196,6	196,59	4,85	0,039
S (rpm)	1	4285,4	4285,4	4285,39	105,77	0
Quadràtic	2	558,8	558,8	279,38	6,9	0,005
Dt (mm)*Dt (mm)	1	379,8	473,9	473,94	11,7	0,003
S (rpm)*S (rpm)	1	179	179	178,96	4,42	0,048
Interacció	1	272,1	272,1	272,09	6,72	0,017
Dt (mm)*S (rpm)	1	272,1	272,1	272,09	6,72	0,017
Error residual	21	850,8	850,8	40,52		
Falta d'ajust	3	215,8	215,8	71,93	2,04	0,144
Error pur	18	635,1	635,1	35,28		
Total	26	6163,7				

La Taula 3.4 mostra que, a diferència de les anteriors, s'obté dos termes quadràtics i un d'interacció. També es veu que tots els termes que apareixen són significatius i no n'hi ha cap que s'hagi d'haver afegit de forma forçada.

L'equació que permet predir valors de temperatura màxima en funció de Dt i S és:

$$T_{\max} = 76,6 + 4,04 \cdot Dt + 18,89 \cdot S - 8,6 \cdot Dt^2 - 5,28 \cdot S^2 + 8,24 \cdot Dt \cdot S \quad (3)$$

La superfície de resposta obtinguda és la que es mostra a continuació:

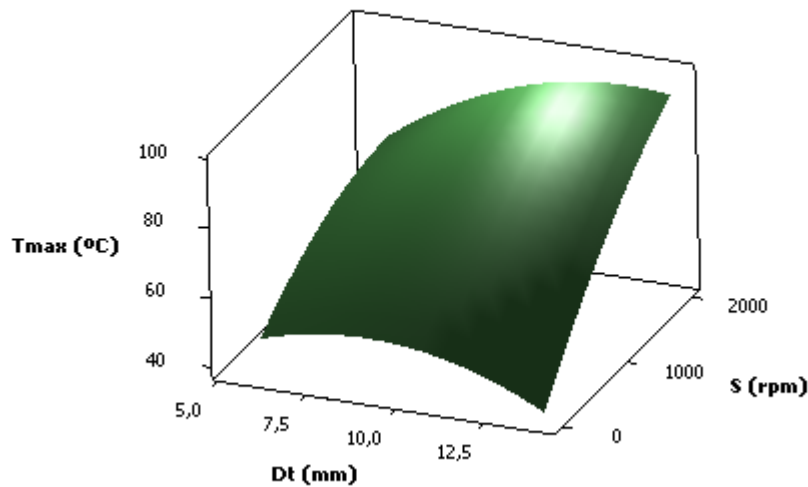


Figura 3.4 Superfície de resposta per la temperatura màxima en funció de Dt i S

Que la Figura 3.4 mostri unes tendències corbes al llarg dels dos eixos és una bona senyal, ja que indica que les dos variables són significatives i que un petit canvi en elles suposaria una canvi en el valor de la temperatura màxima.

Com que els coeficients R^2 prenen uns valors de 72,91% i 82,91% i el p-valor del terme de regressió val 0 es considera que el model s'ajusta correctament, fins i tot millor que en els dos casos anteriors.

3.4 Rugositat superficial

En aquest últim apartat es fa el mateix que en els anteriors però amb la rugositat superficial. Aquest cas és una mica diferent de la resta ja que, després d'analitzar el model previ, s'ha observat que els resultats no són tant bons com en els casos anteriors. En aquest cas s'han hagut d'acceptar com a significatius tres termes, ja que només hi havia com a significatives dos interaccions. Aquest pas es pot observar en l'annex C. El model que presentava els millors resultats era el que considerava el diàmetre de l'eina (Dt), la velocitat de rotació (S) i la velocitat d'avanç (F). Aquest cas ha sigut l'únic en el que s'han tingut en compte tres termes, en la resta només se m'han tingut en compte dos.

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=0% R-cuad. (ajusted)=31,37%*".

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

Font	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regressió	5	0,136	0,136	0,027	3,38	0,022
Lineal	3	0,038	0,038	0,012	1,57	0,226
Dt (mm)	1	0,007	0,007	0,007	0,1	0,759
S (rpm)	1	0,035	0,035	0,035	4,41	0,048
F (mm/min)	1	0,001	0,001	0,001	0,21	0,653
Interacció	2	0,098	0,098	0,049	6,08	0,008
Dt (mm)*F (mm/min)	1	0,049	0,049	0,049	6,12	0,022
S (rpm)*F (mm/min)	1	0,048	0,048	0,048	6,04	0,023
Error residual	21	0,169	0,169	0,008		
Falta d'ajust	13	0,135	0,135	0,104	2,45	0,104
Error pur	8	0,034	0,034	0,004		
Total	26	0,306				

Com s'ha explicat anteriorment, s'ha buscat el model que millors resultats donava i que es pot observar en la Taula 3.5.

L'equació que permet predir valors de rugositat en funció de Dt, S i F és:

$$\text{Rugositat} = 0,44 + 0,008 \cdot Dt - 0,05 \cdot S - 0,01 \cdot F + 0,11 \cdot Dt \cdot F - 0,11 \cdot S \cdot F \quad (4)$$

Les superfícies de resposta obtingudes pel programari es mostren a continuació:

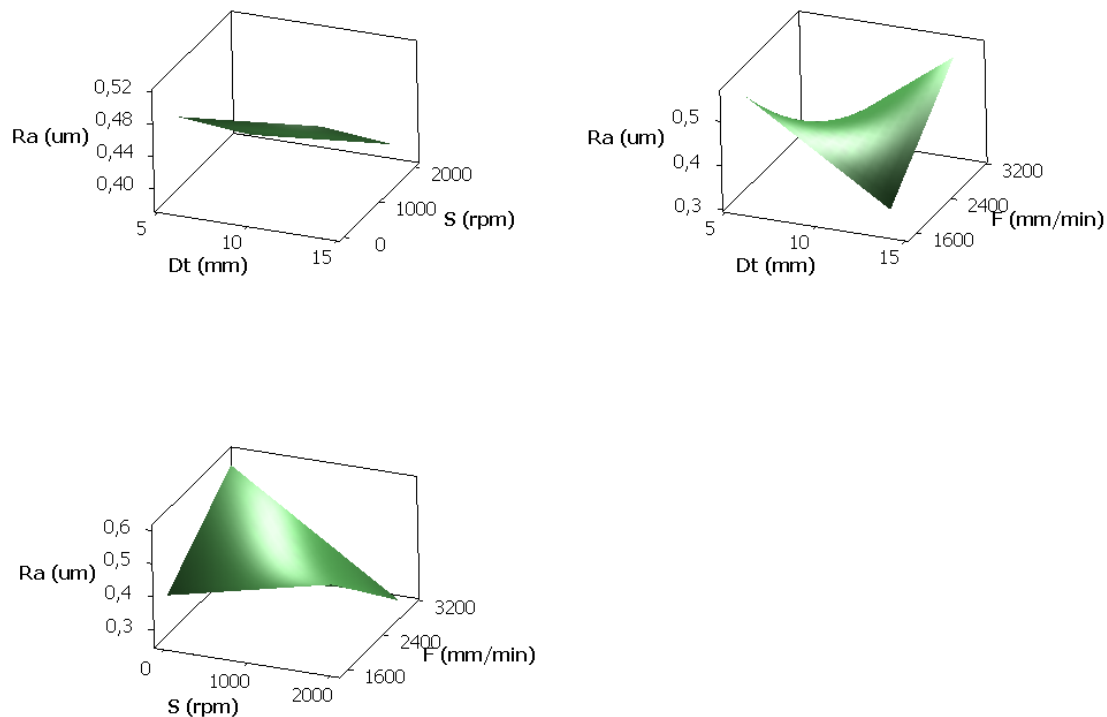


Figura 3.5 Superfície de resposta per la rugositat superficial en funció de Dt , S i F

Com que hi ha tres variables significatives hi ha tres superfícies de resposta, en els altres apartats només se n'obtenia una. El que s'observa en la Figura 3.5 té força sentit però en algunes corbes hi ha poca relació amb els resultats obtingut en la Taula 3.5 si tenim en compte que pels termes no significatius la corba hauria de ser més plana en els seus respectius eixos. El p-valor del terme Regressió és inferior al 5%, el que confirma la teoria de que és un resultat acceptable però molt millorable ja que els valors de R^2 són molt baixos.

Tenint en compte el dit anteriorment, es pot afirmar que és arriscat predir valors de rugositat donades una velocitat de rotació, diàmetre de l'eina i velocitat d'avanç.

3.5 Precisió dimensional

Per a comprovar les diferències dimensionals que han aparegut entre la xapa deformada i la geometria teòrica s'ha utilitzat l'escàner 3D mencionat anteriorment en l'apartat 2.5. S'han escanejat i comparat un total de 4 peces. Els experiments escollits han sigut els mostrats en la Taula 3.6.

Taula 3.6 Peces escanejades i comparades per l'anàlisi dimensional

Experiment	Dt (mm)	S (rpm)	F (mm/min)	Δz (mm)
1	6	0	2250	0,35
3	14	0	2250	0,35
18	6	1000	3000	0,35
21	10	0	2250	0,2

Com es pot observar han sigut triades 3 peces amb cadascuna de les eines de les que es disposa i a més, una altra peça on el paràmetre que interessava variar era la velocitat de rotació de l'eina. La velocitat de rotació d'aquesta última peça s'ha triat que sigui de 1000 rpm perquè no hi havia la possibilitat de que fos 2000 rpm. Això és lògic, ja que totes les peces fabricades amb la velocitat de rotació màxima han trencat i comparar el model teòric amb una xapa trencada no té cap sentit. Es pot dir que els paràmetres que són més interessants de comparar són el diàmetre de l'eina i la velocitat de rotació i d'aquesta idea obtenim la taula anterior.

Després de procedir a l'escaneig de les peces de cada una de les cares amb l'escàner *DAVID*, s'han introduït juntament amb la geometria teòrica amb el software *SAL 3D*. En la Figura 3.6 es mostra un exemple, de com queda la superposició d'una peça fabricada amb la peça teòrica.

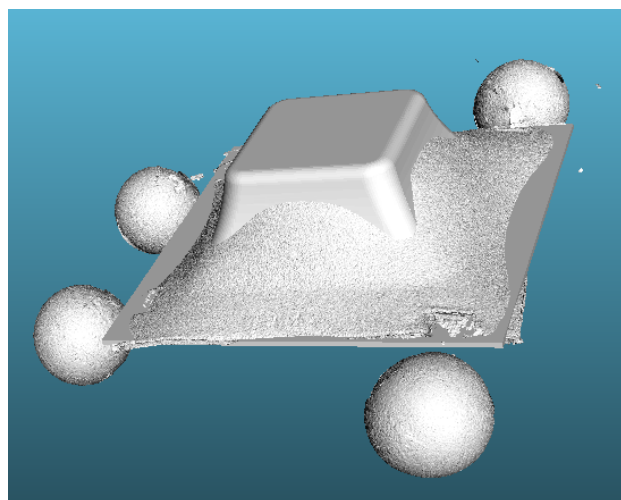


Figura 3.6 Superposició de la peça teòrica amb la peça fabricada

Un cop s'obté el vist en la figura anterior, ja es pot comparar la diferència superficial que existeix entre cada una de les peces amb la geometria teòrica, tot utilitzant una escala de colors adient. Un exemple d'aquesta visualització en 3D es la imatge següent (Figura 3.7).

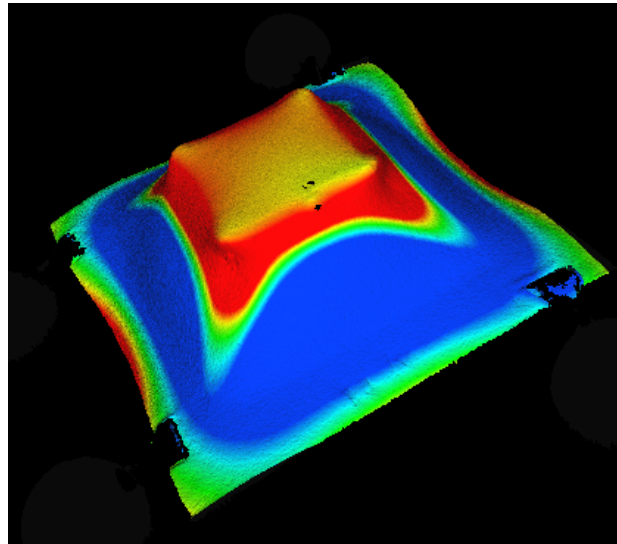
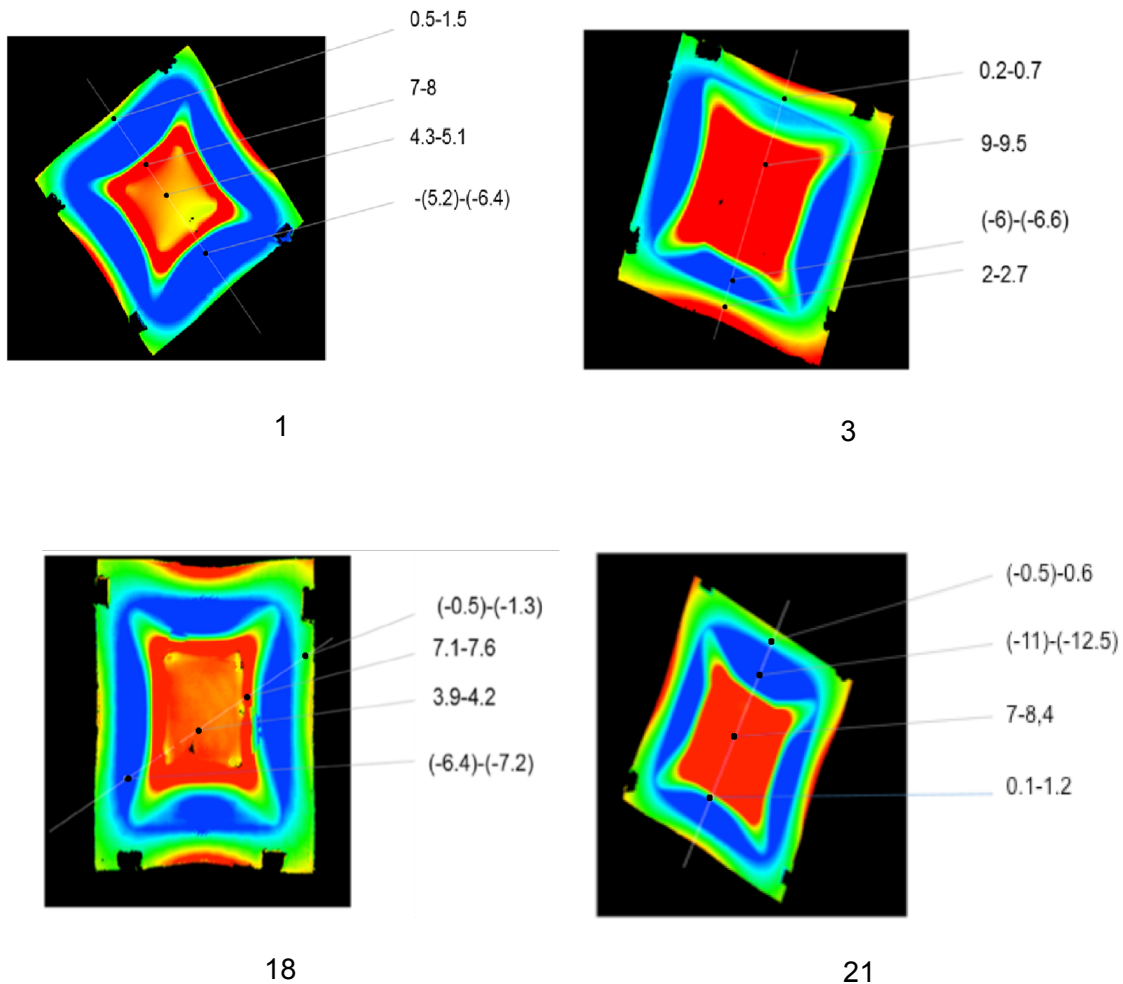


Figura 3.7 Exemple de la diferència superficial

Un cop s'executa el software per a que calculi numèricament la diferència (en mil·límetres) de cada una de les peces, es pot crear la Figura 3.8 que hi ha a continuació.

Per a cada imatge s'han seleccionats quatre punts, al llarg d'una línia que travessa tota la peça, d'on seran extrets els valors numèrics de la desviació. Com que el que donava el programa era una distribució de desviacions per a cada zona, s'ha decidit agafar el valor mínim i el màxim que apareixia. Llavors per a cada punt hi haurà un valor mínim i un valor màxim, separats per un guió. En les zones de color blau els valors obtinguts són negatius, el que ens vol dir és que en aquella zona l'altura que té la peça és major a la peça teòrica. Quan els valors són positius vol dir exactament al revés, l'altura de la peça teòrica és superior a la peça fabricada. Quan els valors són petits hi predomina el color verd, per a valors intermitjos apareix el color groc i finalment per a valors grans hi ha el vermell.

Figura 3.8 Comparació numérica de la desviació superficial de 4 peces amb la teòrica



Com es pot observar a sota de cada imatge hi ha el número de la peça a la que correspon. Una primera observació que es pot fer és que la peça 1 (eina de 6 mm) és la que presenta millors valors respecte la 3 i la 21, que són les fetes amb les altres eines, pel que es pot dir a primera vista que la peça de 6 mm fa peces amb un bon acabat superficial. Això ens hauria d'indicar que quant més petit és el diàmetre de l'eina, més s'aproxima al perfil teòric, però veient que la peça 21 (feta amb l'eina de 10 mm) té els valors més grans de desviació, no té gaire lògica.

Pel que fa a la desviació que hi ha a la part alta de la piràmide (color vermell), es pot veure que pràcticament oscila entre els 8 i 9 mm. Aquí es pot veure l'efecte que té la recuperació elàstica d'aquest material, tot i que es disposava d'un motlle, al final hi ha

una reducció important de l'alçada màxima de la piràmide. La desviació negativa que es pot observar a les parets laterals en totes les peces indica que és molt difícil obtenir els angles que té la geometria teòrica.

3.6 Comparació de resultats SPIF amb TPIF i discussió

En aquest apartat es comparen els resultats obtinguts dels models estadístics d'aquest treball (TPIF) amb els resultats extrets d'un treball anterior en SPIF (López, 2015). En el cas del projecte amb SPIF, no s'havien fet els mateixos experiments que en aquest. S'havia utilitzat la mateixa metodologia *Box-Behnken* per fer els experiments, però només variaven 3 paràmetres. A diferència d'aquest projecte, el diàmetre de l'eina es mantenia constant (10 mm) i les altres tres (profunditat de passada, velocitat de rotació i velocitat d'avanç) sí que anaven variant amb els mateixos valors que en aquest projecte. Per poder fer una bona comparació, s'han hagut de mecanitzar els experiments restants amb les eines de 6 i 14 mm, per així tenir els 27 mateixos experiments, tant amb TPIF com amb SPIF. Com en la resta dels experiments, amb les peces fabricades amb SPIF, s'ha mesurat la força vertical, la temperatura màxima i la rugositat superficial. A l'hora de fer la comparació, és necessari fer l'anàlisi estadística amb el mateix software (*minitab*) i així poder avaluar quines variables són significatives o no, de la mateixa manera que s'ha explicat anteriorment (Anàlisi estadística).

En aquest apartat es mostraran els diferents valors d' R^2 (*R-cuad. (pred.)* i *R-cuad. (ajusted)*) i les equacions per a cada model. A més es farà una breu comparació amb els resultats obtinguts en l'apartat 3. A l'annex F hi apareixen les taules finals i les superfícies de resposta.

3.6.1 Alçada

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=73,3% R-cuad. (ajusted)=87,08%*".

Els valors d' R^2 que s'obtenen són millors que en el cas de TPIF, és un bon resultat però és només un anàlisi estadística, no significa que la peça final tingui una millor relació d'altura amb la peça teòrica.

Cal dir que en aquest model no s'ha hagut d'incorporar cap variable no significativa per obligació, totes les variables mostrades a l'equació següent són significatives, ja que tenen un P-valor menor a 0,05.

$$\text{Alçada} = 100 - 1,23 \cdot Dt - 5,04 \cdot S - 5,11 \cdot S^2 - 3,69 \cdot Dt \cdot S \quad (5)$$

3.6.2 Força màxima

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=95,95% R-cuad. (ajusted)=97,02%*".

Veient les d' R^2 obtingudes es veu que és un resultat quasi perfecte. Això vol dir que, tot i haver hagut d'entrar la Δz com a significativa, el resultat final obtingut és molt bó. En aquest cas, com en l'anterior, sobtenen uns millors valors d' R^2 que amb TPIF. Hi ha 3 variables significatives, per tant hi haurà 3 superfícies de resposta, com s'ha vist ja anteriorment.

L'equació que s'obté per aquest model és la següent:

$$\begin{aligned} F_{\max} = & 626,33 + 187,87 \cdot Dt - 98,821 \cdot S + 6,39 \cdot \Delta z + 38,246 \cdot S^2 - \\ & 64,9 \cdot Dt \cdot S + 46,34 \cdot Dt \cdot \Delta z \end{aligned} \quad (6)$$

3.6.3 Temperatura màxima

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=59,75% R-cuad. (ajusted)=66,23%*".

En aquest cas les d' R^2 obtingudes són pitjors que les obtingudes amb TPIF. Tot i que aquest era el millor model possible que es podia trobar, s'han hagut de passar com a significatives 2 variables, el que provoca aquests valors anteriors.

L'equació que ens dona el programa és la següent:

$$T_{\max} = 71,92 + 3,67 \cdot Dt + 13,73 \cdot S - 7,92 \cdot S^2 + 5,57 \cdot Dt \cdot S \quad (7)$$

Les variables que formen aquesta equació són exactament les mateixes que en l'alçada (diàmetre de l'eina i velocitat de rotació).

3.6.4 Rugositat superficial

Els diferents valors d' R^2 que s'han obtingut per aquest model són: "*R-cuad. (pred.)=39,05% R-cuad. (ajusted)=46,32%*".

Tot i que no són uns valors gaire bons, són millors que els obtinguts amb TPIF, ja que no hi ha cap d' R^2 que sigui igual a 0. S'han hagut de convertir en significatives un total de 3 variables que no ho eren per poder tenir el model actual, això explica els valors d' R^2 obtinguts.

L'equació resultant es pot veure a continuació:

$$\text{Rugositat} = 0,58 + 0,02 \cdot Dt - 0,02 \cdot \Delta z - 0,17 \cdot Dt^2 - 0,06 \cdot \Delta z^2 \quad (8)$$

3.6.5 Discussió

La principal diferència que hi ha entre els experiments fets amb TPIF i amb SPIF és que amb el *two point* s'han trencat dos peces més que amb l'altre mètode. Si estudiem la temperatura i la força en ambdós casos es veu clarament que amb *single point* no s'assumeixen forces ni temperatures tant altes com en l'altre cas. Com ja s'ha comentat anteriorment i com és lògic, quant més altes siguin la temperatura i la força, més probable és que la peça acabi trencant. L'augment de la força i la temperatura en TPIF estan degudes al motlle, l'efecte de fricció que hi ha entre l'eina, la xapa i el motlle provoca un augment de temperatura i el mateix contacte fa augmentar la força també. Cal dir que no estem parlant de variacions molt altes, però quan la temperatura es prou alta, és un detall que s'ha de tenir en compte.

Els paràmetres que més influeixen, tant en TPIF com en SPIF, són el diàmetre de l'eina i la velocitat de rotació. En ambdós casos, quan s'ha fet l'anàlisi estadística, s'ha

vist que l'alçada depèn únicament d'aquests dos paràmetres. En el cas de TPIF, quan el diàmetre de l'eina és major, s'experimenta una força vertical més gran que amb les altres eines. Com ja s'ha vist, cap peça fabricada amb la màxima velocitat de rotació ha arribat a l'alçada màxima. És clar que la velocitat de rotació provoca un augment de la temperatura i quan se superen els 80°C és difícil que la deformació pugui acabar de manera normal.

D'altra banda, en el cas de l'SPIF, totes les peces menys una han estat trencades quan es treballava a velocitat de rotació màxima. Utilitzant aquest procés, igual que amb l'altre, la rotació té un paper fonamental en la temperatura màxima que s'assoleix. En canvi, no té tanta rellevància el diàmetre de l'eina amb el que s'ha treballat. Si bé amb TPIF, totes les peces exceptuant una han trencat quan l'eina era la major, amb SPIF es veu clarament que el diàmetre de l'eina no està tant relacionat amb el trencament de les xapes, ja que no s'han assolit forces gaire grans.

4 Cas d'estudi (pròtesi cranial)

Com ja s'ha esmentat anteriorment, la tecnologia de deformació incremental pot ser utilitzada en molts camps, des de la fabricació de peces per a la indústria automobilística, utilitatge per a ús domèstic fins a la biomedicina. Justament en aquest ultima camp és on hi ha un ventall molt gran de possibilitats per explotar.

Hi han hagut altres treballs que han fet una primera aproximació en la utilització de ISF, utilitzant *single point*, per a fabricar una pròtesi de crani a escala reduïda. Aquest projecte serà el primer en utilitzar un material biocompatible per fer una pròtesi cranial a escala real.

El GREP treballa amb altres grups de recerca en l'estudi de producció de pròtesis cranials mitjançant diverses tecnologies. Els defectes de la zona cranial com a resultat d'un trauma o d'una intervenció quirúrgica usualment creen una molèstia funcional o estètica al pacient i fent ús de pròtesis que es fabriquen per a què encaixin perfectament amb el defecte cranial es pot aconseguir una bona reconstrucció del crani. En concret tractarem la zona dreta d'un crani (Figura 4.1) i la utilització d'aquesta pot ser degut a gran varietat de motius des de operacions mèdiques a reparar accidents.

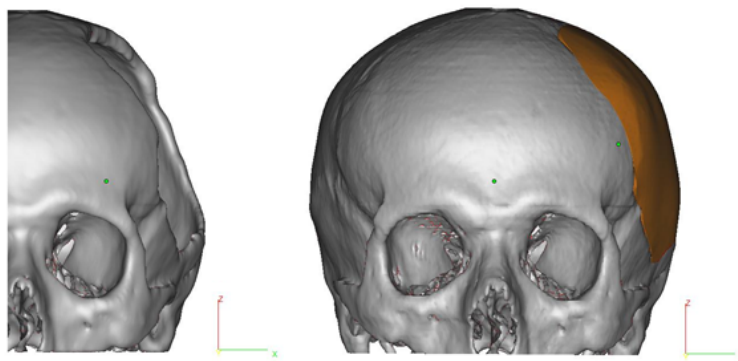


Figura 4.1 Imatge del crani amb i sense la pròtesis

El primer que s'havia de fer era generar el model 3D de la pròtesi de crani a partir de les imatges tomogràfiques obtingudes del pacient. Aquest model 3D ha estat facilitat per un centre tecnològic brasiler, CTI Renato Archer, en el marc d'un projecte europeu International Research Exchange for Biomedical Devices Design and prototyping (FP7-PEOPLE-2009-IRSES-247476). Com es pot observar a la Figura 4.2, tot i que les

xapes de UHMWPE són de 150x150mm, la superfície lliure que es disposa és de 120x120 mm i la geometria de la pròtesi sobrepassa aquest límit. Per aquest motiu s'han hagut d'utilitzar unes xapes de diferent dimensions (200x200 mm), així la superfície lliure de la que es disposa ara és major.

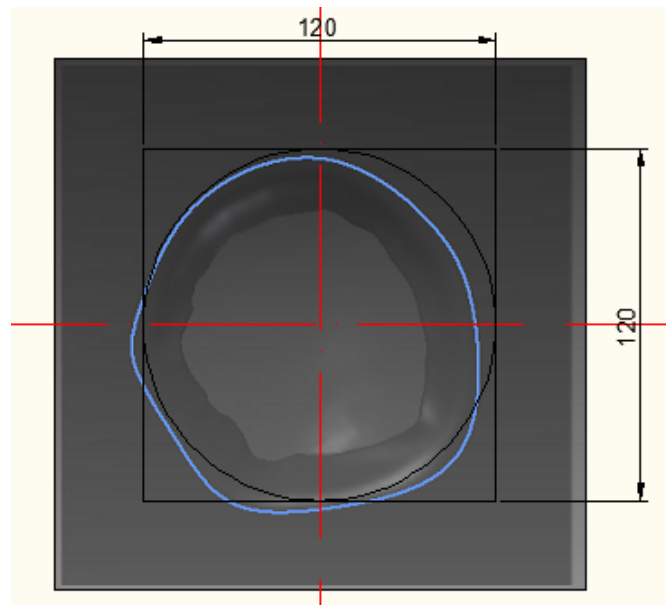


Figura 4.2 Planta de la pròtesi cranial

Com que la metodologia utilitzada es la TPIF, és necessari fabricar un motlle de la pròtesi cranial. Això és fàcil perquè ja es disposa del model 3D i només és necessària la seva mecanització. Per fer-ho s'ha utilitzat la mateixa màquina que es va utilitzar amb el motlle de la piràmide truncada (*Deckel maho 64Vlinear*). El material utilitzat ha sigut un aglomerat de fusta, com es pot veure en la Figura 4.3. En aquest cas no s'han fet 8 forats per cada cara ni cap tipus d'altre mecanitzat posterior, ja que el motlle és més gran del normal i no està preparat per la taula del centre de control numèric *Kondia® HS1000*. S'ha optat per un utilatge diferent per a poder subjectar la xapa contra el motlle (Figura 4.4), però ha fet la mateixa funció i els resultats obtinguts són molt bons. També, a diferència de l'altre motlle, no ha calgut fer un forat a la base de la pròtesi per evitar un possible buit, ja que no ha sigut necessari, s'ha fet una primera prova i s'ha comprovat que no hi havia cap problema amb el mecanitzat.

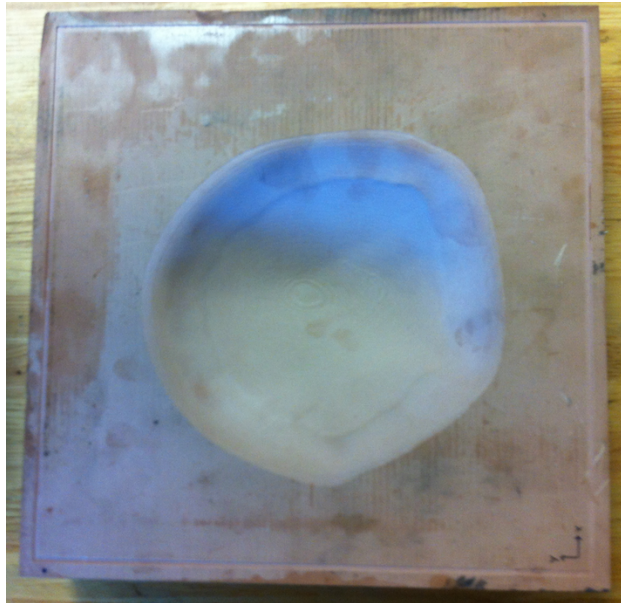


Figura 4.3 Motlle de la pròtesi cranial

Amb el model de la pròtesi, el següent pas és generar les trajectòries que seguirà la màquina de control numèric utilitzant el programa *Goe/an*. Amb aquest software s'obté un programa codificat en CNC i ja es pot executar (després de col·locar la xapa, posicionar el zero de la peça, lubricar, etc.). Com que mai s'havia mecanitzat una pròtesi de mida real amb aquest material, el primer que es va fer va ser executar en buit (sense la xapa), només amb el motlle i a una velocitat d'avanç lenta, per comprovar que l'eina no impactava amb el motlle. Un cop s'ha vist que no hi ha cap tipus de col·lisió ja es pot executar el programa amb la xapa.

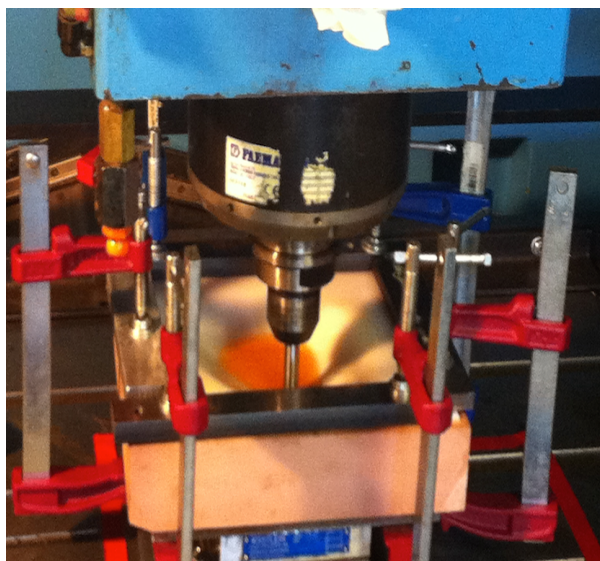


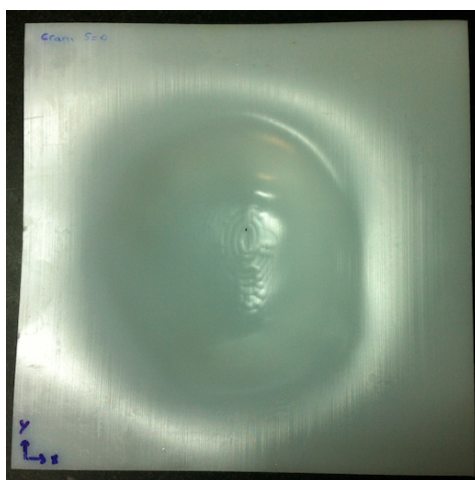
Figura 4.4 Utilitatge mecanitzat de la pròtesi

4.1 Resultats obtinguts

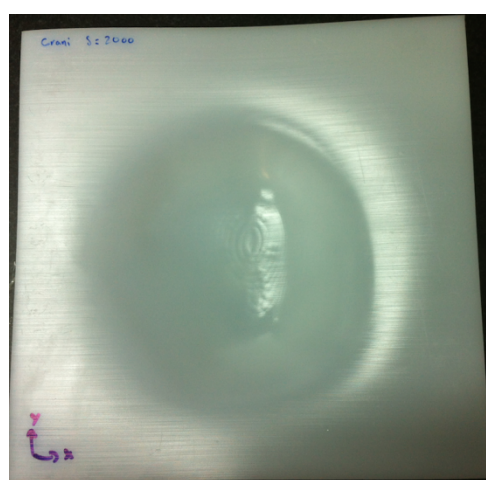
Com mostra la Taula 4.1, s'han fabricat dos pròtesis. En ambdues l'eina utilitzada ha sigut la de 10 mm de diàmetre, ja que després de tots els experiments s'ha observat que és la que té un millor comportament. A més, s'han hagut de triar els altres paràmetres de deformació. S'ha decidit triar un pas incremental de 0,5 perquè s'ha demostrat que quan el pas incremental és més baix hi ha un augment de la temperatura, ja que triga més estona per fabricar les peces i per tant ha de fer més passades sobre la superfície de la xapa. La velocitat d'avanç triada ha sigut la màxima (3000 mm/min), ja que, dels tres paràmetres a triar, és el que menys importància té en l'augment de la temperatura i la força, i aquests dos són els responsables de que la peça pugui trencar o no, així que es preferible que el procés duri el menys possible, per al tema econòmic. Com a últim paràmetre hi ha el de la velocitat de rotació. S'ha pogut veure que aquest és el més influent en la temperatura que es pugui arribar en la deformació, segons s'ha pogut veure en els experiments. S'ha decidit provar amb els extrems (0 i 2000 rpm) per veure amb més claredat les diferències que hi puguin haver en les peces finals.

Taula 4.1 Factor de les proves de la pròtesi de crani

	Pas incremental (mm)	Rotació eina (rpm)	Velocitat avanç (mm/min)
Prova 1	0,5	Lliure	3000
Prova 2	0,5	2000	3000



a)



b)

Figura 4.5 Imatges de les proves de la pròtesi de crani a) Prova 1 b) Prova 2

4.2 Anàlisi dels resultats

De la mateixa manera com s'ha actuat amb els experiments, les dues proves de la pròtesi cranial, es poden analitzar mitjançant l'escàner 3D per tal de veure l'error dimensional que existeix respecte la pròtesi teòrica. En la Figura 4.6 es pot observar, com anteriorment, dos imatges per comprendre millor com s'avalua la precisió dimensional de les pròtesis de crani.

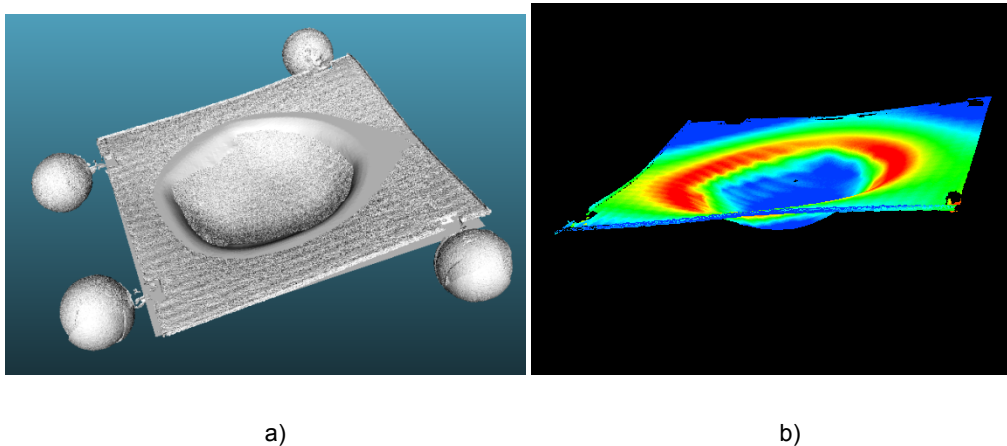


Figura 4.6 a) superposició de pròtesi experimental amb la teòrica b) exemple de la variació dimensional

En aquest apartat s'actuarà de la mateixa manera que anteriorment, s'analitzarà la precisió dimensional en 4 punts al llarg d'una línia que talla de costat a costat les geometries.

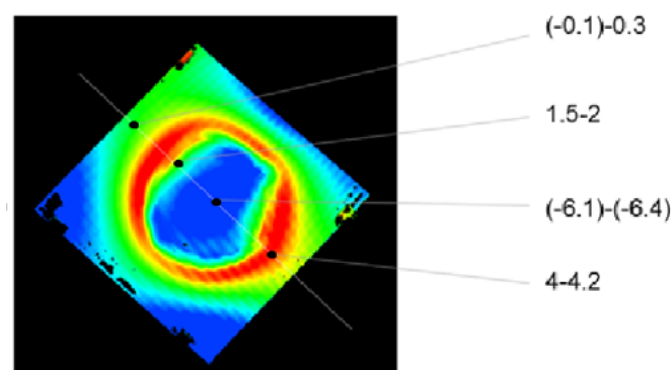


Figura 4.7 Variació dimensional prova 1

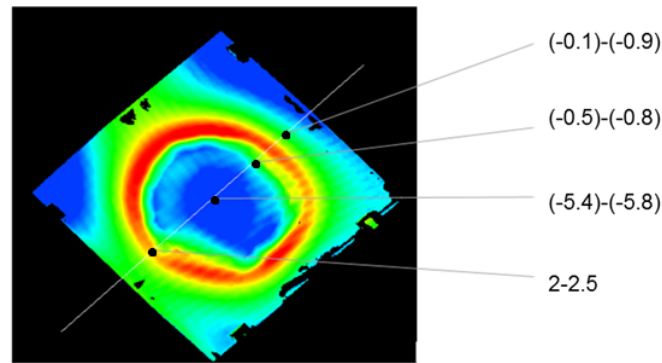


Figura 4.8 Variació dimensional prova 2

Tal i com es pot veure en les imatges anteriors (Figura 4.7 i Figura 4.8) s'ha fet l'anàlisi dimensional de les dues proves esmentades anteriorment. Com en casos anteriors, hi ha dos mesures de desviació per a cada punt, la mínima i la màxima en aquella zona (en mil·límetres). En aquest cas els colors funcionen al revés, com està amb alçada negativa, si la zona està pintada de color blau vol dir que l'alçada de la pròtesi no arriba a l'alçada de la geometria teòrica. El mateix succeeix amb el color vermell, vol dir que l'alçada de la pròtesi està per sota de l'original.

Si s'analitzen els valors es pot arribar a la conclusió que la prova 2 obté un acabat dimensional més semblant a la teoria, tot i que la diferència amb la prova 1 és de dècimes de mil·límetres i només analitzant certs punts de tota una superfície és difícil arribar a una conclusió acurada. Al fi i al cap les pròtesis van destinades a persones amb una lesió al crani molt important. Al pacient no li representaria un inconvenient que hi hagués una petita desviació respecte el model teòric perquè sobretot, ajuda a que la seva autoestima augmenti i es reincorpori al seu entorn social i tingui, en conseqüència, un millor estil de vida.

5 Resum de l'estudi de costos

El pressupost total del projecte sobre l'experimentació amb la deformació incremental de xapa de UHMWPE, utilitzant la variant de TPIF (considerant les despeses de material, mà d'obra i les despeses indirectes) ascendeix a 9929.06€ (NOU MIL NOU-CENTS VINT-I-NOU EUROS AMB SIS CÈNTIMS).

6 Conclusions

Aquest treball mostra una primera experimentació amb un material polimèric biocompatible utilitzant la tecnologia de deformació incremental de xapa amb la variant TPIF.

Els resultats obtinguts de l'anàlisi estadística no han sigut els millors possibles, s'han pogut extreure algunes conclusions interessants que aporten un nou coneixement sobre el seu comportament. S'ha demostrat que la velocitat de rotació afecta molt a la xapa i a la temperatura que s'assoleix durant el procés. També s'ha pogut apreciar el gran efecte de recuperació elàstica que han petit totes les peces i com les peces fabricades no respectaven la geometria original, gràcies a l'escàner 3D.

Respecte la comparació entre SPIF i TPIF, s'ha pogut veure quin comportament implica el motlle. Tot i que està dissenyat per a que la precisió dimensional sigui millor, s'ha vist com afecta en la força i la temperatura durant el procés. Això es degut a l'efecte de fricció que apareix quan hi ha el motlle o matriu.

Respecte les pròtesis fabricades, es pot dir que s'ha obtingut un bon resultat. Visualment costava apreciar diferències entre les dos peces, tot i que una de elles estava deformada amb velocitat de rotació màxima. Com que la geometria de la pròtesi era més oberta que la piràmide truncada, no hi ha hagut gaire diferència de temperatura amb la pròtesi fabricada amb rotació nul·la.



Figura 6.1 Vista superior de la pròtesi (prova 2)

També s'ha vist com la peça fabricada amb rotació ha obtingut una millor precisió dimensional (Figura 6.1), tot i que només s'han analitzat unes zones concretes. Al final, posats a analitzar la funció de la pròtesi, és insignificant que hi hagi una diferència de dècimes de mil·límetres entre els dos processos. Com ja s'ha dit

anteriorment, en un cas real, el més important és que el pacient pugui recuperar la seva autoestima i es pugui incorporar al seu entorn social.

El que es podria fer de cares al futur és ampliar el disseny d'experiments tot introduint nous paràmetres de procés (gruix de la xapa) o modificar alguns dels existents, per tal d'ampliar el coneixement respecte aquest material.

Finalment, i com a tancament del treball, es mostra la Taula 6.1 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 6.1 Taula d'especificacions actualitzada

Categoria	Descripció	R/O	Realització
Objectiu	Realitzar experiments amb la tecnologia <i>Incremental Sheet Forming</i> utilitzant la variant TPIF i fabricar pròtesis cranials.	R	Sí
Recursos	Centre de mecanitzat Kondia HS-1000 adaptat per a aquesta tecnologia.	R	Sí
	Obtenció de dades de força amb la taula dinamomètrica Kistler 9257B.	R	Sí
	Prendre imatges de temperatura durant el procés de deformació amb càmera termogràfica IRBIS ImageIR 3300.	R	Sí
	Obtenció de dades de rugositats superficials amb el rugosímetre Mitutoyo SurfTest SV1000.	R	Sí
	Calcular la desviació dimensional utilitzant l'escàner 3D <i>David Laserscanner s/s-2</i> .	O	Sí
Mides	Geometria de les piràmides igual per a cada un dels experiments. Les mides s'especifiquen a l'apartat 2.1. Geometria.	R	Sí
	Les mides de les xapes de partida han d'adequar-se al sistema de fixació.	R	Sí
Material	Làmines de UHMWPE (150x150x2 mm)	R	Sí
	Làmines de UHMWPE (200x200x2 mm)	R	Sí
	Lubricant Houghton TD-52.	R	Sí
	Optimitzar l'ús del lubricant.	O	Sí
Eines	Eina de punta esfèrica de 6 mm de diàmetre.	R	Sí
	Eina de punta esfèrica de 10 mm de diàmetre.	R	Sí
	Eina de punta esfèrica de 14 mm de diàmetre.	R	Sí
	Claus angleses i allen pel muntatge del suport i pel canvi de làmina.	R	Sí
	Peu de rei per a diverses mesures.	R	Sí
Deformació	Obtenir el nombre de peces necessari pel disseny d'experiments sense importar l'ordre en què es fabriquen.	R	Sí
	Control continu de la xapa durant el procés de deformació per possibles parades d'emergència.	R	Sí
	Repetir els experiments que presentin dades atípiques o gràfiques il·legibles.	R	Sí
Resultats	Fer anàlisi estadística ANOVA i construir superfícies de resposta per predir resultats.	R	Sí
	Comparar els resultats obtinguts amb resultats extrets de treballs anteriors.	R	Sí

Categoria	Descripció	R/O	Realització
	Fabricació de pròtesis cranials per a la seva posterior valoració.	R	Sí
	Calcular la desviació dimensional utilitzant l'escàner 3D David Laserscanner sls-2 en les peces fabricades amb SPIF	O	No
	Fabricació de pròtesis usant SPIF	O	No
	Optimitzar els paràmetres de procés.	O	No
Termini	Lliurament del treball a la convocatòria de Febrer de 2016.	R	Sí
Costos	Minimitzar el cost del material.	R	Sí

7 Bibliografia

Ambrogio G, Costantino I, Denapoli L, Filice L, Fratini L, Muzzupappa M (2004) Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy

Fratini L, Ambrogio G, Lorenzo R Di, Filice L, Micari F (2004) Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology 53:207-210.

Bagudanch, I. (2011). Disseny dels elements constitutius per adaptar un centre de mecanitzat a la tecnologia ISF. Treball final de carrera.

Puig, M. (2015). Experimentació i comparació de peces fabricades mitjançant les variants SPIF i TPIF. Treball final de grau

López, M. (2015). Aplicació de polímers biocompatibles en la tecnologia Incremental Sheet Forming (ISF). Treball final de grau

Pàgines web:

<http://www.monografias.com/trabajos94/aspectos-esenciales-del-estampado-incremental-punto-simple/aspectos-esenciales-del-estampado-incremental-punto-simple.shtml> (consultada l'octubre de 2015)

http://www.aefi.org/curso-precios-download.asp?name=presentacion_cdeinegri.pdf. (consultada l'octubre de 2015)

<http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/documentos/Biomateriales.pdf>. (consultada l'octubre de 2015)

http://www.unizar.es/actm/biomateriales_2014.pdf (consultada el novembre de 2015)

http://www.eis.uva.es/~macromol/curso07-08/pe/polietileno_de_alta_densidad.htm (consultada el novembre de 2015)

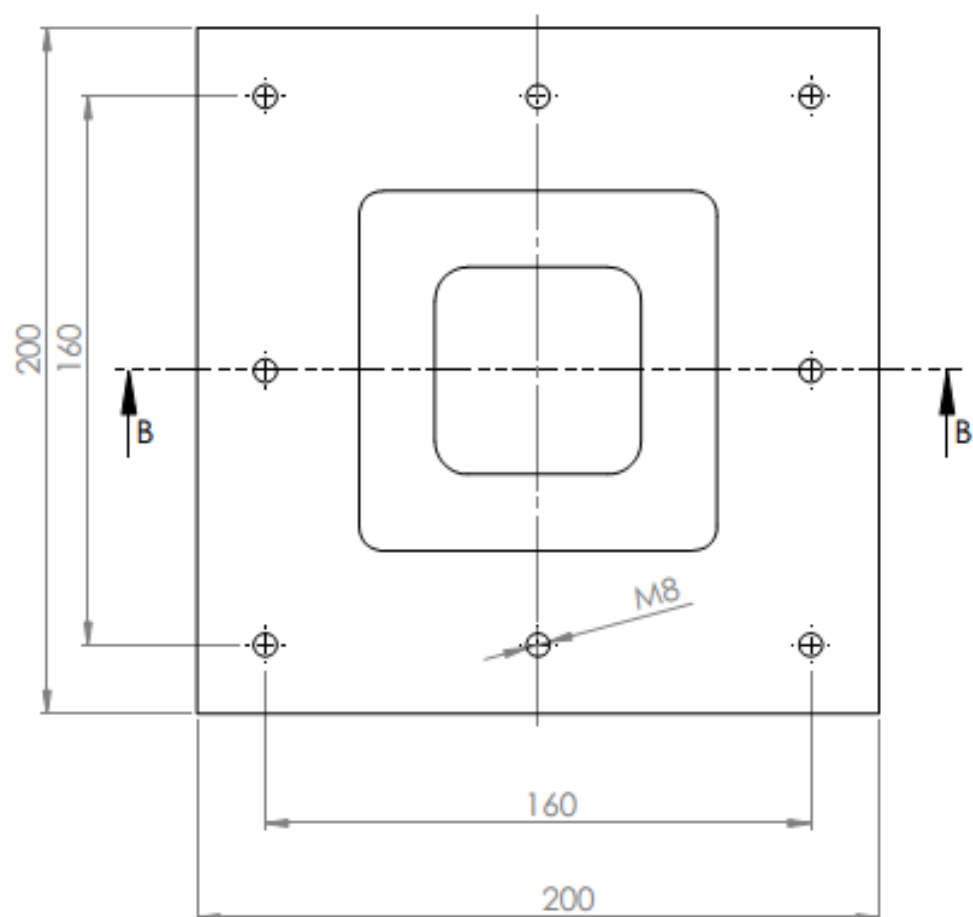
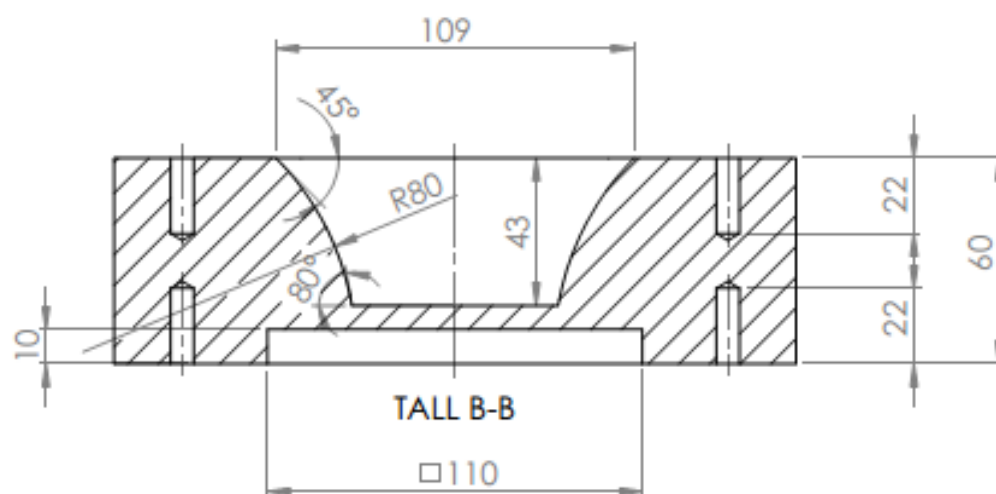
<http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics/how-high-should-r-squared-be-in-regression-analysis> (consultada el desembre de 2015)

<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 desembre de 2015)

ANNEXOS

A. Dimensionat del motlle (piràmide truncada)

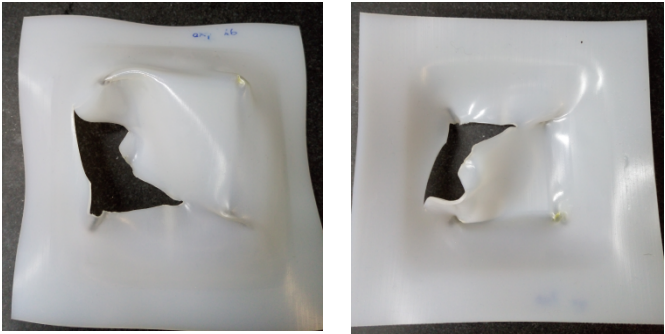
Aquest projecte, al tractar-se d'un estudi experimental només consta d'un sol dimensionat, que és el del motlle de la piràmide truncada, fabricat per un estudiant el 2015 durant el seu treball final de grau (Puig, 2015). Les mesures que hi apareixen són en mil·límetres.

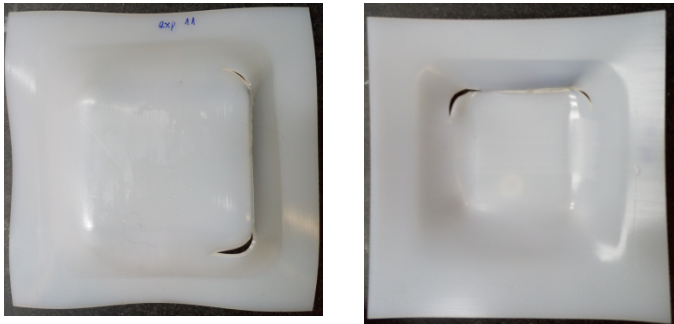
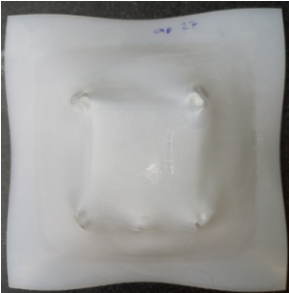


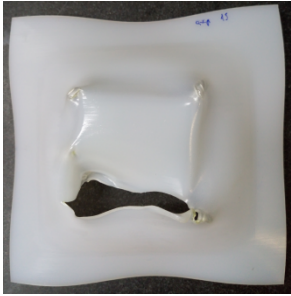
B. Observacions de les piràmides

Aquest apartat conté imatges i observacions d'algunes de les peces finals obtingudes amb la metodologia TPIF. S'han triat les peces que presenten més peculiaritats, ja que moltes tenen el mateix aspecte i s'ha cregut més convenient fer una tria de les 27 peces totals.

Taula B.1 Descripció d'algunes peces fabricades

Experiment	Imatges i observacions
1	En aquesta piràmide els vèrtexs no estan tan marcats, ja que va estar fabricada sense rotació. 
16	Aquest experiment va fallir durant el mecanitzat i mentre s'aturava el procés, l'eina va trencar part de la base. 

11	En aquest cas, el trencament es va produir a una alçada bastant baixa i ,tot i trencar-se, no ha sigut tant brusc com en l'experiment anterior. 
4	Aquesta peça podia haver trencat per qualsevol dels 4 vèrtexs, ja es veia durant el seu mecanitzat, per això es va poder aturar a temps. 
27	En aquest cas, com es pot observar per la claredat dels vèrtexs, es pot afirmar amb molta convicció que, de ser l'alçada major, hagués trencat com en l'exemple anterior. 

15	Aquesta peça trenca de la mateixa manera que la 16 però menys bruscament.  
14	Aquest cas és com el de l'experiment 1, tot i que s'ha fabricat a una velocitat d'avanç major, s'obtenen els mateixos resultats. 
7	Aquesta peça és de les que té un millor acabat, al que visualment es refereix. 