

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Desenvolupament de motlles amb fabricació additiva per la deformació incremental de xapa

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Joan Castells Badia

Tutor: Maria Luisa Garcia-Romeu de Luna

Departament: Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació

Convocatòria (mes/any): Setembre/2019

Índex

MEMÒRIA	5
1. INTRODUCCIÓ.....	6
1.1 Antecedents	6
1.1.1 Geometria.....	8
1.1.2 Material	9
1.2 Objecte	9
1.3 Especificació i abast.....	9
2. METODOLOGIA.....	11
2.1 Metodologia SPIF	11
2.2 Metodologia TPIF	12
2.3 Comparació entre SPIF i TPIF	13
3. RESULTATS SPIF	14
3.1 Previ.....	14
3.2 Primer disseny d'experiments.....	15
3.3 Segon disseny d'experiments.....	18
3.3.1 Precisió	20
3.3.2 Gruix	23
3.3.3 Rugositat.....	25
3.3.4 Força	27
3.3.5 Temperatura.....	29
3.4 Comparació i conclusions principals	32
4. RESULTATS TPIF	46
4.1 Caracterització dels motlles	48
4.1.1 Precisió	48
4.1.2 Rugositat.....	50
5. COMPARACIÓ ENTRE SPIF I TPIF	52

6. CONCLUSIONS	56
7. BIBLIOGRAFIA	58
8. RELACIÓ DE DOCUMENTS	59
<i>ANNEX A ADQUISICIÓ DE DADES I ANÀLISIS ESTADÍSTICA</i>	60
A.1 Precisió	61
A.2 Gruix	62
A.3 Rugositat	63
A.4 Força	64
A.5 Temperatura	65
A.6 Anàlisi estadística	66
<i>ANNEX B EXPERIMENTACIÓ SPIF</i>	69
B.1 Previs	70
B.2 Primer disseny d'experiments	72
B.2.1 Disseny d'experiments	72
B.2.2 Muntatge	73
B.2.3 Resultats primer disseny experiments	73
B.2.3.1 Imatges	74
B.2.3.2 Força	75
B.2.3.3 Temperatura:	76
B.2.3.4 Comparacions i discussió de resultats:	77
B.3 Segon disseny d'experiments	79
B.3.1 Disseny d'experiments	79
B.3.2 Muntatge	81
B.3.3 Resultats segon disseny experiments	81
B.3.3.1 Imatges	82
B.3.3.2 Precisió	83
B.3.3.3 Gruix	86

B.3.3.4 Rugositat.....	89
B.3.3.5 Força	91
B.3.3.5 Temperatura.....	94
B.3.3.6 Comparacions i discussió de resultats.....	97
<i>ANNEX C EXPERIMENTACIÓ TPIF.....</i>	<i>111</i>
C.1 Experiments	112
C.2 Muntatge.....	113
C.3 Resultats.....	114
C.3.1 Imatges.....	115
C.3.2 Precisió	116
C.3.3 Gruix.....	116
C.3.4 Rugositat	117
C.3.5 Força.....	117
C.3.6 Temperatura	118
C.4 Caracterització Motlles	119
C.4.1 Precisió	119
C.4.2 Rugositat	121
<i>ANNEX D FABRICACIÓ MOTLLES</i>	<i>122</i>
D.1 Motlle cavitats	123
D.2 Inert pròtesi.....	124
D.3 Motlle pròtesis.....	126

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Fa uns anys que s'està utilitzant i estudiant el sistema de deformació incremental de xapa (ISF) per tal de poder aconseguir conformar geometries complexes que a través d'altres tècniques de conformat, o no serien possibles o resultarien molt cares. El GREP (Grup de Recerca en Enginyeria de Producte, Procés i Producció) porta uns anys investigant aquesta tècnica per a realització de pròtesis en el camp de la biomedicina. Recentment aquest grup de recerca està immers en un projecte on hi participen diferents Universitat Europees on es busca aconseguir resultats realitzant les geometries conformades amb ISF amb una altra procediment com és el Superplastic Forming (SPF).

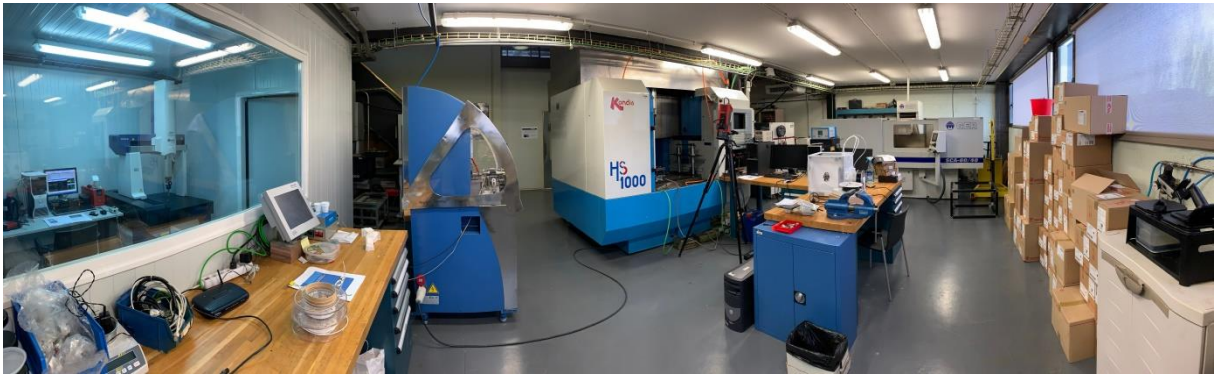


Figura 1 Taller del GREP

La tècnica ISF consisteix en realitzar la forma desitjada a través de la deformació d'una planxa de poc gruix a través, en el nostre cas, d'una eina amb punta semiesfèrica. Dins de ISF hi ha dues variants: SPIF (single point incremental forming) i TPIF (two point incremental forming).

SPIF es basa en tenir la planxa "a l'aire". La planxa es subjecte per el perímetre i es deforma el seu interior amb l'eina de punta semiesfèrica sense cap mena de motlle a sota. Només existeix un sol punt de contacte a la planxa, el de l'eina. Per a la realització d'aquest procés no es necessita més material que la fresadora, l'eina i el suport de la planxa. Veure Figura 2.

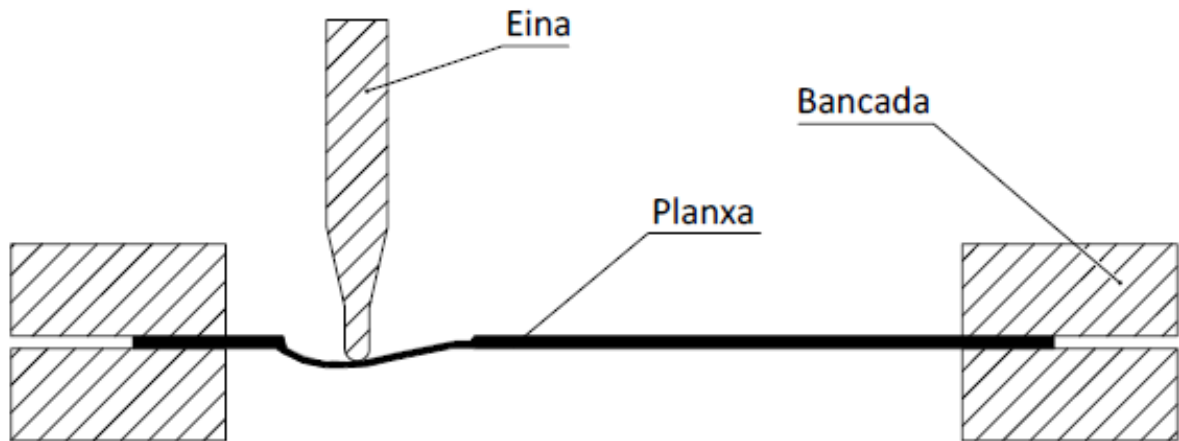


Figura 2 SPIF (single point incremental forming)

TPIF consisteix en tenir la planxa que volem conformar sobre una base on hi ha mecanitzada la forma que volem aconseguir en forma de negatiu. En aquest cas tenim dos punts de contacte amb la planxa, el de l'eina a la part superior i el del motlle a la part inferior. Utilitzant aquest sistema necessitem els components de SPIF més el motlle.

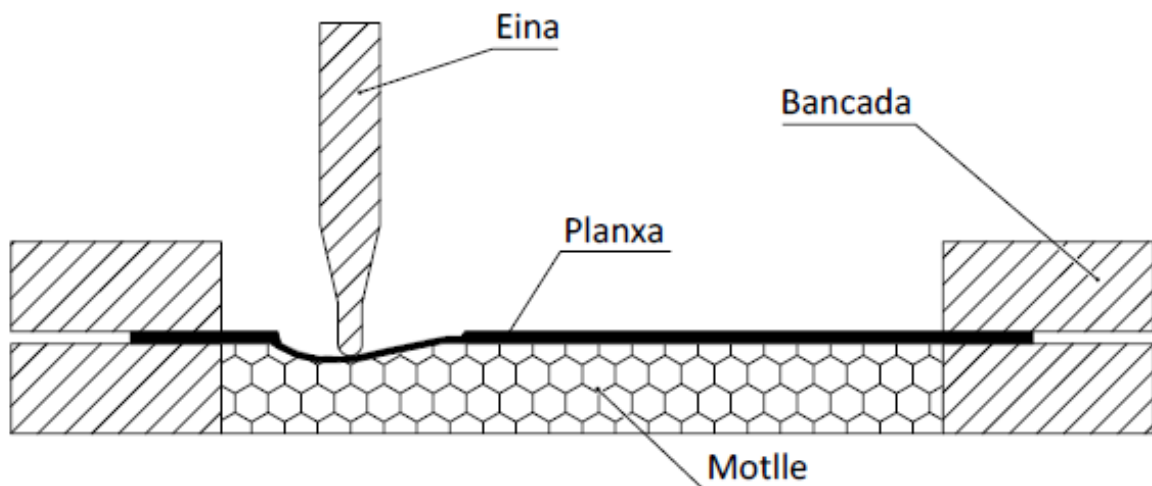


Figura 3 TPIF (two point incremental forming)

La necessitat de tenir un motlle en el sistema TPIF pot fer que sigui una tècnica cara i segons la geometria, difícil d'aconseguir a través de processos de mecanització. En aquest punt és on entra la fabricació additiva. El GREP també porta uns anys estudiant els diferents mètodes de fabricació

additiva i és que, actualment existeixen moltes tècniques diferents per les quals seria possible realitzar motlles suficientment resistents i útils per a utilitzar amb el procediment TPIF. Veure Figura 3.

La fabricació additiva es basa justament en el contrari que la mecanització, en crear cossos a partir de zero afegint material. Les tecnologies més importants en aquest moment serien les de FDM (Fusion Deposition Modeling), SLA (estereolitografia) i SLS (sinterització selectiva per làser). Són tecnologies que estan en desenvolupament sobretot en el tema de materials polimèrics. Actualment es treballa pràcticament al cent per cent amb material polimèrics com poden ser PLA (àcid polilàctic), PVA (acetat de polivinil), ABS (Acrilonitril butadiè estirè), tot i que també s'estan utilitzant els materials polimèrics juntament amb fibres (vidre, carboni) i fins i tot hi ha tecnologies additives que utilitzen pols fèrrica, aquestes últimes més desenvolupades. Aquestes tecnologies són capaç de fabricar pràcticament qualsevol geometria per complexa que sigui a preus molts interessants.

La temàtica d'aquest projecte prové de la col·laboració del GREP amb altres universitat europees (Universitat Politècnica de Bari i Universitat de Sevilla) el qual busca aconseguir determinar els paràmetres de fabricació per tal d'aconseguir realitzar pròtesis biomèdiques amb materials biocompatibles com és el magnesi.

1.1.1 Geometria

La geometria que es vol aconseguir al finalitzar el procés de deformació SPIF és el de una pròtesis ubicada a l'os zigomàtic de la cara. Aquesta geometria ha estat obtinguda a través d'un procés d'obtenció de superfícies, amb un escàner 3D, d'un crani real.



Figura 4 Origen geometria

1.1.2 Material

El material que s'utilitza per realitzar la pròtesis és un aliatge de magnesi AZ31B en forma de planxes de 1mm de gruix. Tal i com el seu nom indica aquest aliatge està format per alumini i zinc. La composició química més detallada i les propietats mecàniques es poden veure en les següents Taula 1 i Taula 2:

Taula 1 Composició química Magnesi AZ31B

Element químic		Percentatge dins l'aliatge
Magnesi	Mg	Element principal
Alumini	Al	3%
Zinc	Zn	1%
Manganès	Mn	0,6%
Sílice	Si	0,1%

Taula 2 Propietats mecàniques Magnesi AZ31B

Propietat	Valor
Resistència a la tracció	260 MPa
Límit elàstic a tracció	200 Mpa
Límit elàstic a compressió	97 Mpa
Mòdul elàstic	44,8 GPa
Valor Poisson	0,35
Duresa Brinell	49

1.2 Objecte

L'objecte del projecte és determinar els paràmetres i condicions de procés òptims per fabricar pròtesis de l'os zigomàtic mitjançant les tecnologies SPIF i TPIF. Utilitzant motlles fabricats amb diferents tecnologies de fabricació additiva i motlles amb material Prolab 65. Un cop obtingudes les pròtesis es compararan entre elles per veure la idoneïtat d'aquests mètodes.

Els resultats també serviran per comparar-los amb els resultats que es s'obtidran més endavant al realitzar la mateixa geometria amb la tècnica del superplàstic formin (SPF).

1.3 Especificació i abast

Per a la realització d'aquest projecte s'utilitzaran tres materials diferents de xapa. L'acer inoxidable i l'alumini ens serviran de prova per ajustar bé la màquina i comprovar que el programa CAD/CAM funciona correctament i el magnesi (AZ31B-H24) l'utilitzarem per obtenir els resultats finals i per obtenir les dades que contrastarem més endavant.

Per els motlles mecanitzats utilitzarem el material Prolab 65, pels de fabricació additiva: PLA i Resina Rígid.

Tan amb el mètode SPIF com TPIF tindrem com a input les dades següents:

- Velocitat de rotació del capçal (rpm): velocitat de rotació en la què gira el capçal del centre de treball i en conseqüència, velocitat de rotació de l'eina que deforma la planxa.
- Velocitat d'avanç (mm/min): velocitat en la què l'eina es mou en els eixos X i Y (pla horitzontal)
- Profunditat de passada (mm): és la distància en què l'eina baixa cada vegada. És l'increment de la profunditat en l'eix Z.
- Diàmetre de l'eina (mm)

Aquests inputs aniran variant en funció d'un disseny d'experiments realitzat conjuntament amb membres del GREP, la Universitat de Sevilla i Universitat Politècnica de Bari.

I obtindrem els següents resultats:

- Precisió
- Gruix (mm)
- Rugositat (Ra)
- Força sobre la xapa (N)
- Temperatura de l'assaig (°C)

Aquestes dades resultants són les que s'observaran i es tractaran per tal de poder realitzar un informe amb resultats vàlids.

2. METODOLOGIA

En aquest apartat es mostra el procediment de fabricació i caracterització de les pròtesis, de principi a fi, per les dues tècniques SPIF i TPIF.

2.1 Metodologia SPIF

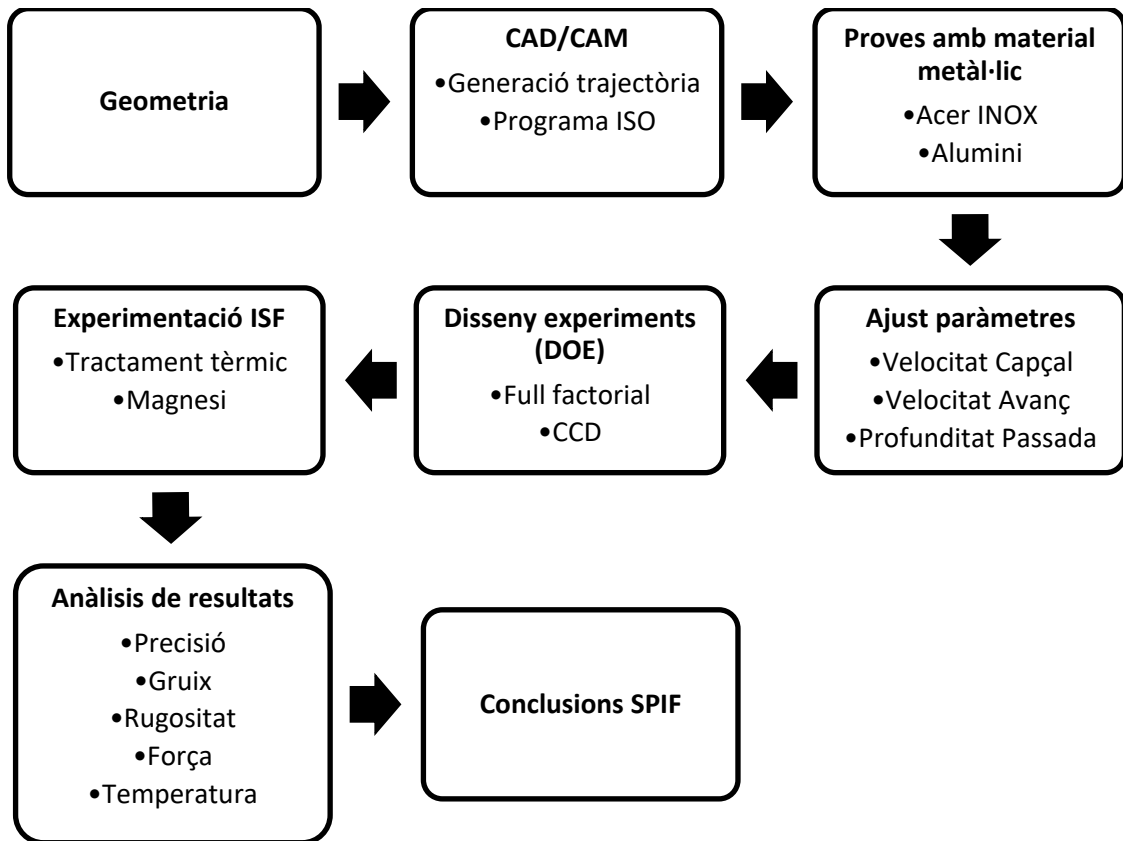


Figura 5 Diagrama metodologia SPIF

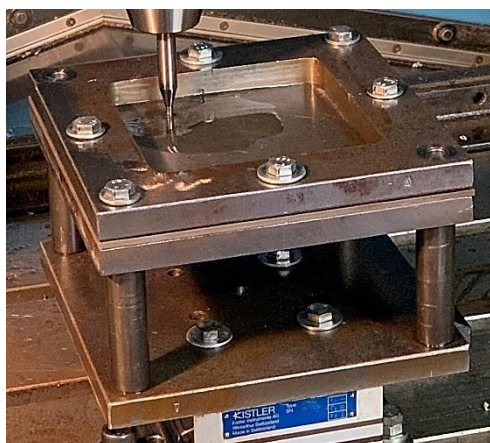


Figura 6 Muntatge SPIF

Els diferents aparells utilitzats per a realitzar l'anàlisi de resultats s'han explicat abastament a l'ANNEX A ADQUISICIÓ DE DADES I ANÀLISIS ESTADÍSTICA.

2.2 Metodologia TPIF

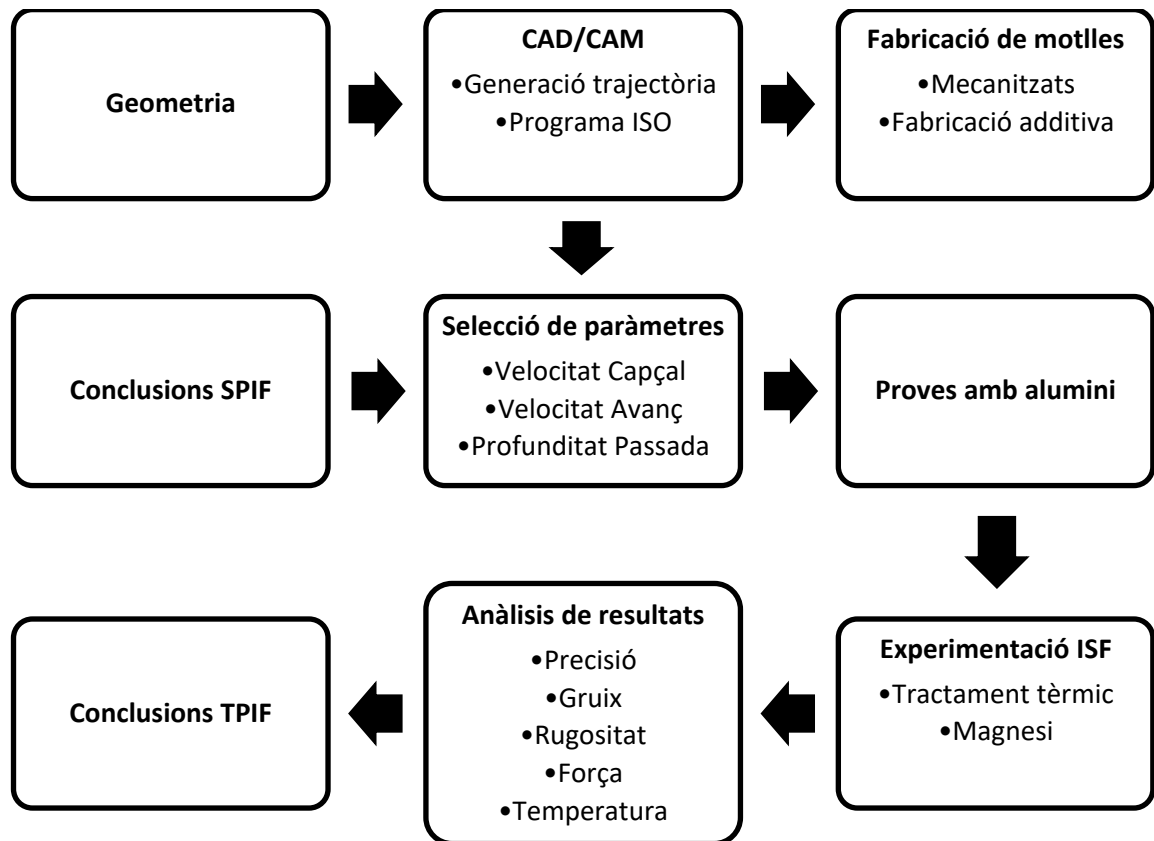


Figura 7 Diagrama metodologia TPIF

Les explicacions del procediment de fabricació dels motlles es pot veure a l'ANNEX D FABRICACIÓ MOTLLES.

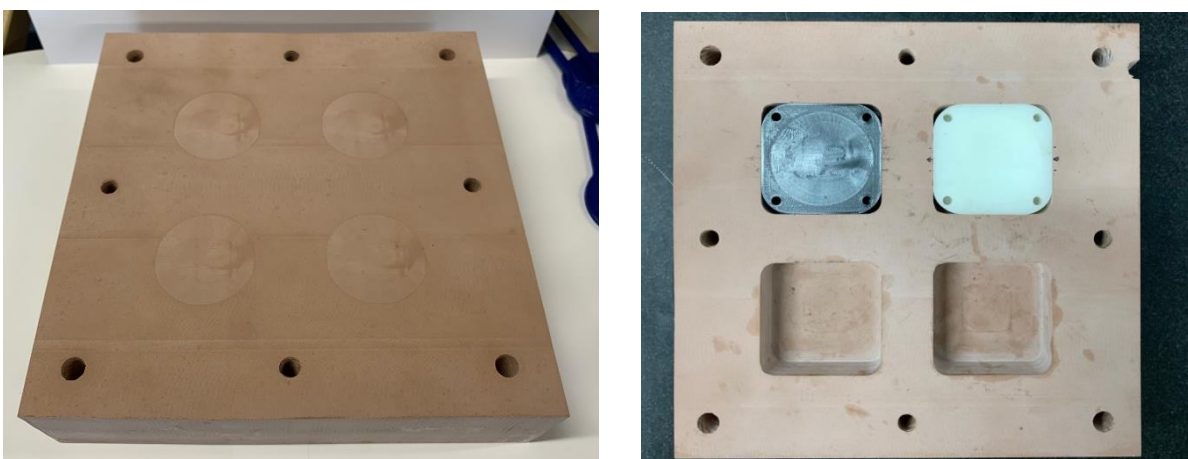


Figura 8 Motlles per TPIF material Prolab 65 (esquerra), PLA (negre dreta) i Resina (blanc esquerra)

Els diferents aparells utilitzats per a realitzar l'anàlisi de resultats s'han explicat abastament a l'ANNEX A ADQUISICIÓ DE DADES I ANÀLISIS ESTADÍSTICA.

2.3 Comparació entre SPIF i TPIF

Un cop s'han obtingut els resultats de les dues tècniques, es compararan els resultats a través de gràfics i taules on es podrà concloure la viabilitat del projecte.

3. RESULTATS SPIF

En aquests apartats es comenten els resultats obtinguts en tots els experiments realitzats per SPIF. Tots els gràfics, figures i taules dels que s'ha extret la informació per elaborar aquest apartat està disponible a l' ANNEX B EXPERIMENTACIÓ SPIF de manera que aquí només s'adjunten els necessaris per tal d'entendre els resultats. D'aquesta manera es pretén que els resultats siguin fàcils de llegir i concentrar les idees el més possible.

3.1 Previ

Els experiments previs han servit com a presa de contacte tan amb el material com amb la maquinaria d'adquisició. S'han realitzat els assajos segons la Taula 19 i com es pot veure a la Figura 9 i a la Figura 68 el resultat obtingut ha estat el mateix per totes, la ruptura per la part inferior de la pròtesi. Totes s'han trencat per el mateix punt de la geometria i aproximadament a la mateixa profunditat (-3,85mm). Això ens fa pensar que els valors de procés no són els adequats o bé que el material no es pot deformar en fred.

Taula 3 Experiments previs

Experiment	Prof. Passada, mm	Vel. Capçal, rpm	Avanç, mm/min	Ø eina, mm
0	0,1	2000	300	4
1	0,1	2000	300	4
2	0,1	4000	300	4
3	0,1	4000	300	4
4	0,01	2000	600	4
5	0,03	2000	1000	4

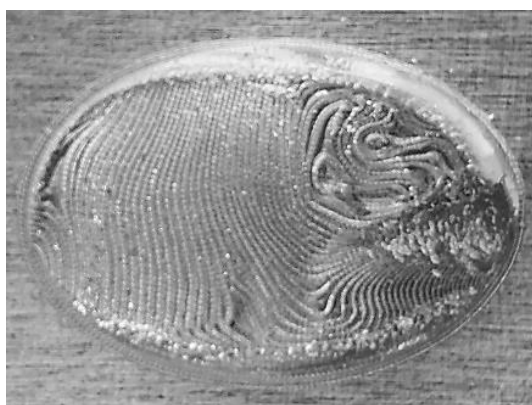


Figura 9 Mostra dels resultats dels experiments previs. Ruptura.

3.2 Primer disseny d'experiments

Al finalitzar els experiments previs les conclusions són que o bé els valors de procés no són els adequats o bé que les planxes de magnesi no es poden deformar en fred. Al tenir a l'abast un forn disseny per ser utilitzat al centre de treball juntament amb els aparells d'adquisició resultant d'un projecte final de carrera de l'Arnau Casasayas Grau, es procedeix a realitzar el disseny i assajos de la Taula 4. El muntatge dels experiments es pot veure a la Figura 69 de l'annex B. Aquests experiments han estat realitzats amb l'eina de 4mm de diàmetre. Els resultats obtinguts també es poden veure a la Taula 4.

Taula 4 Primer disseny d'experiments i resultats

Exp.	Vel. Avanç, mm/min	Vel. Capçal, rpm	Prof. Passada, mm	Ra, μm	Força màx, N	Temp. màx, $^{\circ}\text{C}$
0	200	3000	0,03	4,773	266,07	82,68
1	200	4000	0,03	4,224	384,65	85,22
2	200	5000	0,03	4,42	410,78	85,16
3	200	3000	0,04	7,085	249,29	85,07
4	200	4000	0,04	7	285,25	85,12
5	200	5000	0,04	6,883	281,12	85,08
6	200	3000	0,05	7,621	261,05	82,21
7	200	4000	0,05	7,43	288,60	85,15
8	200	5000	0,05	7,794	367,59	84,7

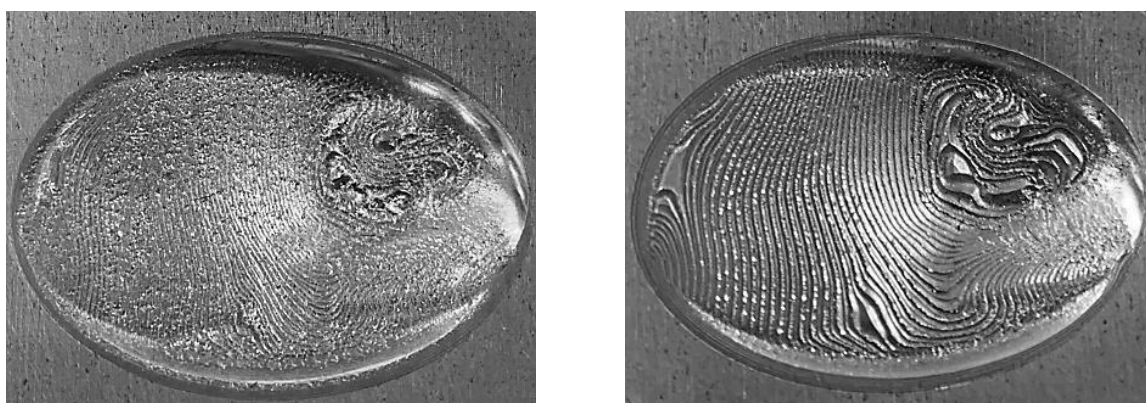


Figura 10 Mostra dels resultats del primer disseny d'experiments. Experiment 1 (esquerra) i experiment 7 (dreta). La resta d'imatges del disseny d'experiments es troba a l'annex B apartat B.2.3 Resultats primer disseny experiments

En alguns experiments, en augmentar la velocitat del capçal també fem que augmenti la temperatura que, en conseqüència, fa augmentar la capacitat de deformació del magnesi i ens permet obtenir una superfície més llisa com per exemple, en els experiments 3, 4 i 5 es pot veure com amb la mateixa profunditat de passada, al augmentar la velocitat del capçal la rugositat disminueix de 7,085 a 6,883

μm . En altres experiments però, no es compleix aquesta tendència, seria el cas dels experiments 6, 7 i 8 on, amb la mateixa profunditat de passada de 0,05 al augmentar la velocitat del capçal la rugositat passa de 7,621 μm a 7,43 μm però després torna a augmentar a 7,794 μm . El que sí que es pot veure és una gran diferència al utilitzar una menor profunditat de passada, als experiments 0, 1 i 2 tenim una rugositat al voltant de 4,5 μm , en canvi amb una rugositat de 0,05 en el cas dels experiments 6, 7 i 8 tenim una rugositat major, al voltant de 7,5 μm .

Els resultats de la força, en canvi, no són els que esperàvem segons estudis previs. Crèiem que al augmentar la velocitat de rotació del capçal i la temperatura, ens seria més fàcil poder deformar la planxa de magnesi i no ha sigut així. Creiem que al ser la zona de deformació molt petita i el rang de variació dels paràmetres com la profunditat de passada bastant reduït, no ens permet veure amb claredat aquest resultat.

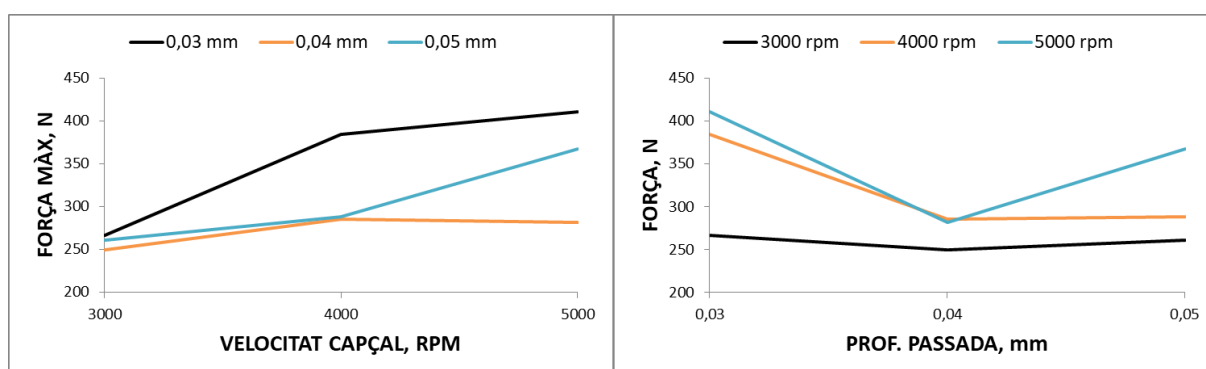


Figura 11 Comparació de força en funció de la velocitat del capçal i la Δz . Assajos a Va 200 mm/min

Un exemple d'això és la següent Figura 12 corresponent als experiments 3, 4 i 5 on es pot veure com la força màxima amb la velocitat del capçal de 4000 rpm (285,25N) és major que la de 5000 rpm (281,12N). La resta de gràfics es poden veure a l'annex B apartat B.2.3 Resultats primer disseny experiments.

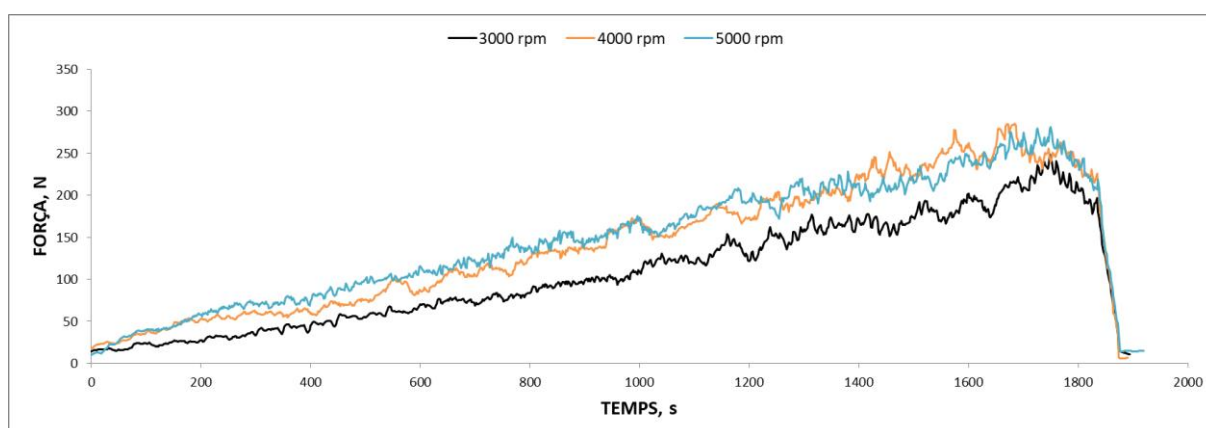


Figura 12 Comparació de força per assajos Δz 0,04 mm i Va 200 mm/min

Els resultats de la temperatura també són els esperats ja que al augmentar la velocitat de rotació del capçal, el que fem és augmentar la fricció entre l'eina i la planxa de magnesi causant l'augment de la temperatura tot i que al final la temperatura màxima acaba essent molt similar en tots els casos (85°C).

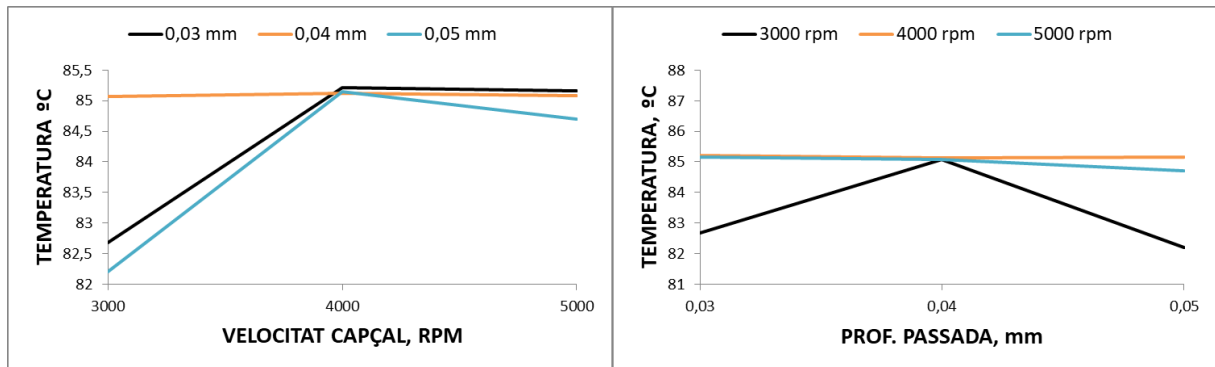


Figura 13 Comparació de temperatura en funció de la Δz i la velocitat del capçal. Assajos a V_a 200 mm/min

Un exemple és la Figura 14 on es veuen les temperatures dels experiments 0, 1 i 2, en el cas de l'experiment amb la velocitat del capçal més elevada (línia blava) es pot comprovar com la temperatura en tot moment és major que l'experiment amb la velocitat de rotació menor (línia negra). La resta de gràfics es poden veure a l'annex B apartat B.2.3 Resultats primer disseny experiments.

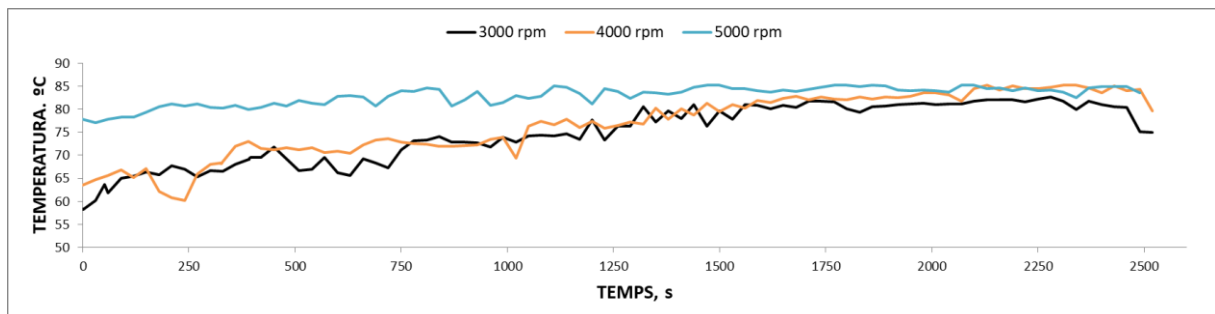


Figura 14 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,03 mm i V_a 200 mm/min

Potser no hi ha prou sensibilitat del sistema per adquirir la força i la variació de la profunditat de la passada no és prou significativa sumat a que la geometria és molt petita, per a obtenir uns resultats més clars.

3.3 Segon disseny d'experiments

Un cop s'han estudiat els resultats del primer disseny d'experiments es pot veure que al realitzar els assajos a una temperatura superior a la ambiental és beneficiós. El dubte que es planteja és si fent un tractament de trempat a la planxa de magnesi escalfant-la a aproximadament 60°C durant 90 minuts i deixant-la refredar posteriorment fins a arribar a temperatura ambiental igualment dins del forn (refredament lent), es poden obtenir els mateixos o millors resultats, veure Figura 15.

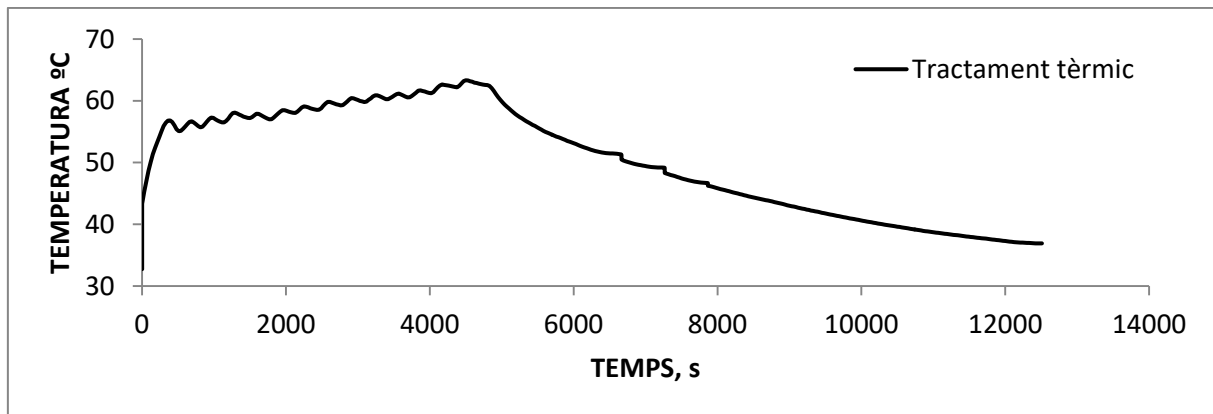


Figura 15 Tractament tèrmic

S'han realitzat uns experiments de prova i el resultat ha estat satisfactori. Així doncs, s'ha procedit a realitzar el segon, i més important, disseny d'experiments del projecte.

Aquest segon disseny d'experiments s'ha realitzat a partir del mètode de disseny central compost, veure Figura 80, amb un factor $\alpha=1,5$. El rang de valors per la velocitat de rotació del capçal ha estat de [3.333 a 6.666] rpm, el rang per la profunditat de passada de [0,275 a 0,775] mm i el rang per la velocitat d'avanç de [520 a 200] mm/min. Aquests valors s'han codificat amb [1, 0, -1] i tot seguit se'ls hi ha aplicat el factor α per tal d'aconseguir el disseny d'experiments que es pot veure a la Figura 80 i la Taula 5. Cal donar importància al fet de que aquest cop no hi ha cap paràmetre que es deixi fixa com en el primer disseny d'experiments, sinó que tots tenen un rang de valors i, a més, major. El diàmetre de l'eina s'ha fixat a 4mm igual que en el primer disseny d'experiments.

El segon disseny d'experiments amb els seus resultats es presenten en la Taula 5 següent:

Taula 5 Resultats segons disseny d'experiments

Exp.	Va, mm/min	N, rpm	Δz , mm	Precisió	Gruix mínim, mm	Ra, μm	F. màx, N	T. màx, $^{\circ}\text{C}$
0	200	3333	0,0275	0,0298	0,7767	6,044	228,64	66,45
1	200	3333	0,0775	0,0315	0,86	12,384	256,51	69,15
2	200	6667	0,0275	0,0618	0,7267	4,764	312,86	82,04
3	200	6667	0,0775	0,0282	0,82	13,071	317,49	81,56
4	520	3333	0,0275	0,0244	0,79	4,371	212,91	54,95
5	520	3333	0,0775	0,0168	0,8533	10,483	207,43	55,8
6	520	6667	0,0275	0,0519	0,7533	4,763	284,74	73,86
7	520	6667	0,0775	0,0176	0,84	11,278	212,31	79,97
8	120	5000	0,0525	0,0456	0,8133	8,240	237,10	80,58
9	600	5000	0,0525	0,0363	0,8067	7,740	191,03	64,64
10	360	2500	0,0525	0,0164	0,8333	8,433	210,41	48,61
11	360	7500	0,0525	0,0190	0,8167	9,028	293,01	82,89
12	360	5000	0,015	0,0367	0,7433	4,191	309,2085	55,13
13	360	5000	0,09	0,0283	0,8867	11,891	335,1255	71,03
14	360	5000	0,0525	0,0225	0,79	8,634	313,811	66,39

On (Exp.) és el número d'experiment, (Va) és la velocitat d'avanç, (N) és la velocitat del capçal, (Δz) és la profunditat de cada passada, (Ra) és la rugositat, (F. màx) és la força màxima i (T. màx) és la temperatura màxima.

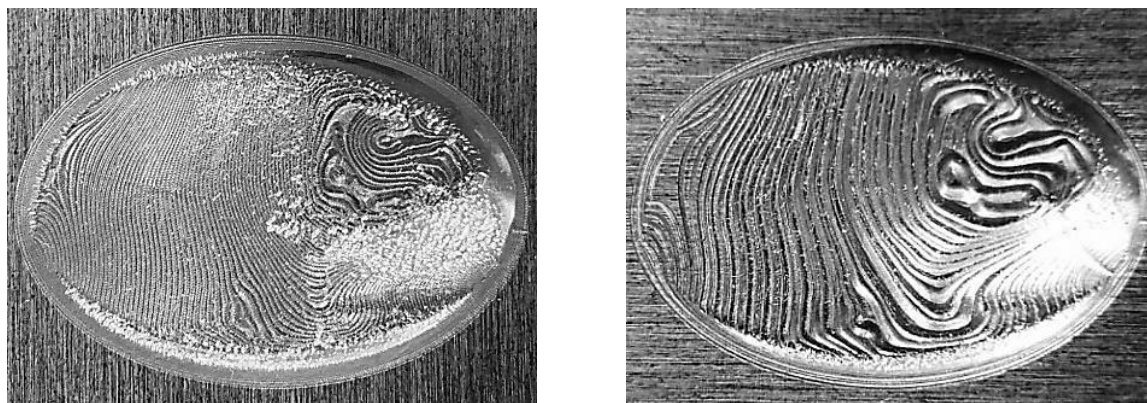


Figura 16 Mostra dels resultats del primer disseny d'experiments. Experiment 4 (esquerra) i experiment 13 (dreta). La resta d'imatges del disseny d'experiments es troba a l'annex B apartat B.3.3 Resultats segon disseny experiments

3.3.1 Precisió

Com a recordatori de l'apartat A.1 Precisió de l'annex A, per tal de poder valorar l'ajustatge de la pròtesi obtinguda durant tot el procés de deformació amb la pròtesi teòrica s'ha realitzat una mesura del perfil longitudinal mitjançant la màquina de coordenades Mitutoyo model Crysta-Apex C544. Amb aquest procediment s'ha obtingut un conjunt de punts que un cop més s'han exportat en un format compatible amb l'Excel i hem pogut comparar la corba teòrica amb la corba experimental. La corba real s'ha aconseguit a través del programa Rhinoceros i el sòlid 3D que ja teníem prèviament.

Per tal de solapar bé les dues corbes a l'hora de calcular la desviació, s'ha pres com a referència la màxima alçada de cada corba ubicant-la al 0,0 del gràfic. Com que la mesura realitzada amb la màquina de coordenades és més llarga que la corba real, s'han eliminat els punts sobrants de la corba experimental de manera que ens queda la mateixa longitud en les dues corbes. Tot seguit, per cada punt que tenim en l'eix horitzontal del gràfic, s'ha calculat la seva diferència vertical entre les dues corbes. Aquests valors obtinguts s'han sumat de manera que ens queda que com més alt sigui aquest valor, menys exactitud tenim. Com que no té massa sentit que si parlem d'exactitud com major sigui el valor de la suma total menor sigui l'exactitud, s'ha utilitzat l'invers d'aquesta suma com a índex per poder valorar l'exactitud de la pròtesis. Per tant, finalment ens queda un valor amb un rang de 0 a 1 que com major és, major és la exactitud de la pròtesis experimental envers la pròtesis real.

Els resultats obtingut per la precisió de solapament entre la corba teòrica i l'experimental de la geometria són següents:

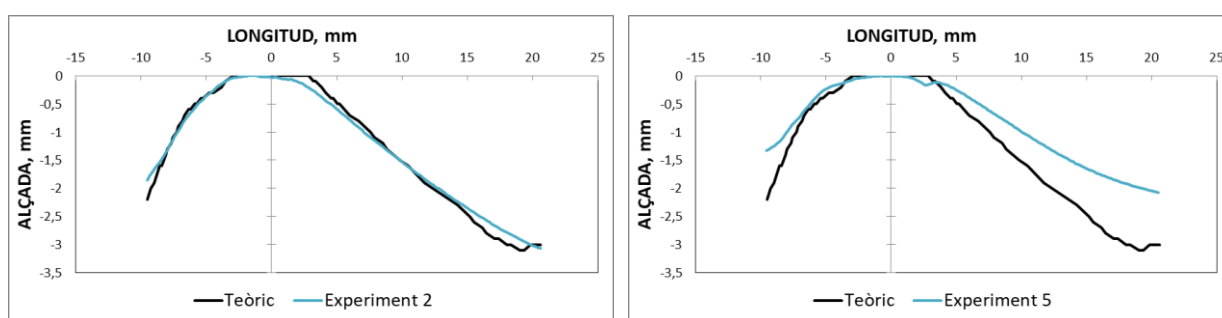


Figura 17 Gràfic precisió experiment 2 (esquerra) i experiment 5 (dreta)

Les corbes que s'obtenen, anteriorment descrites, són com les de la Figura 17. Tenim en l'eix horitzontal la llargada de la pròtesis i en l'eix vertical l'alçada. En aquests cas es poden veure l'experiment 2 que té una precisió de 0,0618 i és la millor de tot el disseny d'experiments i també es pot veure l'experiment 5 que essent el pitjor té una precisió de 0,0168. Clarament es pot veure la

diferència que existeix en la similitud entre la corba teòrica (negra) i corba experimental (blava) entre els dos experiments.

Taula 6 Anàlisi de variància de la precisió

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	6	0,002237	0,000373	10,22	0,002
Avanç, mm/min	1	0,000686	0,000686	18,80	0,002
Vel. Capçal, rpm	1	0,000709	0,000709	19,43	0,002
Prof. Passada, mm	1	0,000010	0,000010	0,28	0,611
Avanç, mm/min*Avanç, mm/min	1	0,000576	0,000576	15,78	0,004
Prof. Passada, mm*Prof. Passada, mm	1	0,000200	0,000200	5,47	0,047
Vel. Capçal, rpm*Prof. Passada, mm	1	0,000480	0,000480	13,16	0,007
Error	8	0,000292	0,000036		
Total	14	0,002529			

A la Taula 6 es pot veure com les variables de procés que afecten a la precisió final de les peces són totes 3 (avanç, velocitat de rotació del capçal i profunditat de passada). En un primer moment es pot pensar que la variable de la profunditat de passada no afecta si ens fixem en el valor $-p$ ja que a la variable lineal és superior a 0,05 però resulta que està relacionada amb una interacció i per tant, l'hem de tenir en compte. Igualment té molta lògica que aquesta variable influeixi en la precisió final de la peça ja que si utilitzem una profunditat de passada molt elevada serà impossible tenir una superfície ben definida.

Taula 7 Resum del model de la precisió

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0060404	88,46%	79,80%	55,92%

A la Taula 7 tenim els valors d' R^2 . Es té una equació bastant ben ajustada si el que es vol és obtenir valors dintre el rang estudiat (R-cuad (ajustado)), en canvi si el que es vol és obtenir valors fora el rang d'estudi (R-cuad (pred)) aquest coeficient disminueix bastant arribant al 55,92%, un valor baix per poder-lo utilitzar per realitzar càlculs.

L'equació del sistema és la següent:

$$\begin{aligned} \text{Precisió} = & 0,0496 - 0,000283 (\text{Avanç, mm/min}) + 0,000013 (\text{Vel. Capçal, rpm}) \\ & - 0,247 (\text{Prof. Passada, mm}) + 0,000000 (\text{Avanç, mm/min}) * (\text{Avanç, mm/min}) \\ & + 8,58 (\text{Prof. Passada, mm}) * (\text{Prof. Passada, mm}) \\ & - 0,000186 (\text{Vel. Capçal, rpm}) * (\text{Prof. Passada, mm}) \end{aligned} \quad (1)$$

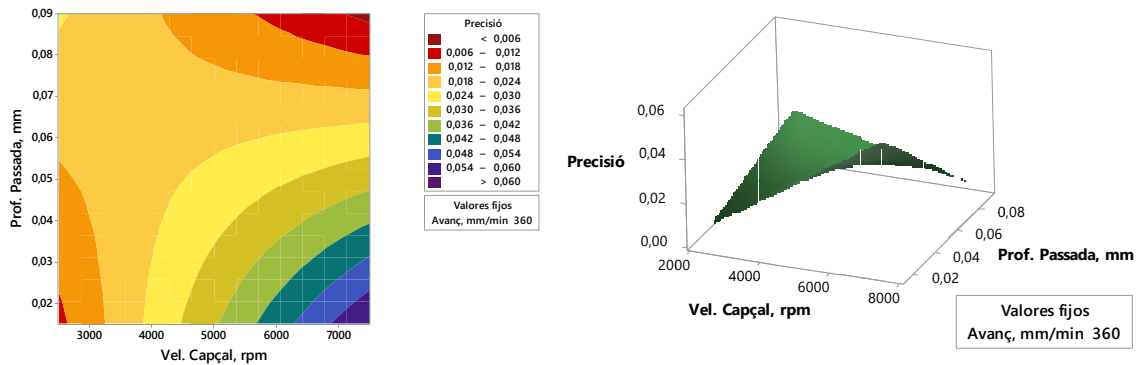


Figura 18 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i la velocitat de rotació del capçal per la precisió

A la Figura 18 es té la precisió en funció de la profunditat de passada i de la velocitat de rotació. Es pot interpretar com la precisió augmenta a mida que disminueix la profunditat de passada i augmenta la velocitat de rotació del capçal. Els pitjors resultats estan al dos extrems, profunditat de passada i velocitat de rotació baixa i profunditat de passada i velocitat de rotació alta. Tal i com es deia anteriorment això és degut a que una profunditat de passada petita permet a l'eina arribar a tots els punts de la peça, cosa que no permeten les profunditats de passada elevades. El fet de que la velocitat del capçal també sigui elevada és pel fet de que al girar a més revolucions es genera més temperatura sobre la peça i ajuda a millorar la capacitat de deformació de la peça.

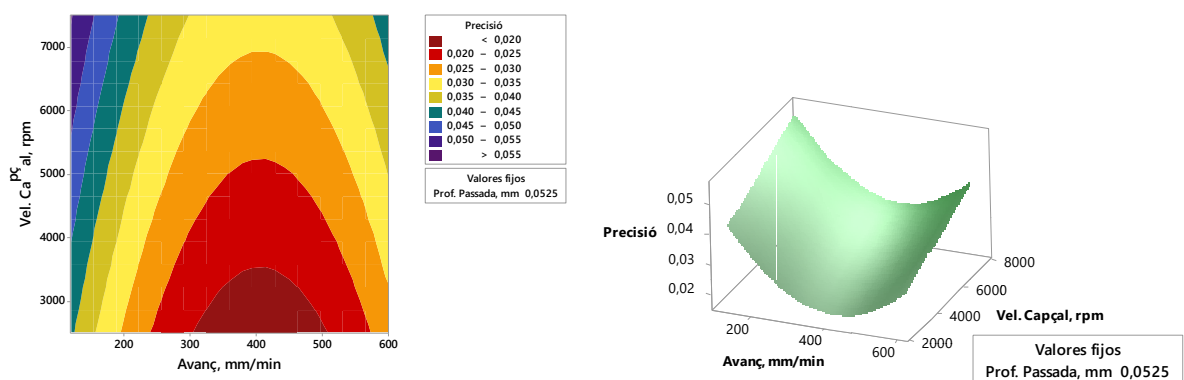


Figura 19 Gràfics de contorn i superfície entre l'avanç i la velocitat de rotació del capçal per la precisió

La Figura 19 relaciona la precisió en funció de la velocitat del capçal i l'avanç. Es pot deduir com la màxima precisió s'aconsegueix amb valors de velocitat de capçal elevats i avanços petits o grans, no mitjans. Els pitjors resultats estan en valors petits de velocitat de rotació i mitjans d'avanç. El fet de que la velocitat de rotació del capçal hagi de ser elevada ja s'ha comentat a l'apartat anterior com no és d'estranyar. Que l'avanç hagi de ser petit és degut a que com més a poc a poc es mogui l'eina en el pla vertical, més temps està la peça, en aquell punt, sotmesa a la pressió de l'eina.

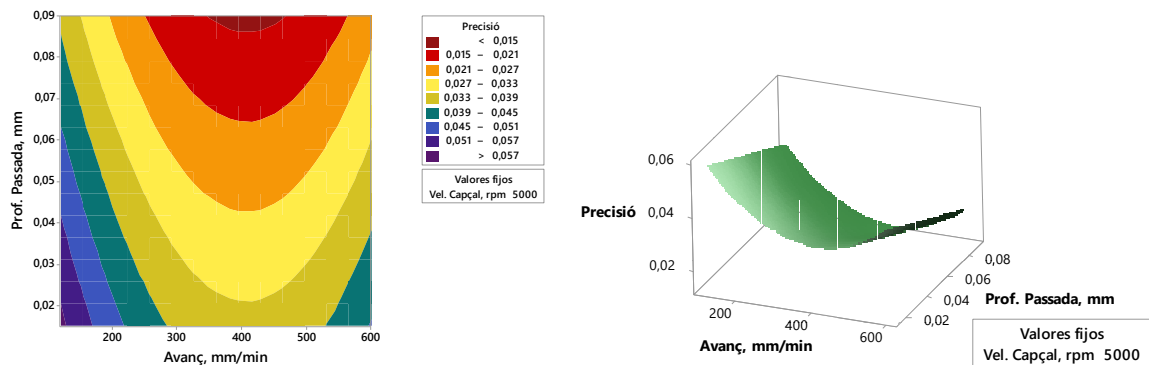


Figura 20 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i l'avanç per la precisió

A la Figura 20 es relacionen la profunditat de passada amb l'avanç. Coincidint amb les dues figures anteriors, s'obté millor precisió quan la profunditat de passada és petita i l'avanç també és petit. Aquests resultats acaben de donar suport a les justificacions de les figures anteriors.

3.3.2 Gruix

Seguint l'apartat A.2 Gruix de l'annex A on s'explica la forma d'obtenir els valors del gruix de la peça, simplement s'ha mesurat el gruix al llarg del seu eix longitudinal, en varis punts, amb un peu de rei després de que la pròtesi fos tallada. S'ha pogut realitzar un gràfic com la Figura 21 per cada experiment:

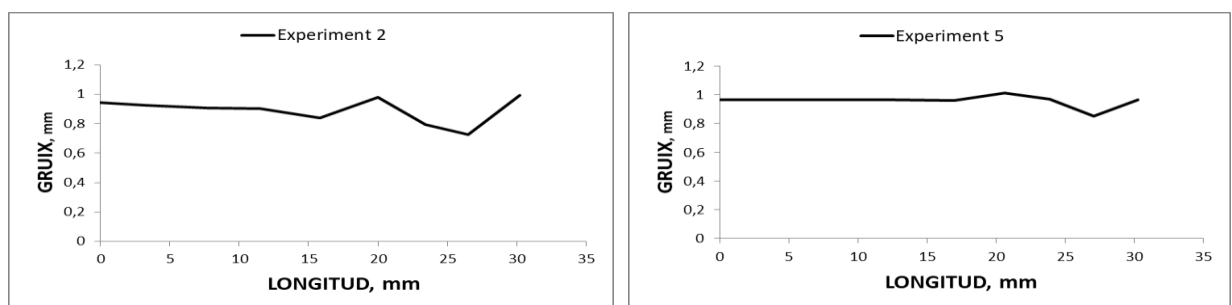


Figura 21 Gràfic gruix experiment 2 (esquerra) i experiment 5 (dreta)

Seguint amb l'exemple anterior dels experiment 2 i 5, els gràfics ens mostren en l'eix horitzontal la longitud de la pròtesi i en l'eix vertical el gruix d'aquesta. En aquest cas a través del gràfic costa més

distingir el valor exacte del gruix mínim, però sí que es pot apreciar com en l'experiment 2 (esquerra) el gruix de la peça varia molt més que no en l'experiment 5 (dreta) que és molt més constant. L'experiment 2 té el valor del gruix mínim més baix (0,7267mm) mentre que l'experiment 5 té un dels valors més alts (0,8533).

Els resultats obtingut per l'anàlisi estadística del gruix mínim de la peça al llarg del seu eix longitudinal és el següent:

Taula 8 Anàlisi de variància del gruix

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	3	0,025867	0,008622	39,43	0,000
Vel. Capçal, rpm	1	0,000426	0,000426	1,95	0,190
Prof. Passada, mm	1	0,023475	0,023475	107,35	0,000
Vel. Capçal, rpm*Vel. Capçal, rpm	1	0,000216	0,000216	0,99	0,341
Error	11	0,002405	0,000219		
Total	14	0,028272			

Els resultats de la Taula 8 ens mostren com les dues variables significatives que influeixen en els resultats del gruix són la velocitat del capçal i la profunditat de la passada. En un principi es pot pensar que la velocitat del capçal hauria de ser una variable no significativa ja que els seu valor-p és superior a 0,05 però el fet és que tenim dues raons per considerar-la significativa: la primera és que per realitzar la superfície de resposta necessitem almenys dues variables i en aquest cas, la velocitat del capçal és la que té un valor-p més pròxim a ser significatiu (0,05). L'altra raó és que si no s'inclou la velocitat del capçal els coeficients R^2 són pitjors.

Taula 9 Resum del model del gruix

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0147811	90,73%	89,18%	84,77%

En aquest cas podem veure com tenim uns bons valors del coeficient R^2 . Això vol dir que la fórmula s'ajusta correctament als resultats obtinguts i ens permet obtenir resultats dins i fora del rang estudiat amb probabilitat d'èxit acceptable.

L'equació 2 és l'equació del sistema:

$$\text{Gruix, mm} = 0,7559 - 0,000008 (\text{Vel. Capçal, rpm}) + 1,733 (\text{Prof. Passada, mm}) \quad (2)$$

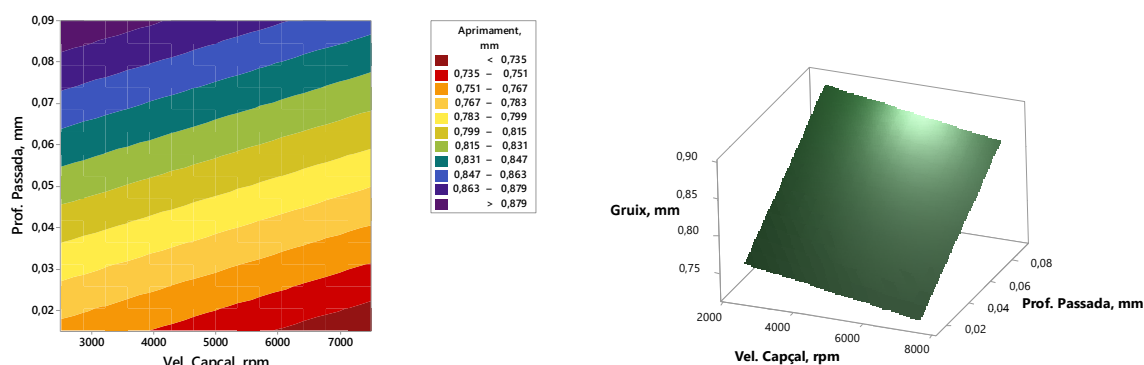


Figura 22 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i la velocitat de rotació del capçal pel gruix

En aquest cas només es té una superfície de resposta i un gràfic de contorn (Taula 8) degut a que només hi ha dues variables significatives. Aquests gràfics ens mostren com el gruix de la peça és major quan s'utilitzen unes profunditats de passada elevades i unes velocitats del capçal baixes. L'objectiu que es pretén d'aquesta variable és que es tingui un gruix mínim acceptable (no suficientment petit perquè pugui comprometre les propietats mecàniques del material) amb una bona precisió. De fet, es pot veure a la Taula 5 i a l'apartat 3.4 Comparació i conclusions principals com el gruix va lligat amb la precisió de la peça.

3.3.3 Rugositat

Els resultats obtingut per l'anàlisi estadística de la rugositat mesurada al llarg del seu eix longitudinal són els següents:

Taula 10 Anàlisi de variància de la rugositat

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	2	123,579	61,789	128,99	0,000
Avanç, mm/min	1	2,994	2,994	6,25	0,028
Prof. Passada, mm	1	120,584	120,584	251,72	0,000
Error	12	5,748	0,479		
Total	14	129,327			

En aquest cas, no hi ha dubte que les dues variables significatives són l'avanç i la profunditat de la passada, veure Taula 10.

Taula 11 Resum del model de la rugositat

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,692122	95,56%	94,81%	92,63%

Per la rugositat s'han obtingut uns bons resultats del coeficients de determinació (Taula 11). Obtenint un bon ajust de la fórmula a qualsevol rang de valors, estudiats o no.

L'equació 3 és la del sistema:

$$\text{Rugositat, } \mu\text{m} = 2,933 - 0,00306 (\text{Avanç, mm/min}) + 124,24 (\text{Prof. Passada, mm}) \quad (3)$$

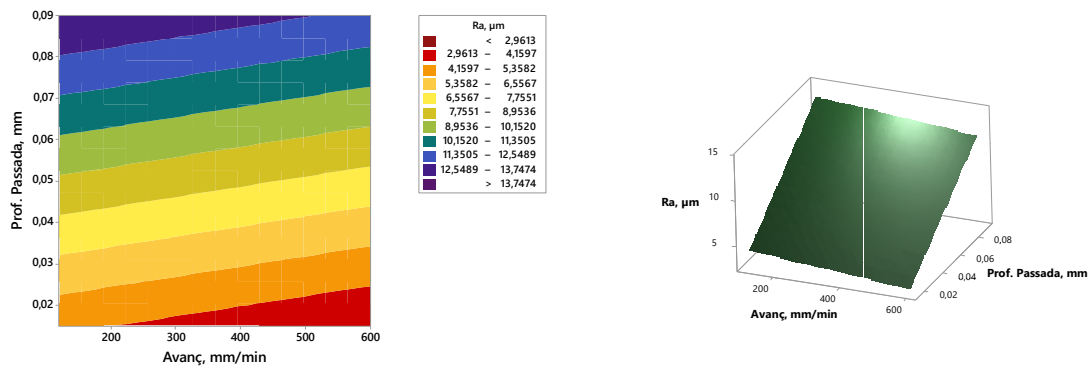


Figura 23 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i l'avanç per la rugositat

A través de la Figura 23 és pot apreciar com la rugositat augmenta a mesura que augmenta la profunditat de passada i disminueix l'avanç. Una profunditat de passada alta el que crea és un conjunt de crestes que a l'hora de mesurar la rugositat fa que surti més elevada. La velocitat d'avanç petita crea menys fricció que els valors de velocitat elevats, per aquesta raó amb l'avanç més gran s'aconsegueix obtenir menys rugositat. El resultat objectiu és aconseguir el millor acabat superficial possible (menor rugositat).

3.3.4 Força

La força ha estat mesurada a través d'una taula dinamomètrica i posteriorment les dades s'han filtrat per tal d'aconseguir gràfics com els de la Figura 24. Si es comenten els gràfics obtinguts per la força durant els experiments, fàcilment es pot veure com en l'eix horitzontal tenim el temps de l'experiment i en l'eix vertical la força. Si es continua comparant els experiments 2 i 5 en aquest cas es veu a simple vista com la força va augmentant al llarg de l'experiment de manera progressiva fins a arribar al seu màxim a moments finals de l'experiment. En aquest cas la planxa de magnesi de l'experiment 2 (321,86N) està sotmesa a més força que la de l'experiment 5 (207,43).

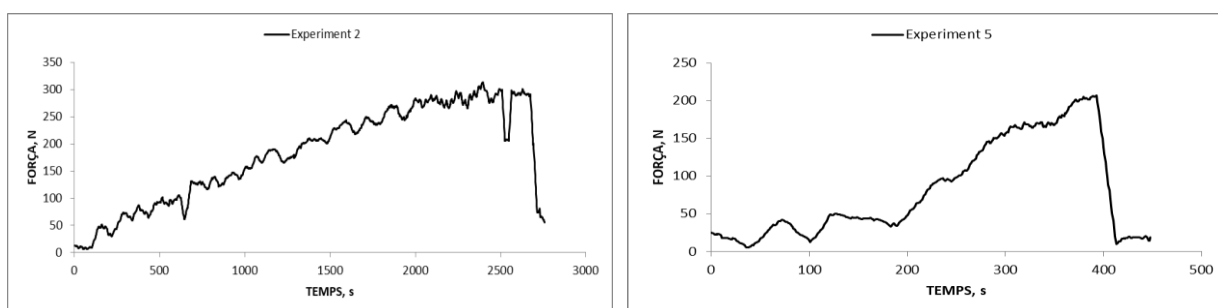


Figura 24 Gràfic força experiment 2 (esquerra) i experiment 5 (dreta)

A continuació es detallen els resultats obtinguts després de realitzar l'anàlisi estadística de la força màxima de cada experiment.

Taula 12 Anàlisi de variància de la força màxima

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	4	30044	7511,1	16,07	0,000
Avanç, mm/min	1	10358	10357,8	22,16	0,001
Vel. Capçal, rpm	1	6904	6903,9	14,77	0,003
Avanç, mm/min*Avanç, mm/min	1	13383	13383,0	28,63	0,000
Vel. Capçal, rpm*Vel. Capçal, rpm	1	5123	5122,7	10,96	0,008
Error	10	4674	467,4		
Total	14	34718			

A la Taula 12 es pot veure com per la força màxima només existeixen dues variables significatives: l'avanç i la velocitat de rotació del capçal. Tot i que les tenim tan de forma lineal com de forma quadràtica.

Taula 13 Resum del model de la força màxima

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
21,6196	86,54%	81,15%	72,99%

Els resultats dels factors de determinació són acceptables pel que fa al resultat d'un valor entre el estudiats (R-cuad (ajustado)), però una mica pobre quan es surt del rang d'estudi (R-cuad (pred)).

L'equació 4 és l'equació del sistema de la força:

$$\begin{aligned} \text{Força màxima, N} &= -180,7 + 1,101 (\text{Avanç, mm/min}) + 0,1143 (\text{Vel. Capçal, rpm}) \\ &- 0,001714 (\text{Avanç, mm/min}) * (\text{Avanç, mm/min}) \\ &- 0,000010 (\text{Vel. Capçal, rpm}) * (\text{Vel. Capçal, rpm}) \end{aligned} \quad (4)$$

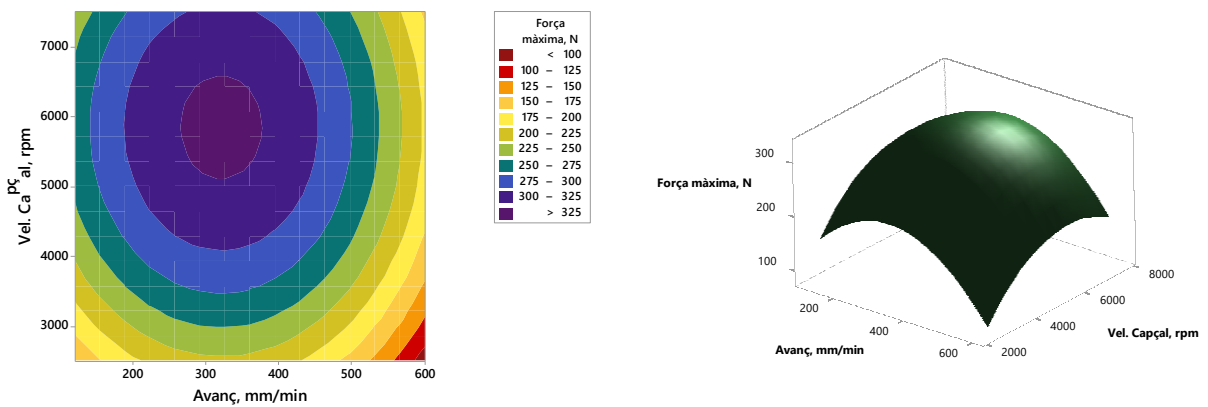


Figura 25 Gràfics de contorn i superfície entre l'avanç i la velocitat de rotació del capçal per la força màxima

En els gràfics de la Figura 25 existeix un punt de força màxima quan tenim una velocitat de rotació del capçal de 6.000rpm i una avanç de 325mm/min aproximadament. Aquest resultat no és massa l'esperat ja que per lògica es pensava que la força augmentaria a mesura que la velocitat del capçal i de l'avanç també ho fes. Es creu que degut a que la geometria és molt petita no s'ha pogut diferenciar bé aquests resultats.

3.3.5 Temperatura

Els resultats obtinguts per la temperatura han estat proporcionats per la càmera termogràfica, tot seguit s'han transformat les dades en gràfics com els de la Figura 26. Si es continua agafant d'exemple els experiments 2 i 5, en els gràfics es pot veure com l'eix horitzontal ens dóna informació sobre el temps i l'eix vertical sobre la temperatura. Es pot veure com els dos experiments comencen de temperatures quasi idèntiques però cal fixar-se que el fet de que l'experiment 2 sigui més llarg (quasi 6 vegades més) que l'experiment 5 fa que la temperatura final sigui molt diferent. 88,04°C en l'experiment 2 i 55,8°C en l'experiment 5.

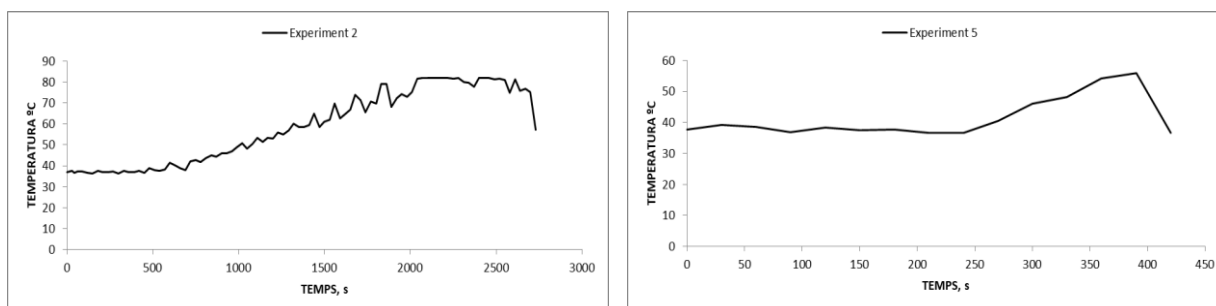


Figura 26 Gràfic temperatura experiment 2 (esquerra) i experiment 5 (dreta)

Els resultats de l'anàlisi estadística es mostren a continuació:

Taula 14 Anàlisi de variància de la temperatura

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	5	1704,31	340,86	27,77	0,000
Avanç, mm/min	1	199,46	199,46	16,25	0,003
Vel. Capçal, rpm	1	43,35	43,35	3,53	0,093
Prof. Passada, mm	1	87,28	87,28	7,11	0,026
Avanç, mm/min*Avanç, mm/min	1	114,05	114,05	9,29	0,014
Avanç, mm/min*Vel. Capçal, rpm	1	28,43	28,43	2,32	0,162
Error	9	110,46	12,27		
Total	14	1814,77			

Segons la Taula 14 per aquesta variable també tenim tres paràmetres de procés que intervenen en els resultats. Tot i que en teoria la velocitat del capçal i la seva interacció amb l'avanç no haurien de ser formes significatives, s'han tingut en compte perquè en cas de descartar-los els valors de R^2 empitjoraven de forma considerable.

Taula 15 Resum del model de la temperatura

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,50327	93,91%	90,53%	83,26%

Tenint en compte l'explicació anterior sobre la decisió d'incloure els paràmetres, es pot observar a la Taula 15 com el valor dels factors de determinació són prou bons tot i que el valor de R-cuad (pred) està una mica per sota.

L'equació 5 és la que defineix el sistema:

$$\begin{aligned}
 \text{Temperatura màxima, } &= 73,4 - 0,1728 (\text{Avanç, mm/min}) + 0,00334 (\text{Vel. Capçal, rpm}) & (5) \\
 \text{°C} &+ 105,7 (\text{Prof. Passada, mm}) \\
 &+ 0,000150 (\text{Avanç, mm/min}) * (\text{Avanç, mm/min}) \\
 &+ 0,000007 (\text{Avanç, mm/min}) * (\text{Vel. Capçal, rpm})
 \end{aligned}$$

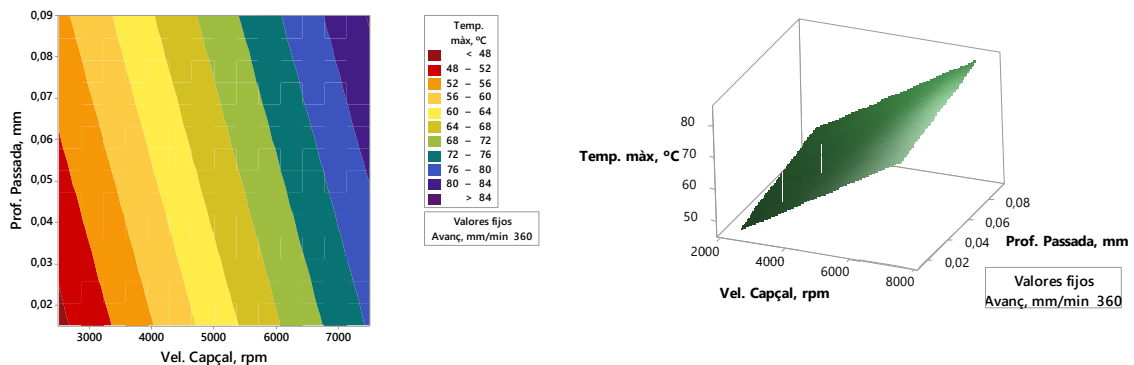


Figura 27 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i la velocitat de rotació del capçal per temperatura

De forma simple a la Figura 27 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i la velocitat de rotació del capçal per temperatura, on es relacionen la profunditat de passada i la velocitat del capçal amb la temperatura, es pot veure com la temperatura augmenta a mesura que la profunditat de passada i al velocitat del capçal augmenten. Principalment es creu que això és degut a l'augment de la fricció de l'eina sobre la planxa de magnesi i al major esforç al que està sotmès el material al patir "grans" deformacions per la profunditat de passada.

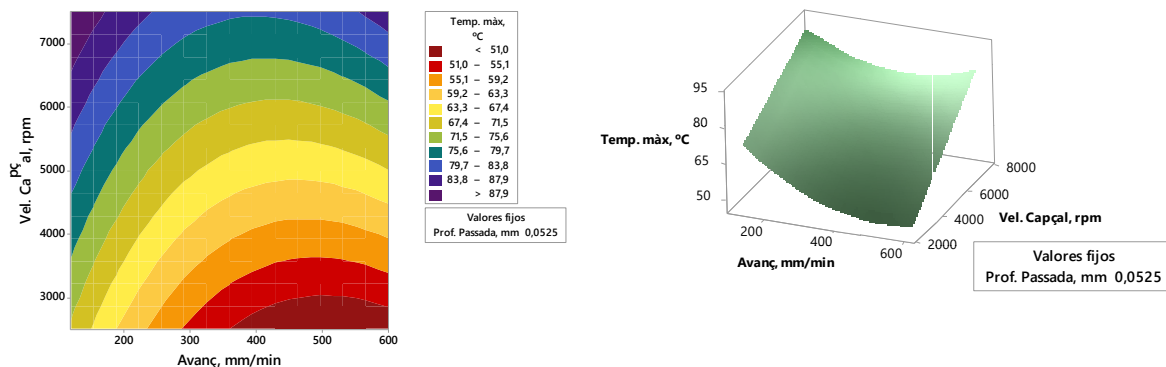


Figura 28 Gràfics de contorn i superfície entre l’avanç i la velocitat de rotació del capçal per temperatura

Igualment a la Figura 28, on es relacionen la velocitat del capçal i l’avanç amb la temperatura, es pot veure com la velocitat del capçal fa augmentar la temperatura, en canvi l’avanç no queda clar que hi intervingui de forma clara ja que el fet de que amb avanços elevats la temperatura sigui mínima ens deixa una mica desconcertats, només es veu com a possible justificació de que al moure’s l’eina pel pla horitzontal de forma més ràpida, també passada de forma més ràpida per tota la peça i no crea punts calents.

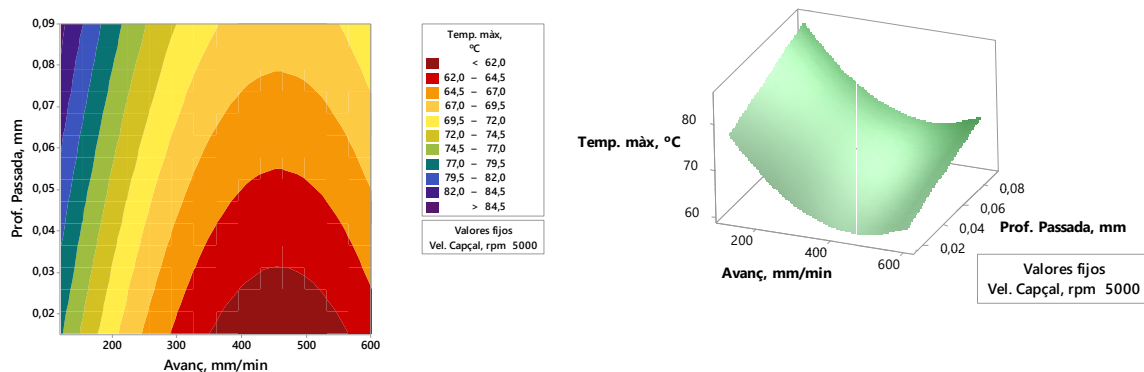


Figura 29 Gràfics de contorn i superfície entre l’avanç i profunditat de passada per temperatura

Per últim la Figura 29 reflexa els resultats de les dues figures anteriors, la profunditat de passada fa augmentar la temperatura i l’avanç més aviat la fa disminuir.

3.4 Comparació i conclusions principals

En aquest apartat es realitza una comparació dels resultats del segon disseny d'experiments, ja que aquest disseny d'experiments té moltes dades diferents al fer un disseny centrat compost, s'ha intentat agrupar els experiments que compartien les màximes variables de procés per poder treure conclusions i veure gràficament les diferències. Aquestes variables han estat la profunditat de passada i la velocitat d'avanç, dues variables que afecten directament sobre la durada de l'experiment i que per tant si els tenim fixes en la comparació en permet poder comprar els resultats amb la mateixa durada d'experiment. En aquesta primera part es compara gràficament i es comenten els resultats individualment i al final de l'apartat es fa una petita discussió del global dels resultats.

En la primera comparació s'explica el significat dels diferents gràfics i serveix d'exemple per els següents.

Totes les dades i gràfics utilitzats per comparar els resultats estan recopilats ens aquest Annex B.3.3 Resultats segon disseny experiments agrupats per variables.

- **Experiments 0 i 2**

Aquest dos experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0275mm) i la velocitat d'avanç (200mm/min), es diferencien en la velocitat de rotació del capçal (3333rpm i 6667rpm).

La Figura 96 ens mostra les corbes de cada una de les pròtesis en el seu eix longitudinal. En aquest cas la corba negra és el valor teòric i perfecte de la pròtesis extret amb el programa de CAD, les corbes taronja i blava ens mostren els resultats dels experiments 0 i 2 respectivament on els diferencia la velocitat de rotació del capçal. Es pot veure com l'experiment amb més velocitat de rotació del capçal (corba blava) és el que té una millor coincidència amb el valor teòric, per tant, millor resultat.

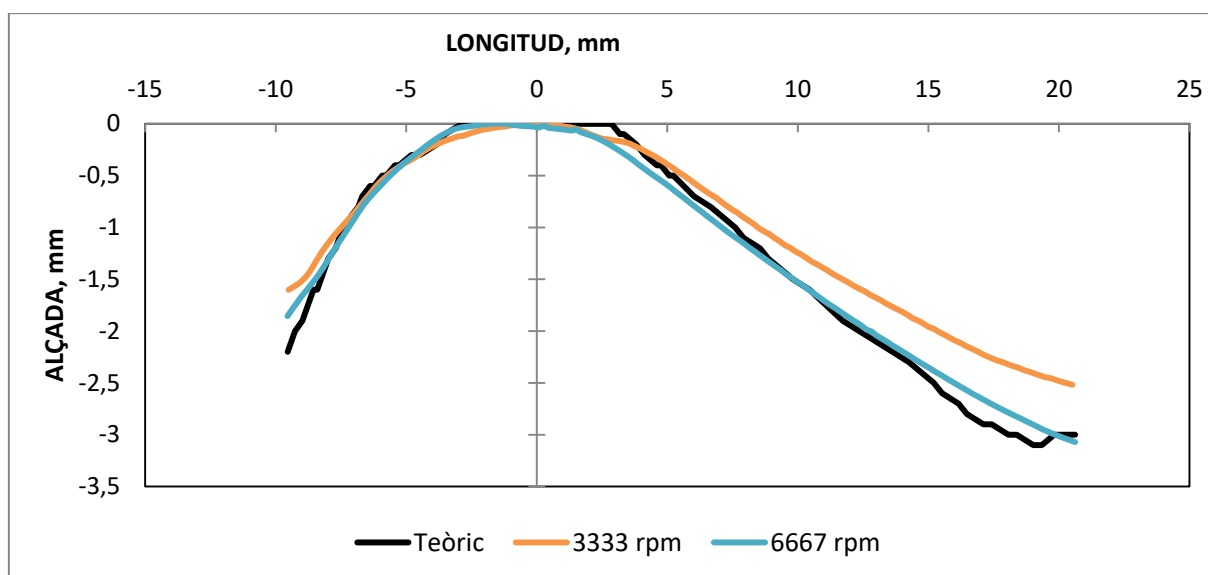


Figura 30 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 200 mm/min

La Figura 97 ens il·lustra sobre el gruix de la pròtesis al llarg del seu eix longitudinal, el mateix eix el qual s'ha fet la mesura de la precisió. Ja que partim d'una planxa de 1mm de gruix, podem calcular l'aprimament de forma senzilla. El resultat d'interès és aquell que tingui el màxim gruix ja que d'aquesta manera es mantenen amb un grau més alt les propietats del material. Podem observar com l'experiment de menys velocitat de rotació (experiment 0) té un major gruix al llarg de la pròtesi i per tant, s'ha deformat menys que la pròtesi de l'experiment 1. Aquest fet lliga amb els resultats de la precisió ja que si una pròtesi s'ha deformat menys, és difícil que hagi aconseguit una bona precisió dimensional.

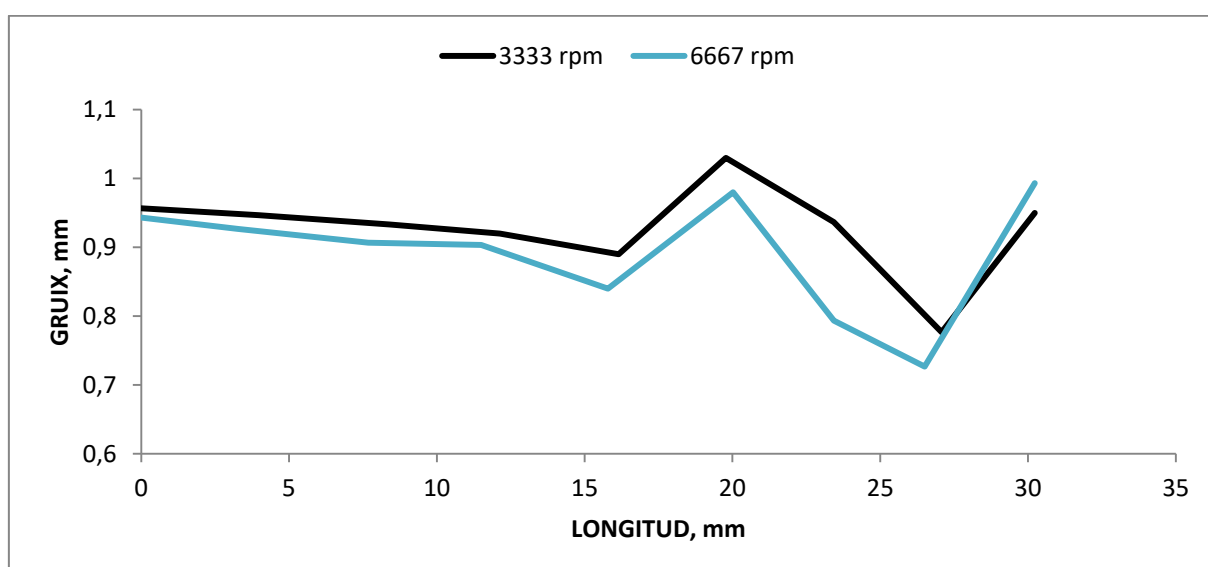


Figura 31 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 200 mm/min

Per la rugositat no es tenen gràfics ja que és simplement una dada, en aquest cas per l'experiment 0 tenim una rugositat de $6,044\mu\text{m}$ i per l'experiment 2 de $4,764\mu\text{m}$. Aquest valors ens donen a entendre que la qualitat superficial de la pròtesi és millor en l'experiment 2 (menys rugositat). Aquest fet ve donat lògicament, ja que és la variable que canvia, per la diferència de velocitats de rotació del capçal.

A continuació a la Figura 98 podem veure les corbes adquirides durant els assaigs de les forces que han estat sotmeses les planxes de magnesi per conformar les pròtesis. En aquest gràfic és el primer que podem veure la durada de l'experiment (2.750 segons aprox.), també podem observar com a mesura que va avançant l'assaig la força va augmentant de manera constant fins arribar al seu punt màxim quasi al final de l'experiment. Es pot veure com hi ha alguna baixada sobtada de la força cap al final, això és degut a que segons la profunditat de la passada, el programa ISO llançat a la màquina creat amb el software de CAM no realitza tota la peça de cop, o sigui, un cop comença a tocar la planxa no es manté en contacte amb ella fins al final del programa, sinó que hi ha fases que es mou a més alçada sense tocar-la. Amb major velocitat de rotació del capçal obtenim una major força durant tot el procés.

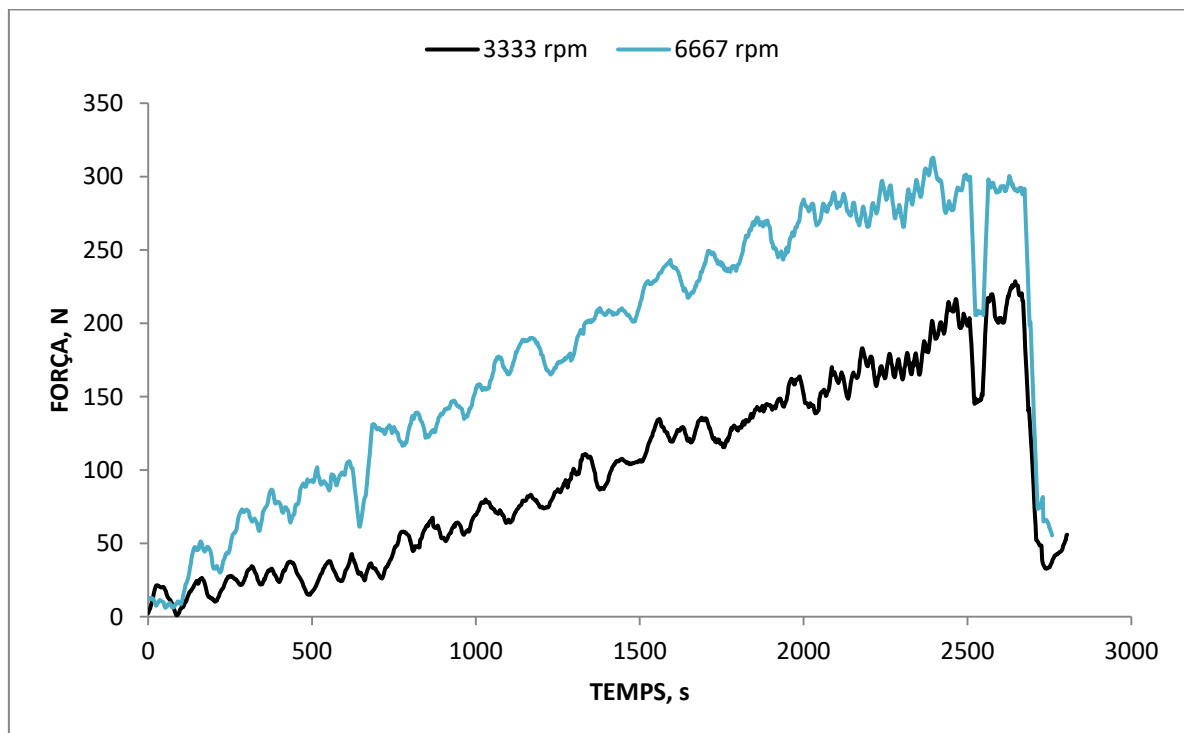


Figura 32 Comparació de força per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 200 mm/min

La temperatura dels experiments 0 i 2 es mostra a la Figura 99. Igual que amb la força, es mostra la temperatura màxima que ha assolit la pròtesis durant l'experiment, evidentment el punt de contacte entre l'eina del centre de treball amb la planxa de magnesi. Aquests gràfics poden presentar alguns salts ja que la pròpia llum del taller i del centre de treball realitzaven interferències amb la càmera tèrmica a mode de reflexes. De totes maneres es pot veure clarament com, una altra vegada, l'experiment amb més velocitat de rotació del capçal (experiment 2) és el que obté una major temperatura durant tot el procés. Aquesta temperatura més elevada ajuda a millorar la capacitat de deformació del magnesi, i per tant, és interessant aconseguir valors elevats.

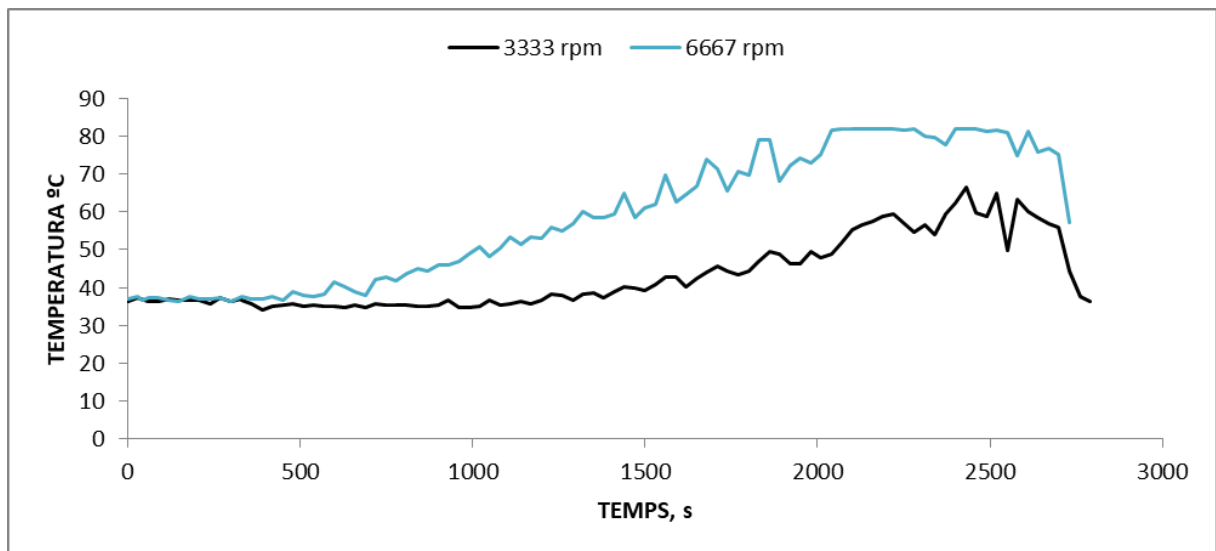


Figura 33 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 200 mm/min

- **Experiments 1 i 3**

Els dos experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0775mm) i la velocitat d'avanç (200 mm/min), es diferencien en la velocitat de rotació del capçal (3333rpm i 6667rpm).

A la Figura 100 podem veure les corbes de precisió, en aquest cas les dues geometries són molt semblants tot i que segons la Taula 23 podem veure com és una mica millor la corba taronja (experiment 1). En aquest cas és el contrari que l'anterior Figura 96.

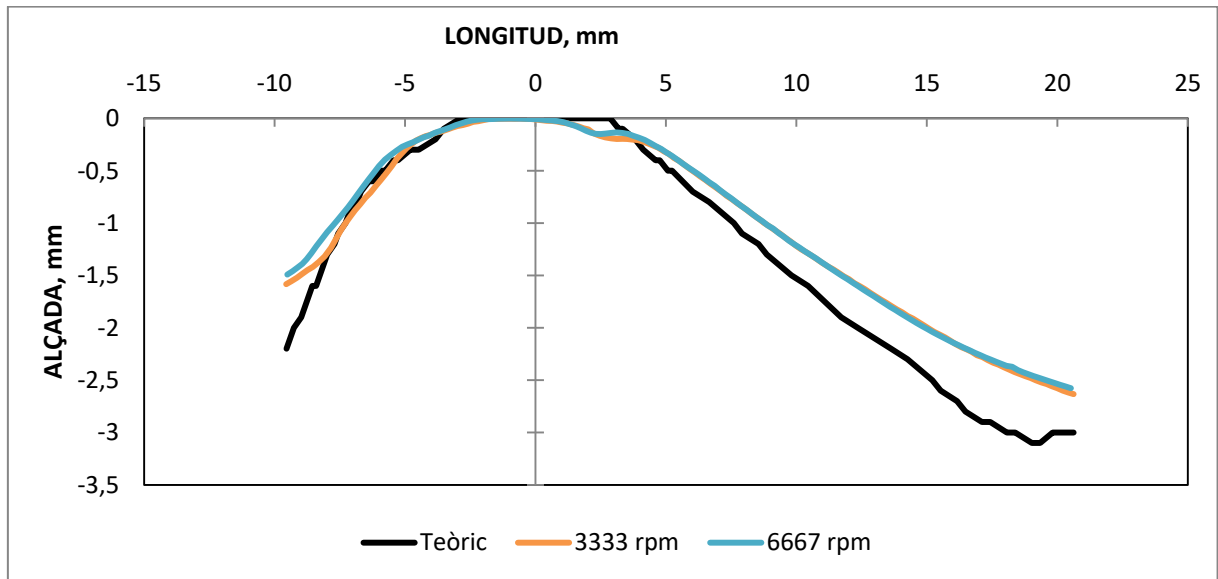


Figura 34 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0775 mm i V_a 200 mm/min

En aquest cas la Figura 101 indica com el gruix de l'experiment 2 (corba blava, 6667rpm) té un major gruix tot i que igual que en l'anterior Figura 100 el resultat és molt similar, només es diferencia entre les longituds de 20 i 25mm. Igualment que en la comparació dels experiments anteriors, l'experiment amb menys gruix és el que més precisió obté.

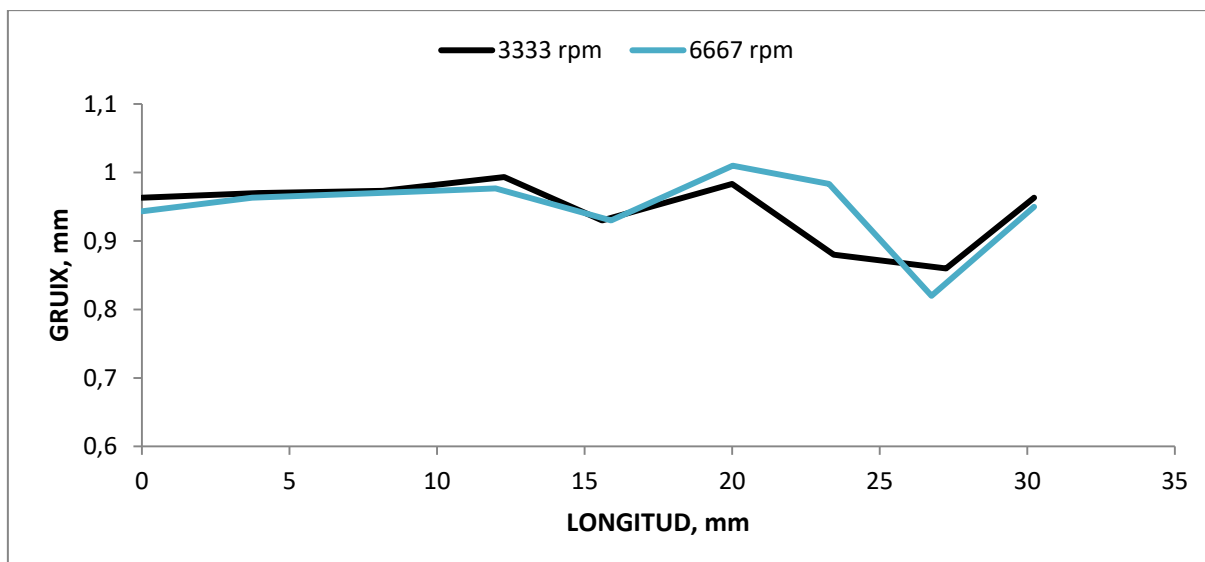


Figura 35 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0775 mm i Va 200 mm/min

Per el que fa la rugositat els experiments 1 i 3 tenen unes rugositats de $12,384\mu\text{m}$ i $13,071\mu\text{m}$ respectivament. Una altra vegada el resultat és molt similar tot i que el de l'experiment 1 (3333rpm) és lleugerament millor. En aquests experiments es creu que al tenir una profunditat de passada més alta, no afecta tant la velocitat de rotació del capçal.

El gràfic de força de la Figura 102 segueix la mateixa tendència descrita anteriorment.

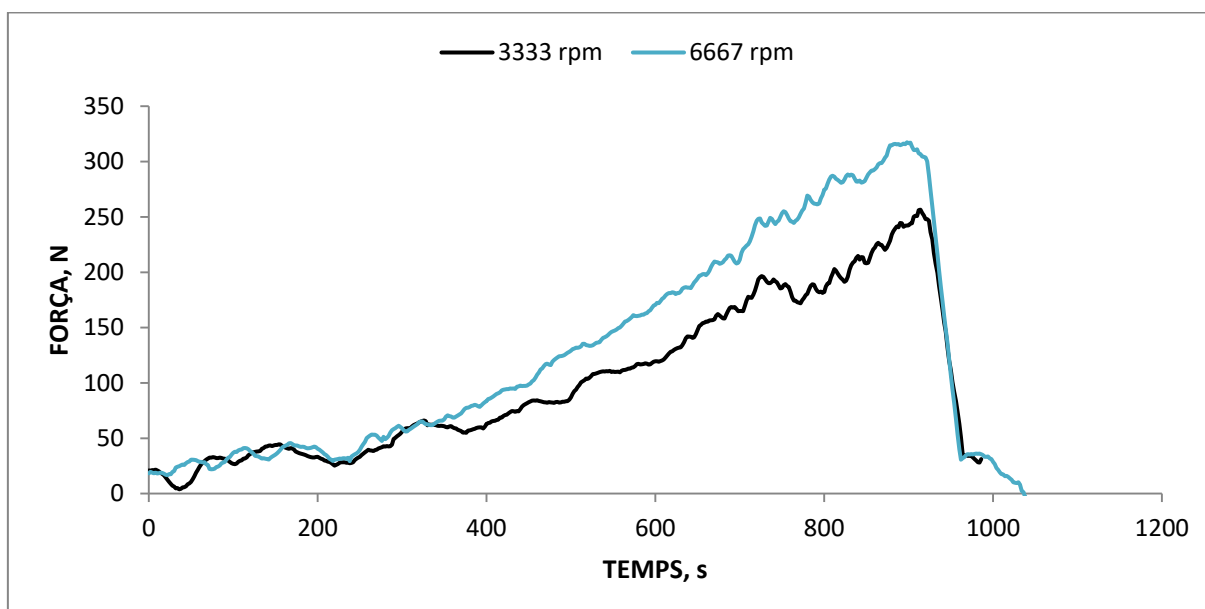


Figura 36 Comparació de força per assajos Δz 0,0775 mm i Va 200 mm/min

Igual que el gràfic de la força la Figura 103 sobre la temperatura també segueix la tendència anterior.

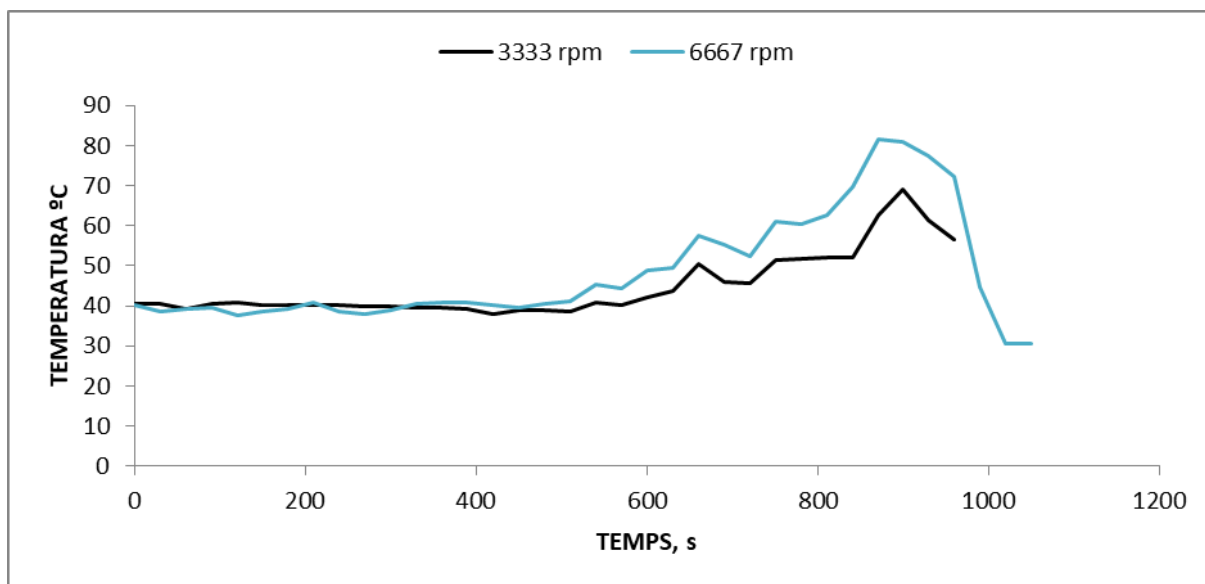


Figura 37 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0775 mm i Va 200 mm/min

- **Experiments 10, 11 i 14**

Aquests tres experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0525mm) i la velocitat d'avanc (360mm/min). Es diferencien per les velocitats de rotació del capçal: 2500rpm per l'experiment 10, 5000rpm per l'experiment 14 i 7500rpm per l'experiment 11).

La precisió es veu reflectida a la Figura 104 de manera que la velocitat de rotació intermèdia és la que té millor precisió.

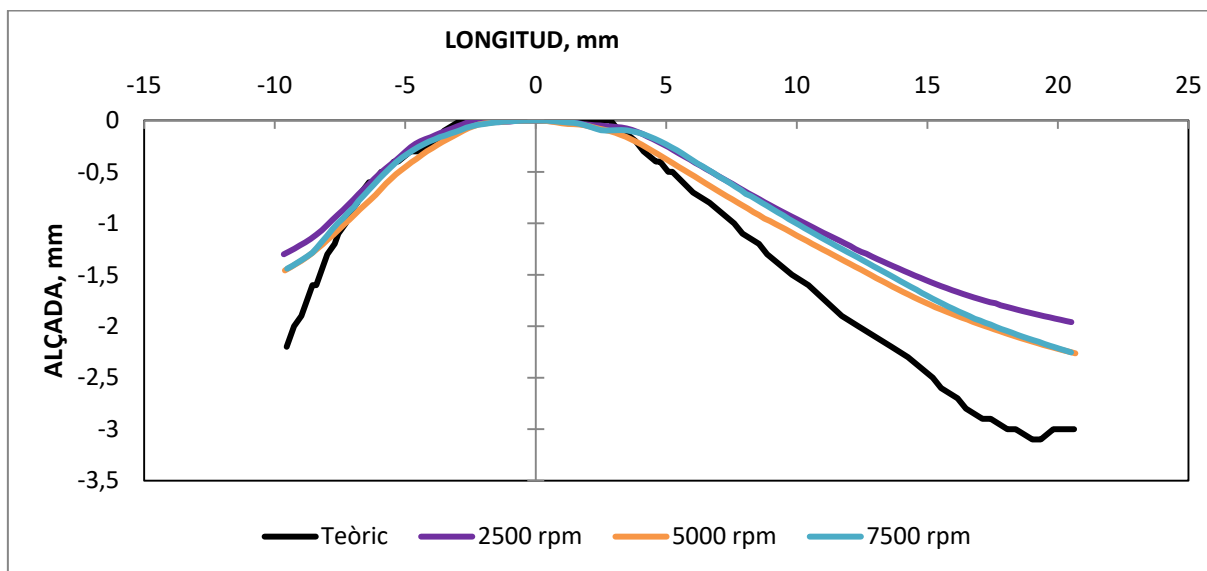


Figura 38 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0525 mm i V_a 360 mm/min

A través dels gruixos que es poden veure a la Figura 105 s'interpreta que el mínim gruix el té l'experiment 14 (5000rpm) de manera que igual que les anteriors figures l'experiment amb més precisió és el que més s'ha deformat.

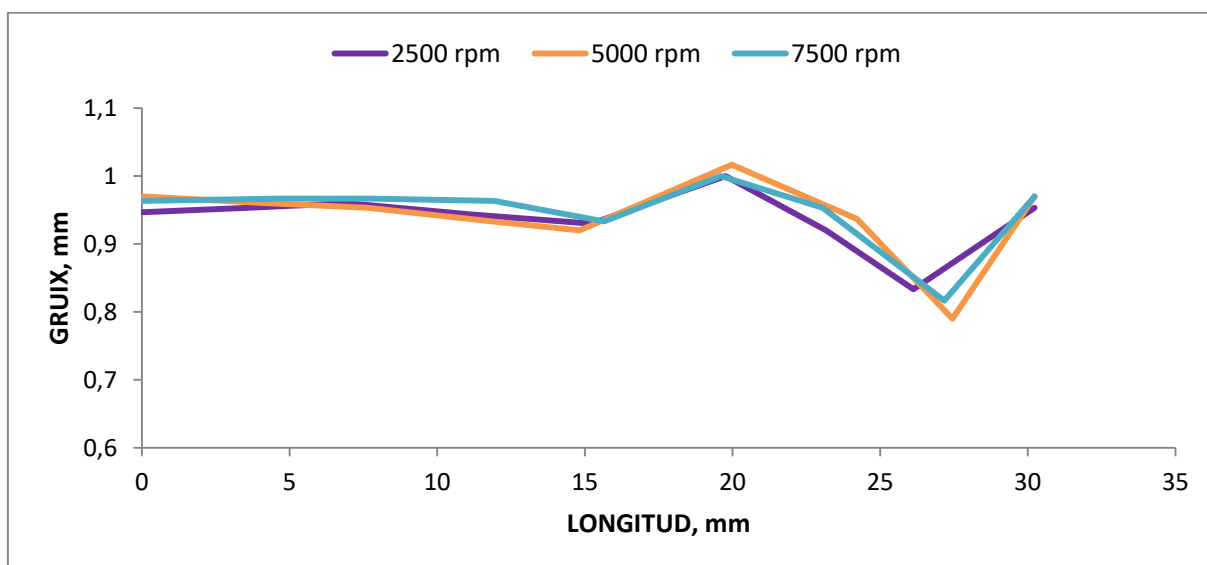


Figura 39 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0525 mm i V_a 360 mm/min

La força, Figura 106, en aquest cas no compleix la tendència anterior sobre com a major velocitat de rotació del capçal major força. Sí que compleix però que l'experiment amb major precisió també és el de major força (experiment 14).

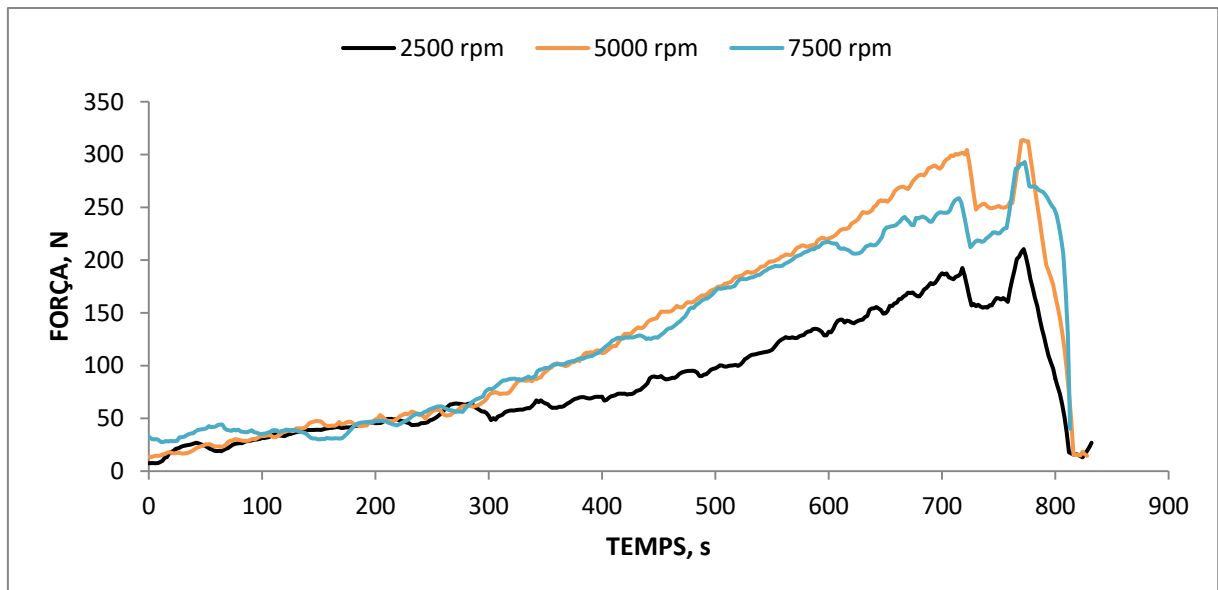


Figura 40 Comparació de força per assajos Δz 0,0525 mm i Va 360 mm/min

Per contra tal i com es pot veure a la Figura 101, la temperatura sí que segueix la tendència de com a major velocitat de rotació del capçal major temperatura de treball.

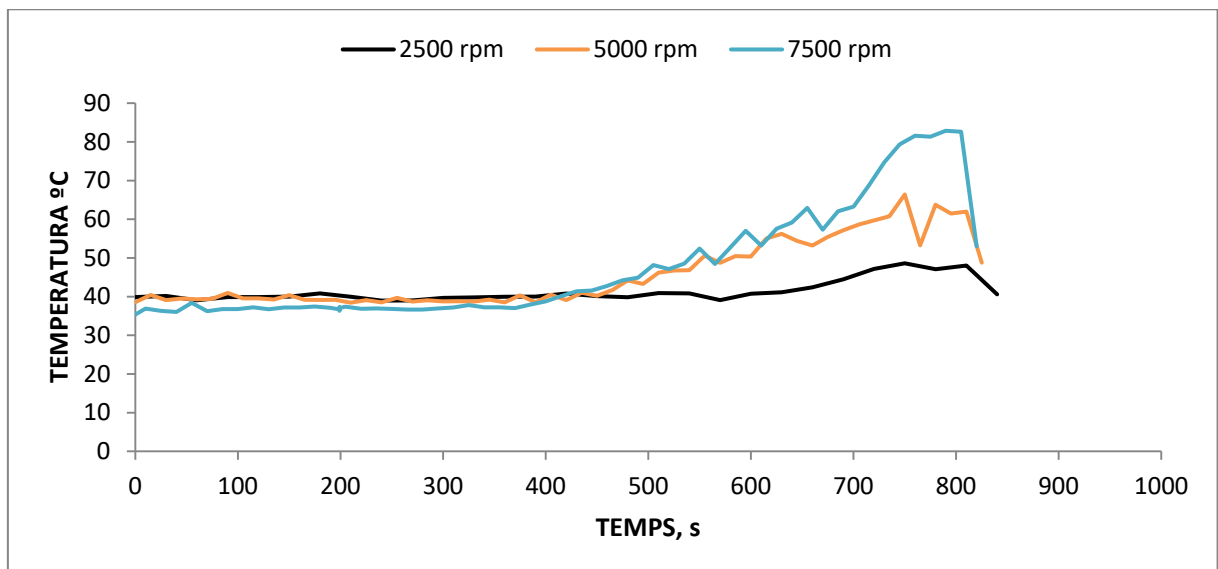


Figura 41 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0525 mm i Va 360 mm/min

- **Experiments 4 i 6**

Els dos experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0275mm) i la velocitat d'avanç (520 mm/min), es diferencien en la velocitat de rotació del capçal (3333rpm i 6667rpm)

Aquests experiments segueixen les tendències descrites a la primera comparativa entre els experiments 0 i 2 menys en la rugositat que al ser quasi idèntica no es dóna importància i es considera dins el rang de possible error de mesura. Els gràfics es poden veure a: Figura 108, Figura 109, Figura 110 i Figura 111. I les rugositats són de 4,371 μ m i 4,763 μ m respectivament.

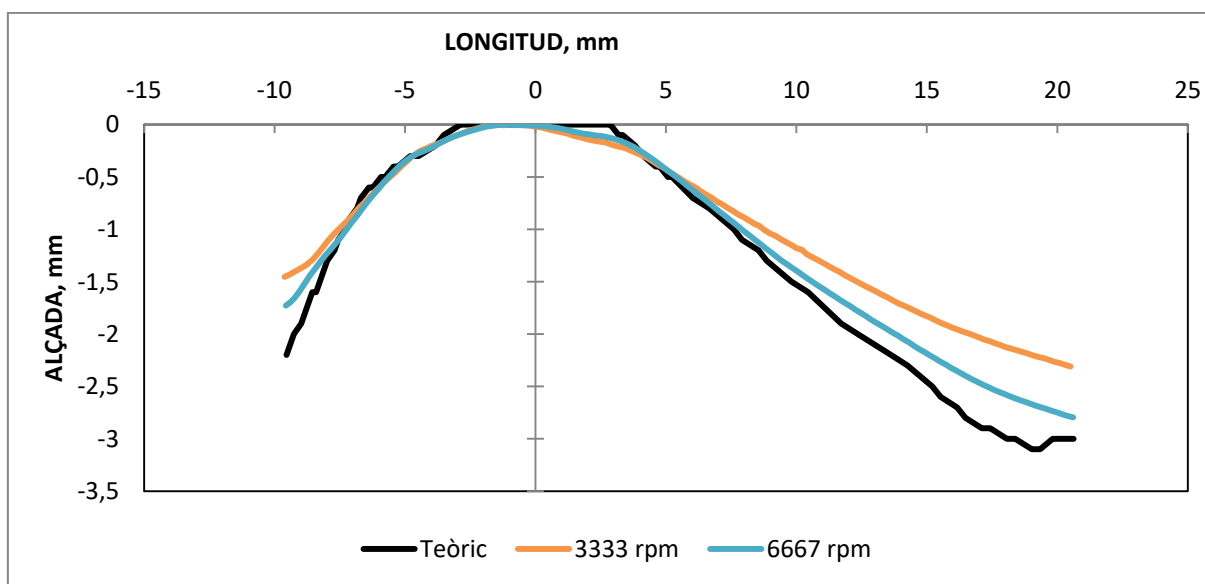


Figura 42 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 520 mm/min

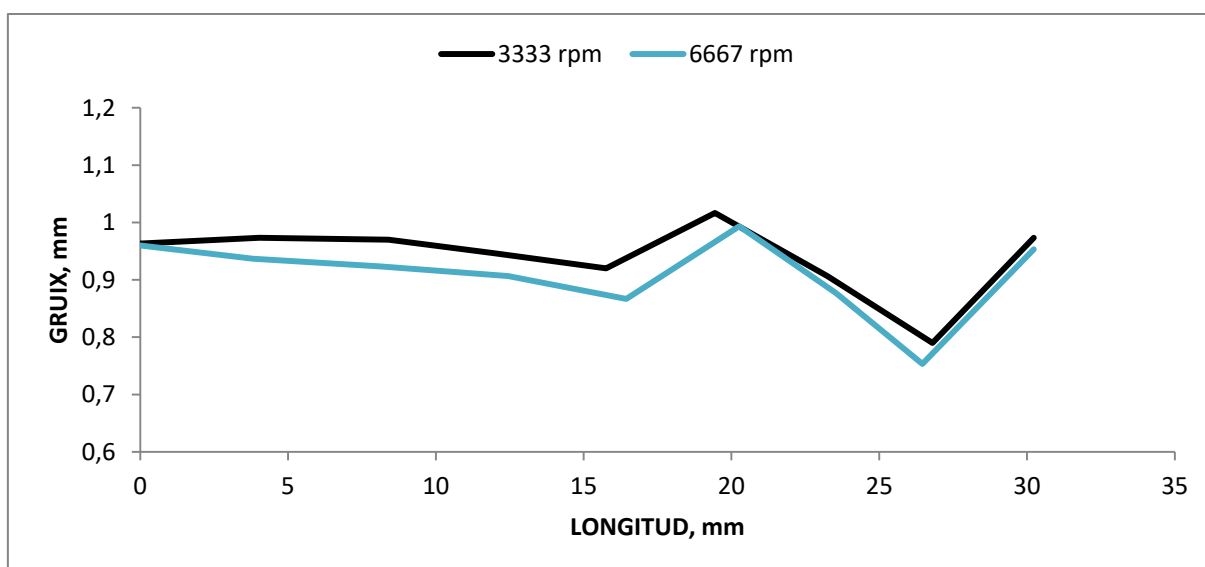


Figura 43 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 520 mm/min

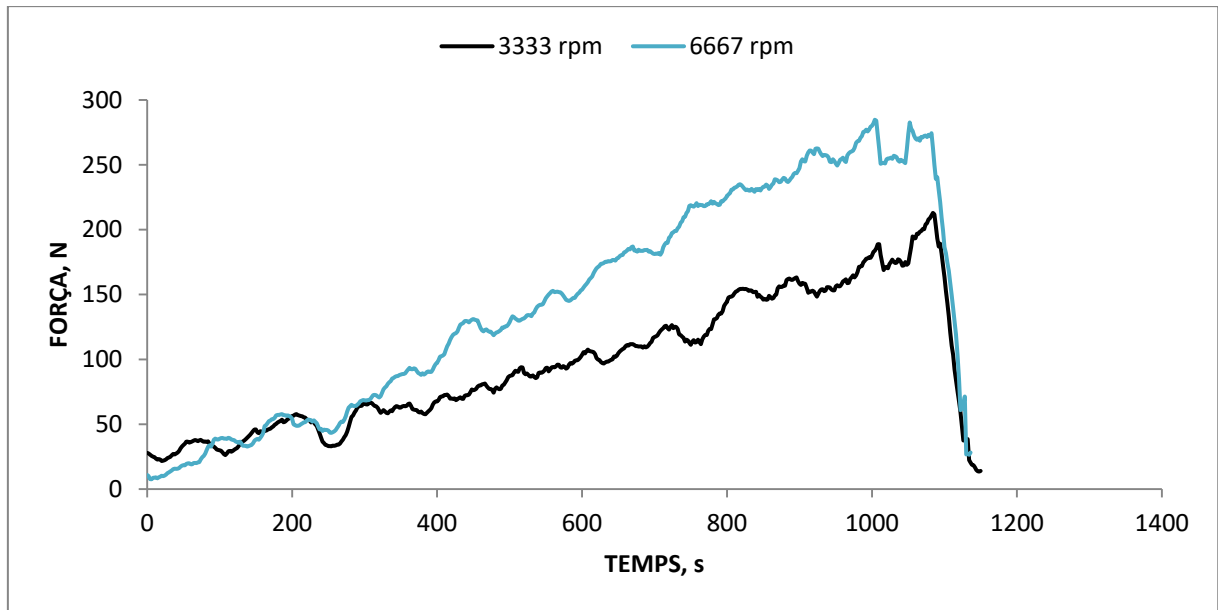


Figura 44 Comparació de força per assajos Δz 0,0275 mm i Va 520 mm/min

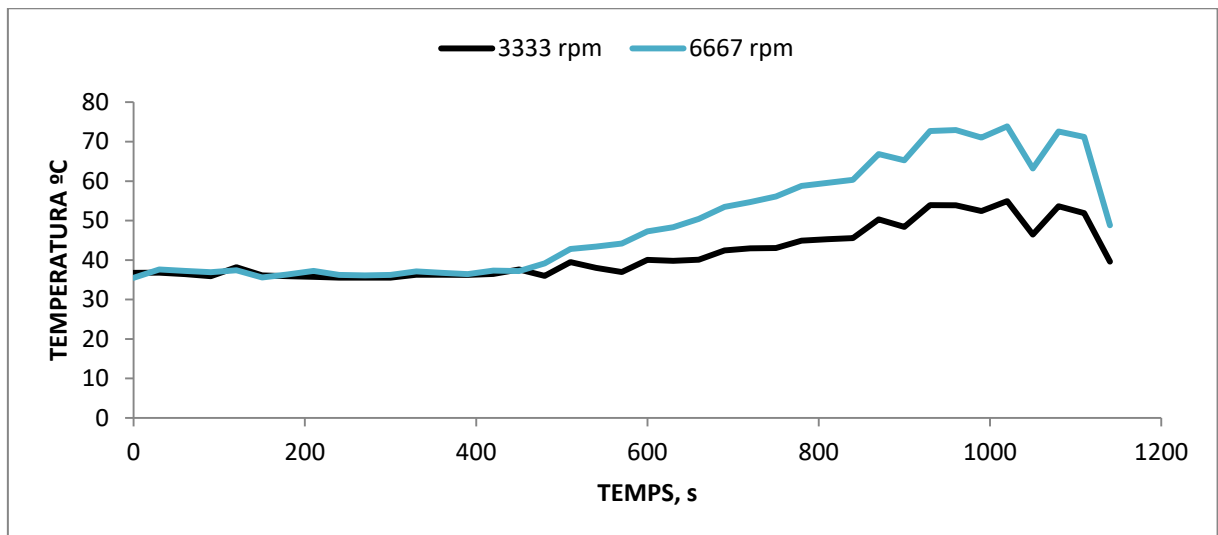


Figura 45 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0275 mm i Va 520 mm/min

- **Experiments 5 i 7**

Els dos experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0775mm) i la velocitat d'avanç (520 mm/min), es diferencien en la velocitat de rotació del capçal (3333rpm i 6667rpm).

En aquests dos experiments ens trobem al mateix cas que amb els dos experiments anteriors, es compleixen les tendències dels experiments 0 i 2 però la tendència de les rugositats és inversa. La rugositat de l'experiment 5 (3333rpm) és de 10,483 μ m i la de l'experiment 7 (6667rpm) és de 11,278 μ m.

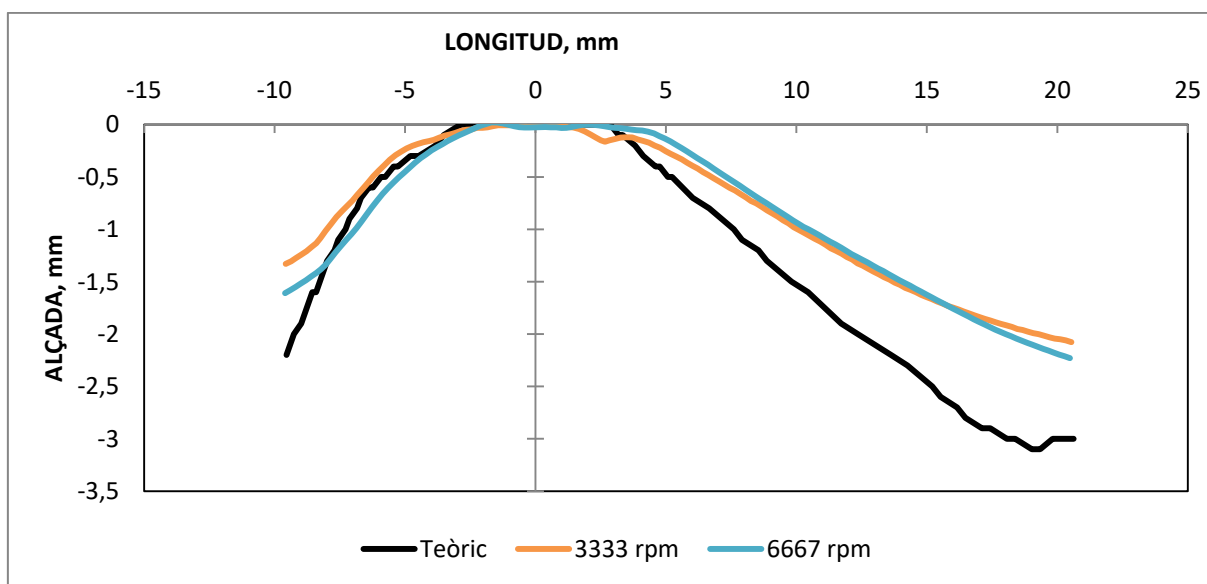


Figura 46 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0775 mm i V_a 520 mm/min

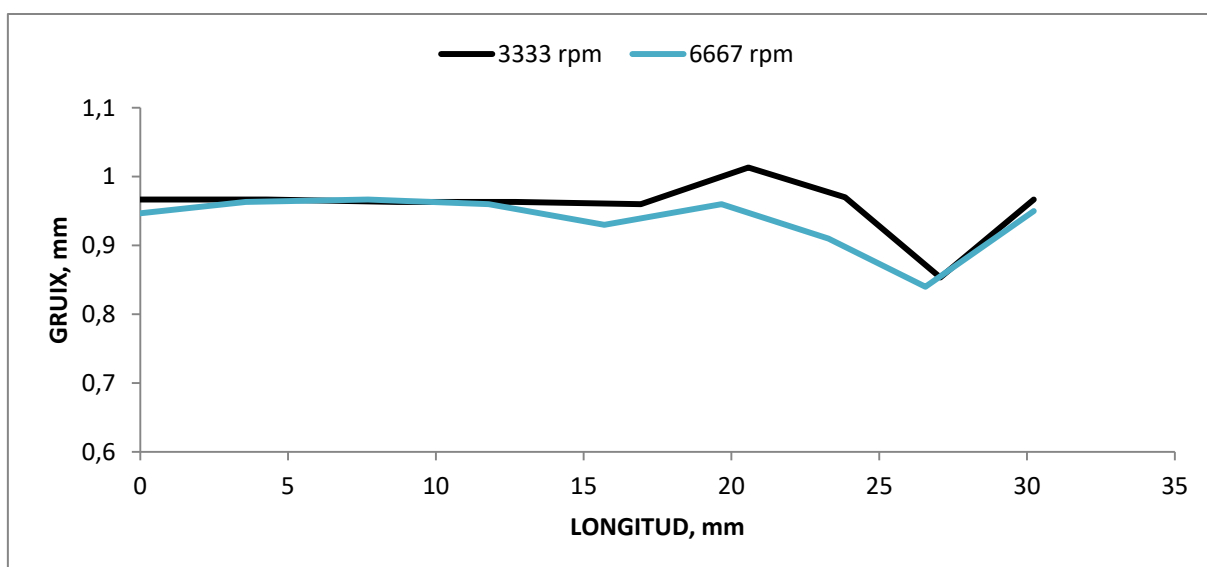


Figura 47 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0775 mm i V_a 520 mm/min

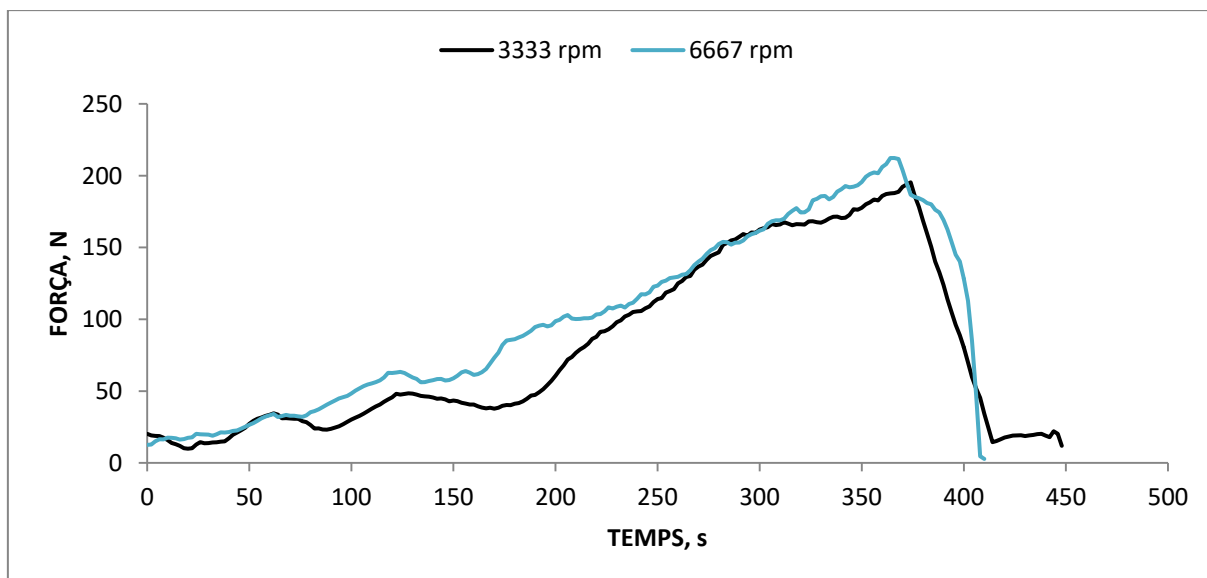


Figura 48 Comparació de força per assajos Δz 0,0775 mm i Va 520 mm/min

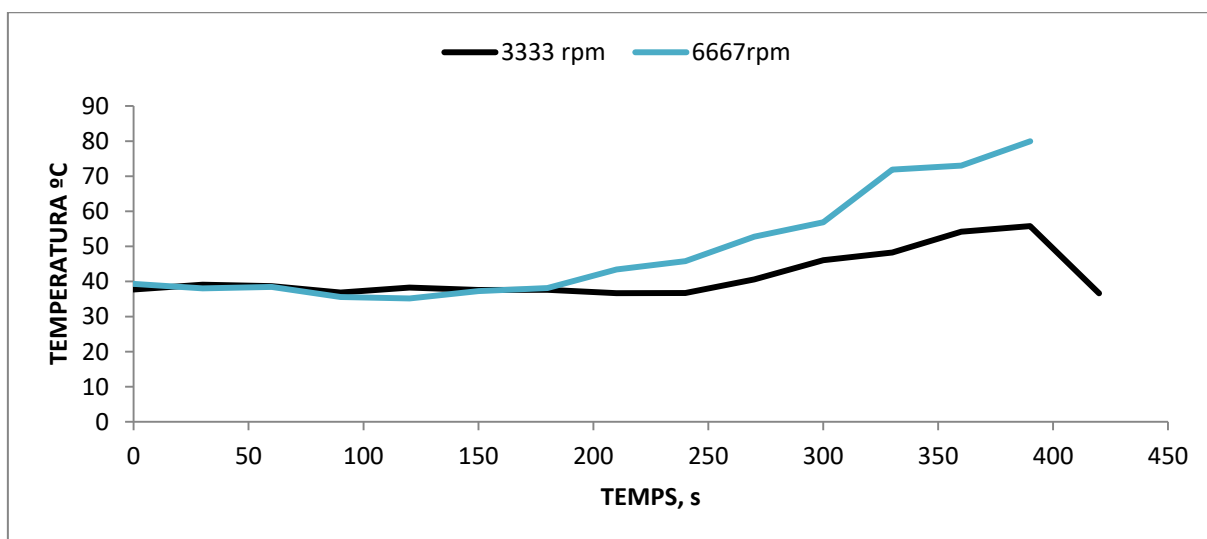


Figura 49 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0775 mm i Va 520 mm/min

Un cop analitzats els resultats del segon disseny d'experiment i realitzada la comparativa, es poden treure tot un seguit de conclusions per cada variable.

- Precisió: la variable més important del conjunt. Influenciada per tots els paràmetres de procés, cosa que fa que sigui complicat determinar un setup de treball òptim. De totes formes els millors resultats obtinguts han estat amb la profunditat de passada mínima, la velocitat de rotació del capçal màxima i la velocitat d'avanç mínima.
- Gruix: és una variable que va molt lligada amb la precisió. Les variables que condicionen el gruix de la pròtesi són la velocitat de rotació del capçal i la profunditat de passada. En aquest cas no es pot parlar de bons i mal resultats ja que els mals resultats són o bé la ruptura ,com ha succeït en dissenys d'experiments anteriors, o gruixos tant mínims que es pugui preveure una ruptura durant l'ús de la pròtesi.
- Rugositat: en aquest cas no hi ha dubte que la rugositat està condicionada per la profunditat de la passada i de la velocitat d'avanç tot i que en un principi també es pot pensar que la velocitat de rotació del capçal també hi hauria d'influir. Tot i així lògicament els millors resultats de rugositat s'obtenen quan la profunditat de passada és mínima i la velocitat d'avanç màxima.
- Força: està condicionada únicament per la velocitat de rotació del capçal i de la velocitat d'avanç. El fet de que el valor de força màxima no es situï entre el valors màxims de velocitat de rotació del capçal i de la velocitat d'avanç desconcerta.
- Temperatura: es veu molt afectada per la velocitat de rotació del capçal i de la profunditat de passada, en canvi, no li afecta tant la velocitat d'avanç.

4. RESULTATS TPIF

L'experimentació amb la tècnica TPIF interessava molt per poder comparar els resultats obtinguts amb la tècnica SPIF i poder treure unes bones conclusions de les diferències amb els dos sistemes. A més, amb la tècnica TPIF hem afegit la utilització de dos motlles per fabricació additiva.

Degut a l'interès esmentat al paràgraf superior, s'ha optat per escollir dos experiments del segon disseny d'experiments de la tècnica SPIF, el millor i el pitjor en temes de resultats, donant més importància a la precisió, rugositat i gruix de la peça.

Així doncs s'han escollit els experiment 12 (millor) i 5 (pitjor), veure Taula 5. El planteig que s'ha fet ha estat el de realitzar aquests dos experiments en els 3 tipus de materials que es tenen els motlles (Prolab 65, PLA i Resina Rígid) i a més realitzar una repetició amb el material Prolab 65 per tal de poder valorar si existeix una repetibilitat o no. Per tant, es realitzen 8 experiments.

Taula 16 Resultats TPIF

Exp.	Va, mm/min	N, rpm	Δz , mm	Precisió	Gruix mínim, mm	Ra, μm	F. màx, N	T. màx, $^{\circ}\text{C}$	Motlle
0	520	3333	0,0775	0,0550	0,810	13,69	293,864	51,28	Prolab 65
1	520	3333	0,0775	0,0419	0,820	13,53	271,464	51,76	Prolab 65
2	360	5000	0,015	0,0854	0,707	6,19	268,913	61,38	Prolab 65
3	360	5000	0,015	0,0889	0,717	5,17	266,911	56,9	Prolab 65
4	520	3333	0,0775	-	-	13,14	258,159	56,55	PLA
5	520	3333	0,0775	-	-	12,81	264,910	53,04	Resina
6	360	5000	0,015	-	-	5,72	291,851	58,22	PLA
7	360	5000	0,015	-	-	5,83	253,533	63,28	Resina

On (Exp.) és el número d'experiment, (Va) és la velocitat d'avanç, (N) és la velocitat del capçal, (Δz) és la profunditat de cada passada, (Ra) és la rugositat, (F. màx) és la força màxima i (T. màx) és la temperatura màxima.

A la Taula 16 es mostren els resultats dels experiments realitzats amb TPIF. Primer de tot cal destacar que els experiments 4, 5, 6 i 7 els resultats han estat la ruptura de la pròtesis durant el conformat d'aquesta, una altra vegada al punt de màxima profunditat (3,85mm) com ja s'havia donat el cas en els experiments previs. Degut a aquestes ruptures les columnes sobre la precisió i el gruix queden en blanc ja que és impossible realitzar una mesura precisa de la geometria si aquesta està deformada per la ruptura i igualment és negligible la mesura del gruix de la peça ja que amb la ruptura aquest valor és 0.

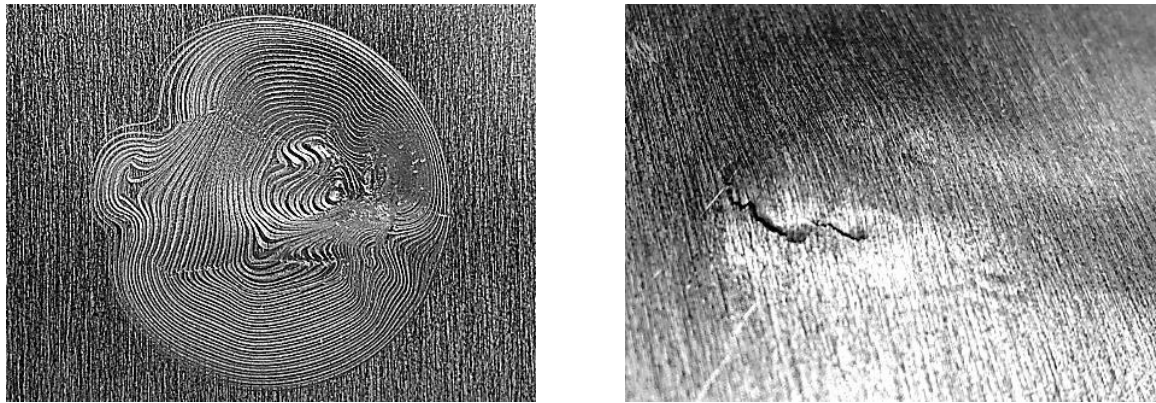


Figura 50 Mostra dels resultats dels experiments TPIF amb ruptura

Exposat aquests primers resultats, es pot veure com igualment que en els resultats amb SPIF s'obtenen millors resultats en temes de precisió quan s'utilitza una velocitat d'avanç i una profunditat de passada menor amb una velocitat de rotació del capçal elevada (experiments 2 i 3 amb valors de 0,0854 i 0,0889 respectivament). Juntament amb la precisió es té que el gruix de la peça és menor en els experiments on tenim una major precisió (experiments 2 i 3 amb gruixos de 0,707mm i 0,717mm). Igualment amb la rugositat es té la mateixa tendència que amb la tècnica SPIF, millor resultats amb valors baixos de profunditat de passada (experiments 2, 3, 6 i 7 amb valors al voltant de 5,7 μm).

Les variables de força i temperatura serviran per poder fer la comparació amb els resultats del segon disseny d'experiments realitzat amb SPIF.

Tot i així es pot observar com la força màxima assolida és bastant similar en tots els experiments (260N aproximadament) menys en es experiments 0 i 6 que aquesta augmenta significativament (290N). Aquest fet no es sap el què el provoca.

Per la temperatura es pot veure com aquesta, de mitjana, és lleugerament major en els experiments 2, 3, 6 i 7 en què la velocitat de rotació del capçal és major (5000rpm) i la velocitat d'avanç menor (360 mm/min).

S'arriba a la conclusió que l'afectació dels paràmetres de procés als resultats és molt similar al SPIF. El que sí que es pot comprovar, tot i que faria falta realitzar més experiments, és que la repetibilitat no és molt bona ja que entre els experiments 0 i 1 i els experiments 2 i 3 sempre hi ha variables que són suficientment diferents com per considerar-ho.

Per exemple, mirant la Taula 16, veiem com la força màxima de l'experiment 0 és de 293N mentre que la de l'experiment 1 és de 271N. Com que la resta de variables sí que són molt similars es podria considerar com a un valor atípic de força.

Per els experiments 2 i 3 sí que existeixen més diferències, concretament amb la rugositat (6,19 i 5,17 μ m) i la temperatura màxima (61,38 i 56,9°C)

Seguint amb la sintonia de tot el treball a l' ANNEX C EXPERIMENTACIÓ TPIF es pot consultar tota la matèria relacionada amb la decisió dels paràmetres de procés, el muntatge utilitzat per realitzar els experiments, així com les dades dels resultats en forma de gràfics, taules i imatges (incloent imatges de les pròtesis trencades).

4.1 Caracterització dels motlles

Per tal de poder verificar que els motlles han fet la seva funció i poder-ne mesurar el seu desgast de cares a estudiar la viabilitat dels motlles amb fabricació additiva, s'han caracteritzat els motlles abans i després del procés de deformació incremental. Aquesta caracterització també ens ha permès verificar que les impressores han imprès correctament el motlle i mesurar-ne la possible desviació.

4.1.1 Precisió

Per a realitzar la caracterització s'ha realitzat una mesura amb la màquina de coordenades de l'eix central longitudinal del motlle.

Els resultats es presenten de forma conjunta a la Figura 122 on podem veure en color taronja la corba teòrica del motlle provinent del CAD, en color negre podem veure el motlle un cop imprès amb la impressora i abans de ser utilitzat i en color blau podem veure l'estat final del motlle un cop ha sigut utilitzat. En tots dos casos els motlles s'han utilitzat dues vegades.

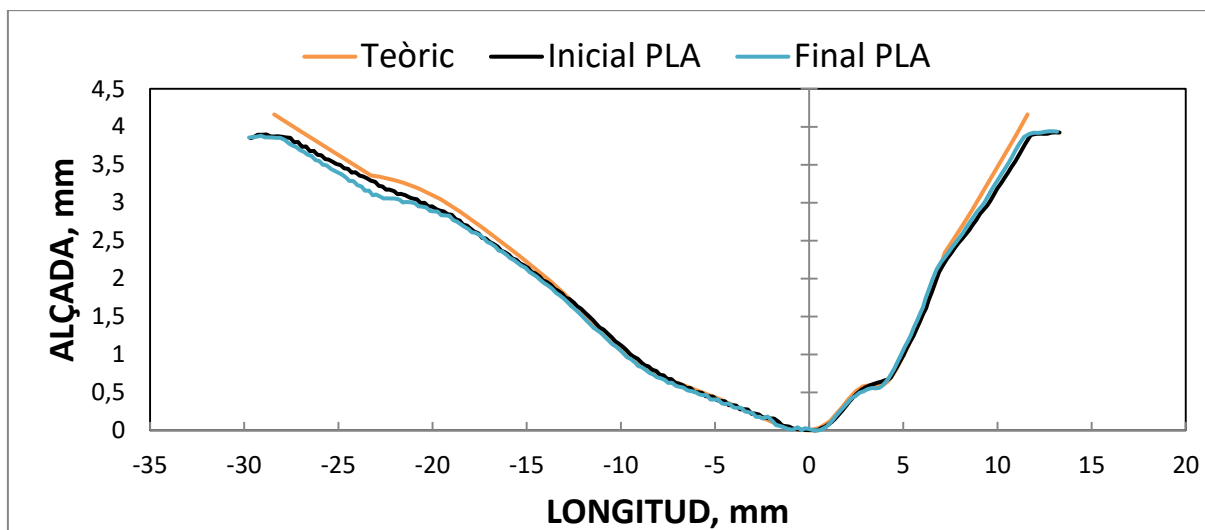


Figura 51 Comparació de la forma del motlle de PLA

Entre el motlle teòric i el motlle a l'estat inicial tenim una desviació de 0,5 mm. Entre el motlle a l'estat inicial i el motlle utilitzat dues vegades tenim una desviació de 0,033 mm.

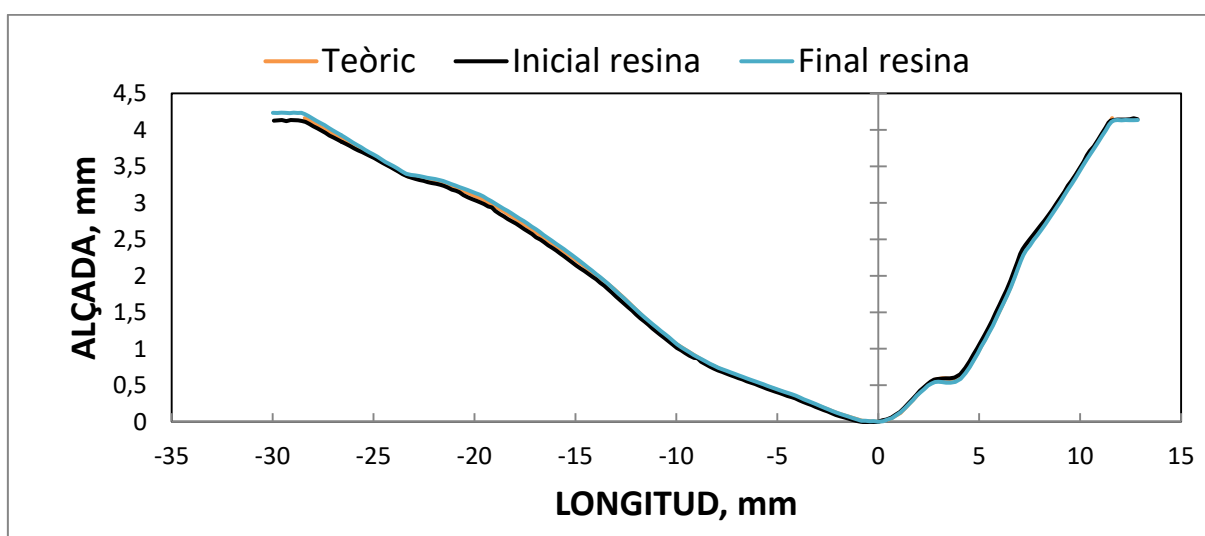


Figura 52 Comparació de la forma del motlle de Resina

En aquest cas a simple vista podem veure a la Figura 123 com la corba teòrica (taronja) queda solapada amb la corba inicial (negre), això és degut a que la precisió que ens permet obtenir la impressora amb la tecnologia utilitzada (SLA) és superior a l'anterior (FDM) i no existeix desviació entre el valor teòric i l'inicial. Entre el motlle a l'estat inicial i el motlle utilitzat dues vegades tenim una desviació de 0,045 mm, molt semblant en l'anterior motlle fabricat amb PLA.

Tot i no ser de fabricació additiva sinó directament mecanitzat, també s'ha caracteritzat de la mateixa forma que els anteriors, les pròtesis mecanitzades en el motlle de pròtesis.

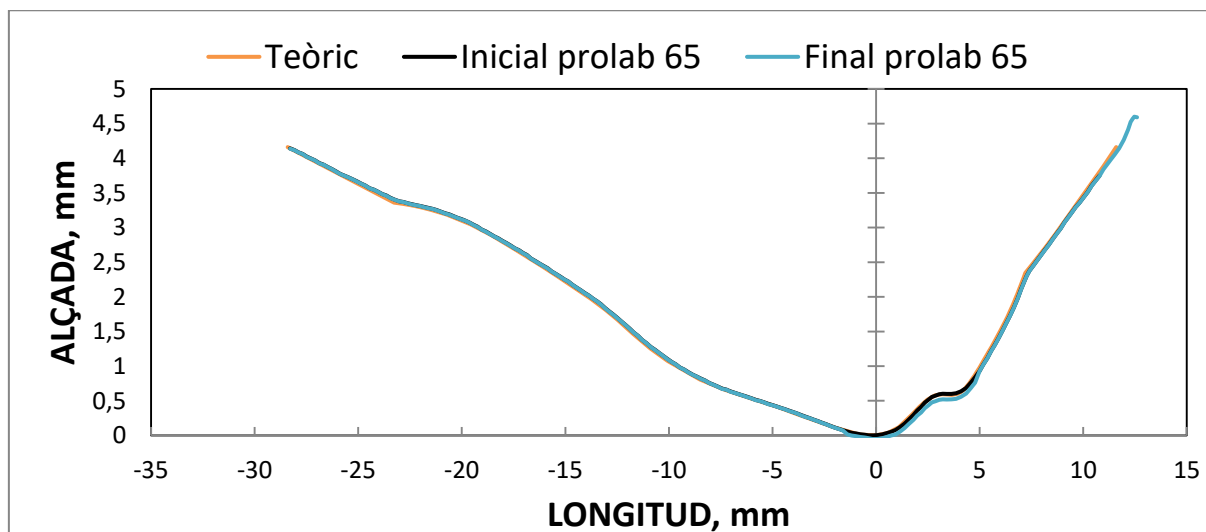


Figura 53 Comparació de la forma del motlle de Prolab 65

En aquest últim cas a la Figura 124 també podem veure com les tres corbes són pràcticament iguals, això és degut a que el procés de mecanitzat és més precís que algunes tècniques de fabricació additives com les que s'han utilitzat. La desviació que s'obté entre la corba inicial i la final és de 0,023 mm i sobretot està en el punt on es trencaven les pròtesis i, per tant, el punt més crític de la peça.

En tots tres casos podem afirmar que els motlles han realitzat la seva funció i no s'han deformat excessivament per poder influir en el resultat de la pròtesi.

4.1.2 Rugositat

També s'ha tingut en compte la rugositat a l'hora de caracteritzar els motlles ja que és un bon indicatiu per saber si la planxa de magnesi s'ha recolzat sobre el motlle o no.

Els resultats inicials i finals es presenten a la Taula 38:

Taula 17 Rugositat dels motlles

Motlle	Instant	Ra, μm
Prolab 65	Inicial	4,435
	Final	2,886
PLA (FDM)	Inicial	14,064
	Final	12,390
Resina Rígid (SLA)	Inicial	2,217
	Final	0,769

Es pot veure clarament com en tots els casos la rugositat després de realitzar l'experiment és inferior que en el moment inicial, això ens dóna a entendre que en tots els casos la planxa de magnesi s'ha deformat fins a arribar a tocar el motlle.

Si ens fixem i comparem la rugositat inicial dels motlles amb les diferents formes de fabricació, podem apreciar com la tecnologia SLA té uns molt bon acabats (tot i ser fabricació additiva), el motlle mecanitzat també té un bon acabat (afegint processos al full de ruta es podrien aconseguir millors en cas que fos necessari) i amb la tecnologia FDM tenim uns resultats acceptables.

El fet de que amb la tecnologia FDM es van sumant capes una sobre l'altre i cada capa es realitza en zig-zag afegint material des d'un extrusor, crea una rugositat força elevada. Tenint el coneixement com tenim de la tecnologia FDM, el motlle s'ha fabricat amb una alçada de capa de 0,06 mm (molt baixa) intentant aconseguir el millor acabat superficial possible sense haver de postprocessar la peça. Si haguéssim adquirit una alçada de capa major, la rugositat hauria estat més elevada encara.

5. COMPARACIÓ ENTRE SPIF I TPIF

En aquest apartat es comparen els resultats entre les dues tècniques de deformació utilitzades durant el treball. Es compara el segon disseny d'experiments (SPIF) amb els experiments realitzats amb els diferents motlles mecanitzats i amb fabricació additiva (TPIF).

Cal recordar que del segon disseny d'experiments es van escollir dues configuracions per realitzar-les amb TPIF. La que va donar millors resultats (experiment 12) i la que els va donar pitjors (experiment 5). Lògicament es comparen els experiments amb els mateixos paràmetres de procés.

Taula 18 Comparació resultats SPIF i TPIF

Exp.	Va, mm/min	N, rpm	Δz , mm	Precisió	Gruix mínim, mm	Ra, μm	F. màx, N	T. màx, $^{\circ}\text{C}$	Motlle
SPIF									
5	520	3333	0,0775	0,0168	0,8533	10,48	207,43	55,8	-
12	360	5000	0,015	0,0367	0,7433	4,19	309,208	55,13	-
TPIF									
0	520	3333	0,0775	0,0550	0,810	13,69	293,864	51,28	Prolab 65
1	520	3333	0,0775	0,0419	0,820	13,53	271,464	51,76	Prolab 65
2	360	5000	0,015	0,0854	0,707	6,19	268,913	61,38	Prolab 65
3	360	5000	0,015	0,0889	0,717	5,17	266,911	56,9	Prolab 65
4	520	3333	0,0775	-	-	13,14	258,159	56,55	PLA
5	520	3333	0,0775	-	-	12,81	264,910	53,04	Resina
6	360	5000	0,015	-	-	5,72	291,851	58,22	PLA
7	360	5000	0,015	-	-	5,83	253,533	63,28	Resina

On (Exp.) és el número d'experiment, (Va) és la velocitat d'avanç, (N) és la velocitat del capçal, (Δz) és la profunditat de cada passada, (Ra) és la rugositat, (F. màx) és la força màxima i (T. màx) és la temperatura màxima.

- Precisió: clarament s'han obtingut millors resultats amb TPIF tal i com es pot veure, a part de la Taula 18, a la Figura 54 on la corba TPIF (blava) s'adapta molt millor a la corba teòrica (negra) que la corba SPIF (taronja). S'ha de dir que els programes ISO utilitzats per a realitzar el procés de SPIF i TPIF són diferents ja que la geometria utilitzada per TPIF és una mica diferent degut a que es va suavitzar el perímetre per tal que la planxa no quedés seccionada al realitzar el assajos. Per tant, un petit percentatge d'aquesta millora pot ser deguda a aquest factor, tot i així, es pot assegurar que no és el responsable d'obtenir una millora tant notable.

Aquesta millora és el resultat de que la planxa es recolzi i quedi "atrapada" entre l'eina del centre de treball i el motlle. Aquests resultats són els buscats.

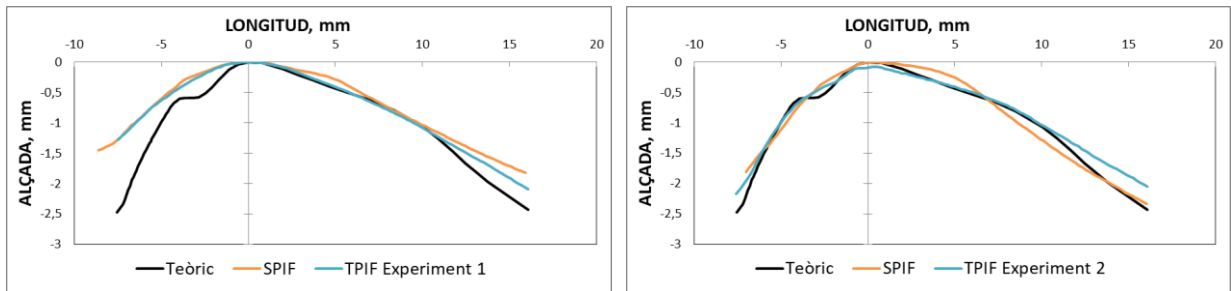


Figura 54 Comparativa SPIF-TPIF sobre precisió

- Gruix: tal i com es ve dient durant el treball aquesta variable va molt lligada amb la precisió, per això no és d'estranyar que el gruix de la peça sigui menor (major aprimament) en les pròtesis realitzades amb TPIF. A la Figura 55 es pot veure com la corba TPIF (blava) aconseguix un menor gruix que la corba SPIF (negra).

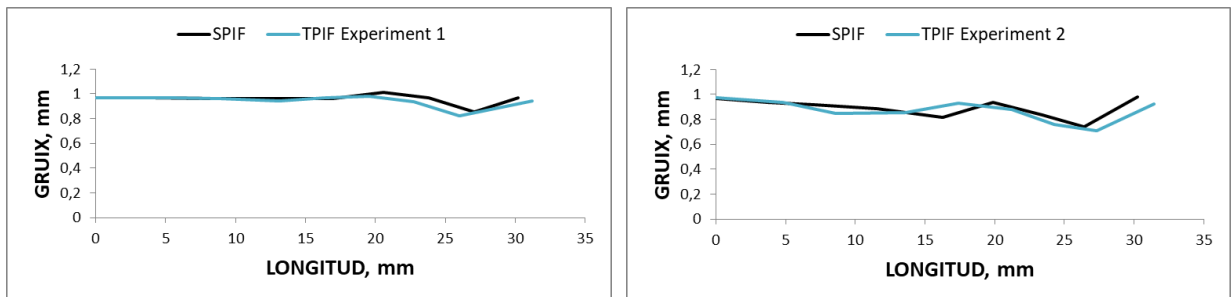


Figura 55 Comparativa SPIF-TPIF sobre gruix

- Rugositat: en tots els casos es pot veure com la rugositat en TPIF és pitjor que amb SPIF. Aquests valors no són els esperats ja que es pensava que al recolzar-se la planxa sobre el motlle, a part de millorar-ne la precisió, també en milloraria la rugositat. Com a exemple es pot veure que l'experiment 12 de SPIF té una rugositat de $4,19\mu\text{m}$ i els experiments 2, 3, 6 i 7 de TPIF són de $6'19\mu\text{m}$, $5'17\mu\text{m}$, $5'72\mu\text{m}$ i $5'83\mu\text{m}$ respectivament.
- Força: en aquest punt es pot observar a la Figura 56 com la força dels experiments TPIF que utilitzen els paràmetres de procés de l'experiment SPIF 5 ha augmentat i notablement (de 207N a 265N aprox.), en canvi, els experiments TPIF restants tenen una menor força que els experiments SPIF (de 309N a 265N aprox.). La predicció era que la força serviria per determinar si la planxa es recolzava sobre el motlle, ja que si això passava la força augmentaria al estar l'eina del centre pressionant la planxa i el motlle, però no ha estat així. També es creu que la sensibilitat i precisió del sistema d'adquisició de la força no és prou

eficient ja que si es comprova els resultats entre els experiments TPIF i les seves rèpliques (experimentos 0 i 1 i experimentos 2 i 3) que haurien de ser idèntics, també són diferents. Per tant, o el sistema d'adquisició no és del tot precís o existeix poca repetibilitat entre experiments.

En la mateixa figura també es pot observar el que s'ha comentat abans per la precisió del que els programes per TPIF eren diferents. Es pot comprovar per la durada de l'experiment.

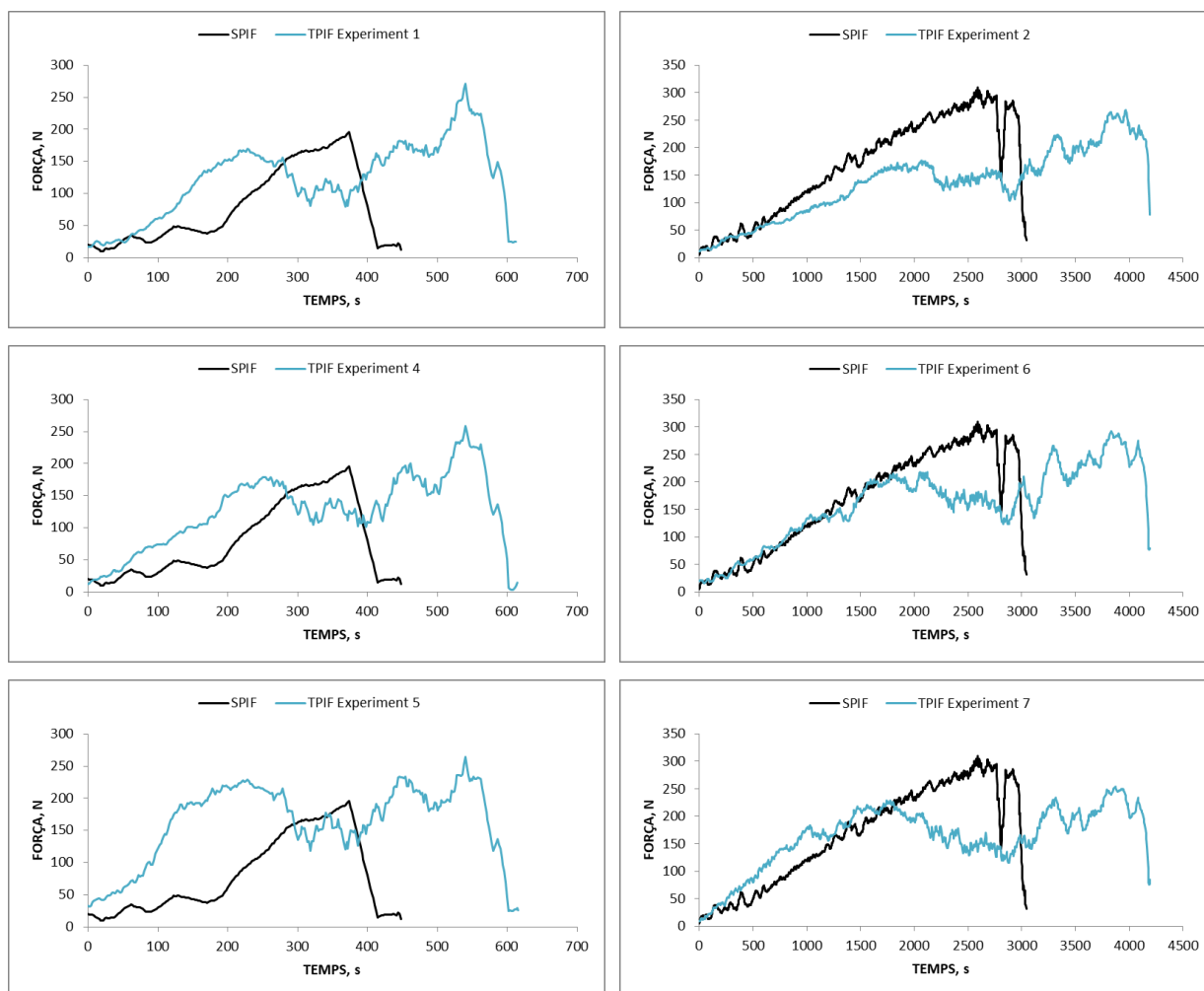


Figura 56 Comparativa SPIF-TPIF sobre força

- Temperatura: les temperatures en tots els casos són bastant similars tret dels experiments 2 i 7, veure Taula 18 i Figura 57, per causes que es desconeixen. No es tenia cap idea dels resultats que eren d'esperar ja que al tenir els motlles es podia pensar que podrien ajudar a dissipar el calor generat per la fricció o, al contrari, podia passar que la temperatura augmentés al aconseguir una major deformació.

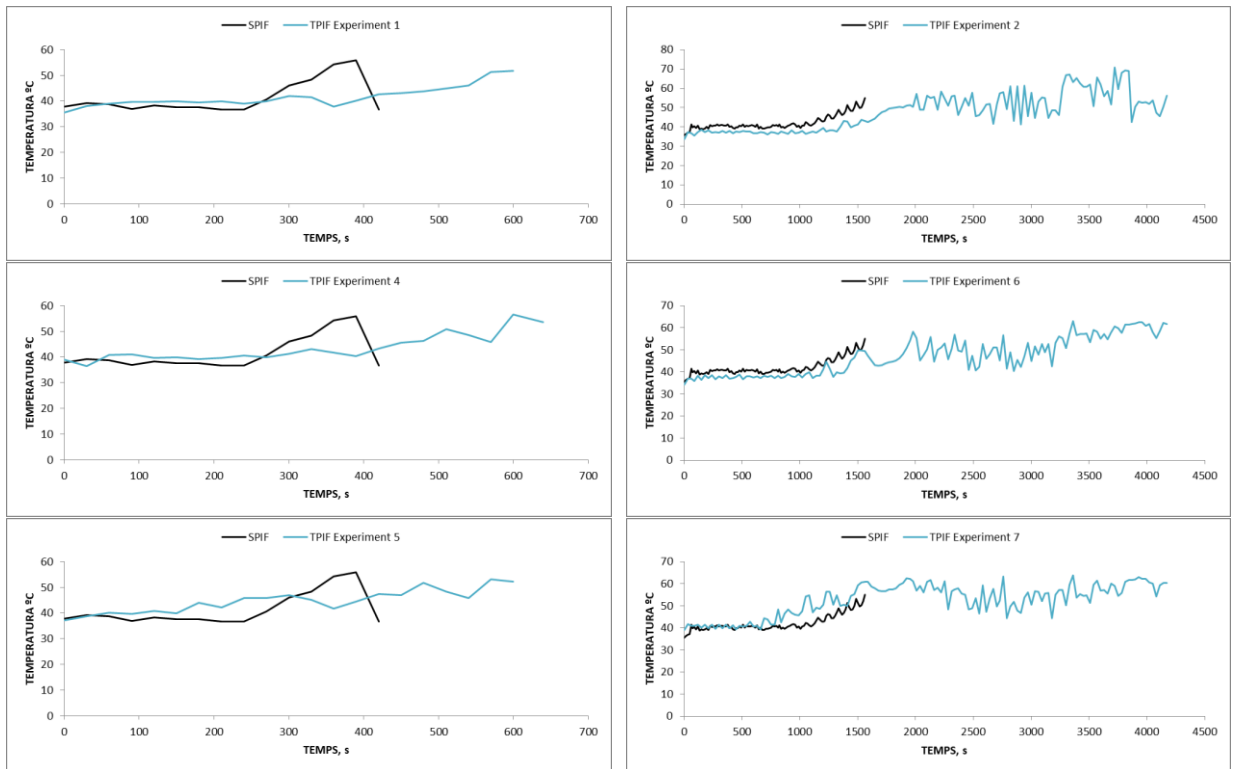


Figura 57 Comparativa SPIF-TPIF sobre temperatura

6. CONCLUSIONS

En aquest treball s'ha mostrat tot el procediment per obtenir i analitzar unes pròtesis de magnesi utilitzant les tècniques SPIF i TPIF.

S'ha pogut veure com els paràmetres de procés incideixen molt en els resultats de les variables estudiades (precisió, gruix, rugositat, força i temperatura). L'objectiu d'aquest treball era el de poder arribar a fabricar una bona pròtesi en termes de precisió utilitzant la tècnica TPIF amb motlles de fabricació additiva, ja que més endavant es compararan aquest resultat amb les geometries obtingudes al realitzar la mateixa pròtesi però utilitzant la tècnica del superplastic forming.

A grans trets es pot veure com existeixen unes tendències pel que fa les variables analitzades. També s'ha de dir que no sempre s'han complert i això es deu molt possiblement que no tenim prou sensibilitat en alguns aparells de mesura, que la geometria és molt petita o que tenim poca variació en els paràmetres de procés com pot ser la profunditat de passada.

Els resultats amb SPIF són bons, s'ha comprovat com la temperatura, sigui de forma constant i directe, o realitzant un procés de trempat ajuda molt a la capacitat de deformació del material. També es pot afirmar, a partir dels resultats estadístics del segon disseny d'experiments, les conclusions aportades a l'apartat 3.4 Comparació i conclusions principals.

En canvi els resultats amb TPIF han estat sorprenents ja que no s'esperava que succeís la ruptura de la pròtesi en cap assaig. Tot i això, els resultats que s'han extret de les mostres que no s'han trencat són satisfactoris ja que confirmen les expectatives que es tenien: la precisió augmenta considerablement al utilitzar un motlle on, durant la conformació de la peça, s'hi pugui recolzar la planxa.

La viabilitat dels motlles de fabricació additiva queda resolta de forma molt positiva ja que no s'ha tingut cap problema amb els motlles utilitzats ni amb els seus materials. A més s'han caracteritzat aquests motlles per tal de poder-ne avaluar el seu desgast i els resultats, es poden veure a l'apartat C.4 Caracterització Motlles, són molt bons en termes de precisió. Pel que fa la rugositat existeix molta diferència segons la tecnologia utilitzada per la seva fabricació, d'aquesta forma és aconsellable utilitzar la tecnologia SLA per a obtenir millors resultats.

Es fa una valoració molt bona dels aparells de mesura que han estat disponibles al taller del GREP ja que han permès quantificar els resultats de forma notable i, evidentment, poder-ne realitzar la comparació. Tot i que com s'esmenta varies vegades durant el treball la sensibilitat d'alguns aparells s'hauria de revisar o si més no realitzar un calibratge.

En un futur es podrien realitzar més dissenys d'experiments augmentant el rang dels valors dels paràmetres de procés per tal de buscar els límits del material i acabar de confirmar els resultats obtinguts en aquest treball, sobretot en TPIF.

7. BIBLIOGRAFIA

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.

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.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932013000200007

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6707>

<https://www.mathworks.com/help/stats/response-surface-designs.html>

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/response-surface/create-response-surface-design/create-central-composite-design/before-you-start/overview/>

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/what-is-alpha-in-a-central-composite-design/>

https://www.researchgate.net/figure/The-example-points-of-a-central-composite-design-CCD-with-two-input-parameters_fig1_273723328

https://www.researchgate.net/figure/Example-of-central-composite-design-for-2-factors-with-a-1-Symbol-points-are-the_fig3_306024314

8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

- Document 1: Memòria i annexos
 - Annex A. Adquisició de dades i anàlisi estadística
 - Annex B. Experimentació SPIF
 - Annex C. Experimentació TPIF
 - Annex D. Fabricació de motlles
- Document 2: Plànols
- Document 3: Pressupost

ANNEX A
ADQUISICIÓ DE DADES
I ANÀLISIS
ESTADÍSTICA

A.1 Precisió

Per tal de poder valorar l'ajustatge de la pròtesi obtinguda durant tot el procés de deformació amb la pròtesi teòrica s'ha realitzat una mesura del perfil longitudinal mitjançant la màquina de coordenades Mitutoyo model Crysta-Apex C544. Amb aquest procediment s'ha obtingut un conjunt de punts que un cop més s'han exportat en un format compatible amb l'Excel i hem pogut comparar la corba teòrica amb la corba experimental. La corba real s'ha aconseguit a través del programa Rhinoceros i el sòlid 3D que ja teníem prèviament.

Per tal de solapar bé les dues corbes a l'hora de calcular la desviació, s'ha pres com a referència la màxima alçada de cada corba ubicant-la al 0,0 del gràfic. Com que la mesura realitzada amb la màquina de coordenades és més llarga que la corba real, s'han eliminat els punts sobrants de la corba experimental de manera que ens queda la mateixa longitud en les dues corbes. Tot seguit, per cada punt que tenim en l'eix horitzontal del gràfic, s'ha calculat la seva diferència vertical entre les dues corbes. Aquests valors obtinguts s'han sumat de manera que ens queda que com més alt sigui aquest valor, menys exactitud tenim. Com que no té massa sentit que si parlem d'exactitud com major sigui el valor de la suma total menor sigui l'exactitud, s'ha utilitzat l'invers d'aquesta suma com a índex per poder valorar l'exactitud de la pròtesis. Per tant, finalment ens queda un valor amb un rang de 0 a 1 que com major és, major és la exactitud de la pròtesis experimental envers la pròtesis real.

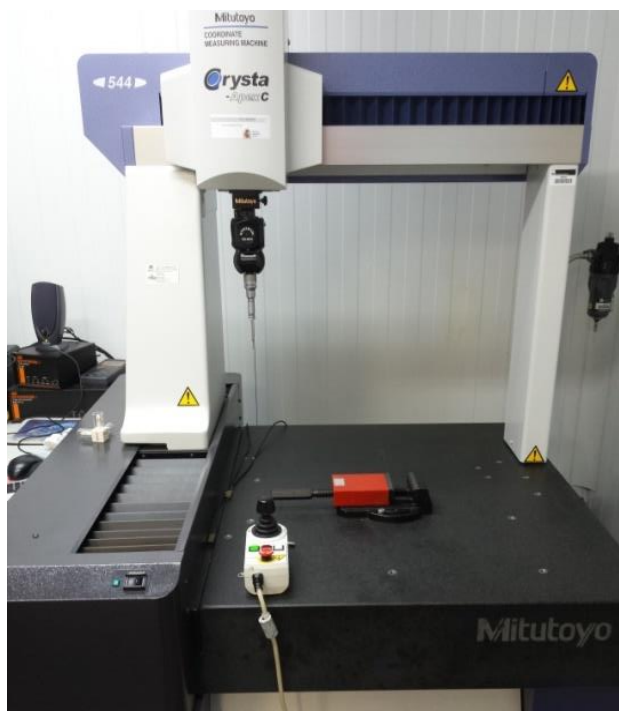


Figura 58 Adquisició de la geometria

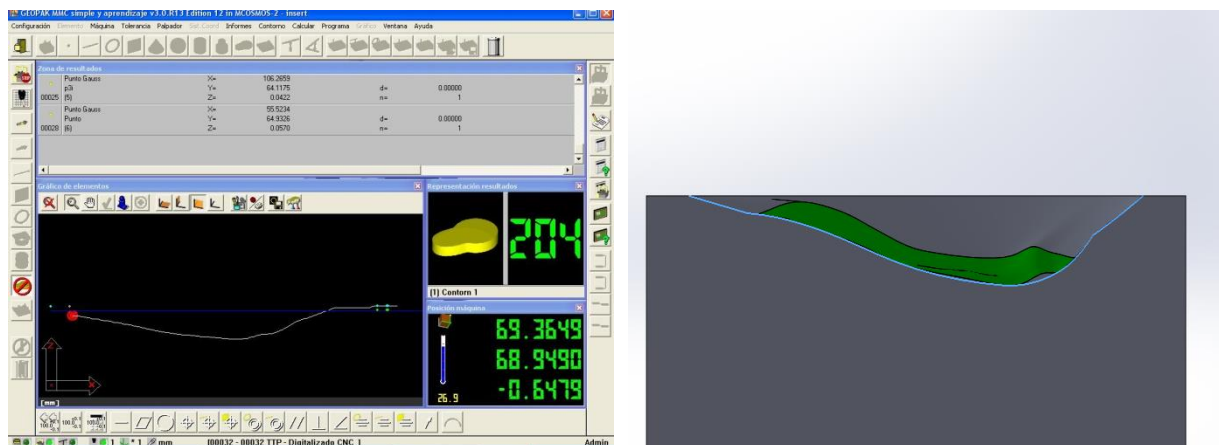


Figura 59 Corba geometria experimental (esquerra) i teòrica (dreta)

A.2 Gruix

L'obtenció de les dades del gruix de la pròtesis s'ha realitzat de manera directa amb un peu de rei. Les pròtesis s'han tallat per la meitat seguint el seu eix longitudinal amb la serra de cinta vertical i després s'han marcat 9 punts situats a cada pròtesis just en el mateix lloc per tal de mesurar-ne el gruix del magnesi. La mesura per cada punt s'ha realitzat 3 vegades per tal de minimitzar l'error. Els resultats finals de la Taula 23 són els de realitzar la mitjana de cada punt de cada experiment i escollir el mínim gruix obtingut. Per realitzar els gràfics s'han realitzat fotografies de totes les seccions de les pròtesis per tal de poder mesurar els punts marcats i, a través d'un factor d'escala, aconseguir poder comparar exactament el gruix dels mateixos punts en cada pròtesi.

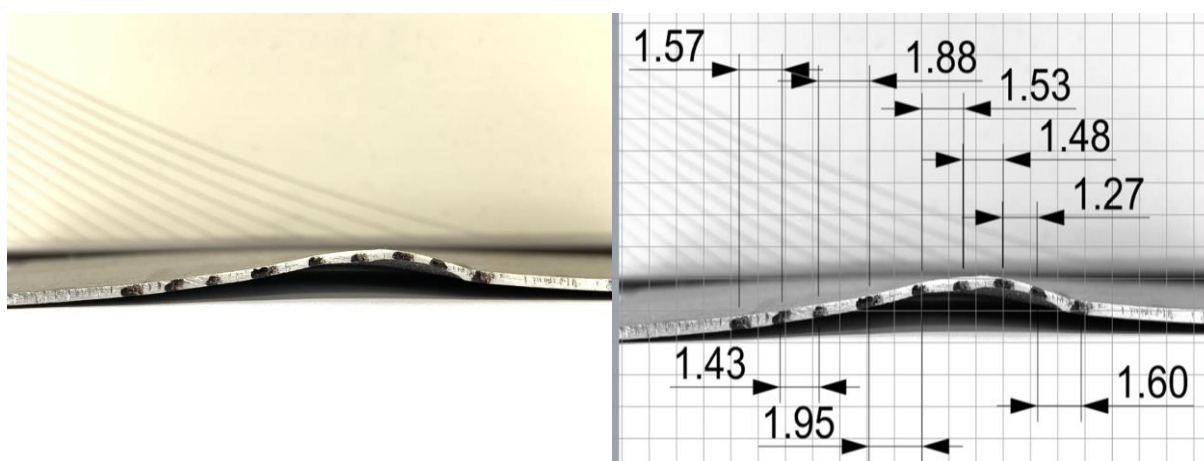


Figura 60 Adquisició del gruix de la pròtesi

A.3 Rugositat

La rugositat s'ha obtingut amb el rugosímetre Mitutoyo Surfptest SV1000 i el seu programa Surfpack-SV v1.300. Les adquisicions s'han realitzat a l'eix longitudinal de la pròtesi començant des del centre de manera que, segons les trajectòries de l'eina al deformar la xapa, teníem les crestes a mesurar el més perpendicular possible a la trajectòria del palpador. Tot i així per garantir que la longitud mesurada per el palpador estava el més paral·lel al terra possible hem subjectat la pròtesis tal i com es mostra a la foto següent. Per poder valorar la rugositat entre els diferents experiments hem utilitzat el valor Ra.

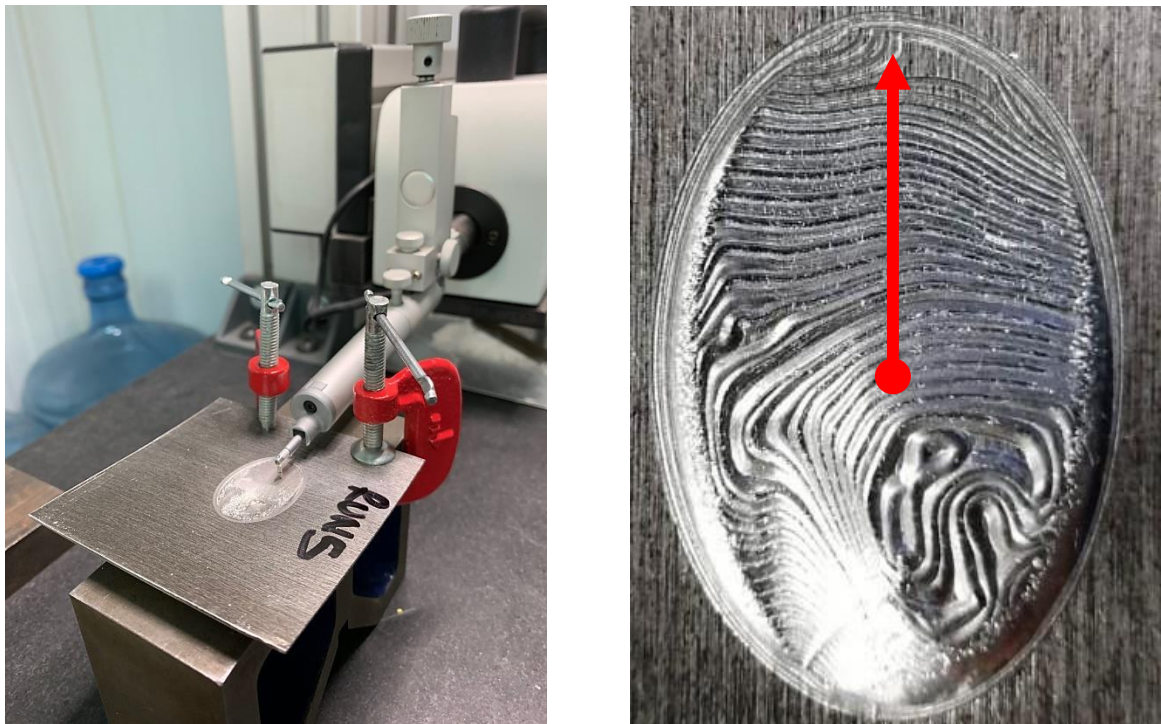


Figura 61 Adquisició de la rugositat

A.4 Força

Per obtenir la càrrega que s'estava aplicant en cada moment sobre la planxa de magnesi durant els experiments s'ha utilitzat la taula Kistler model 9257B. Aquesta taula està collada a la bancada de la màquina CNC amb la qual s'ha fet tot el projecte a través de cargols. A sobre la taula és on col·loquem tot el nostre muntatge, també collat amb cargols.

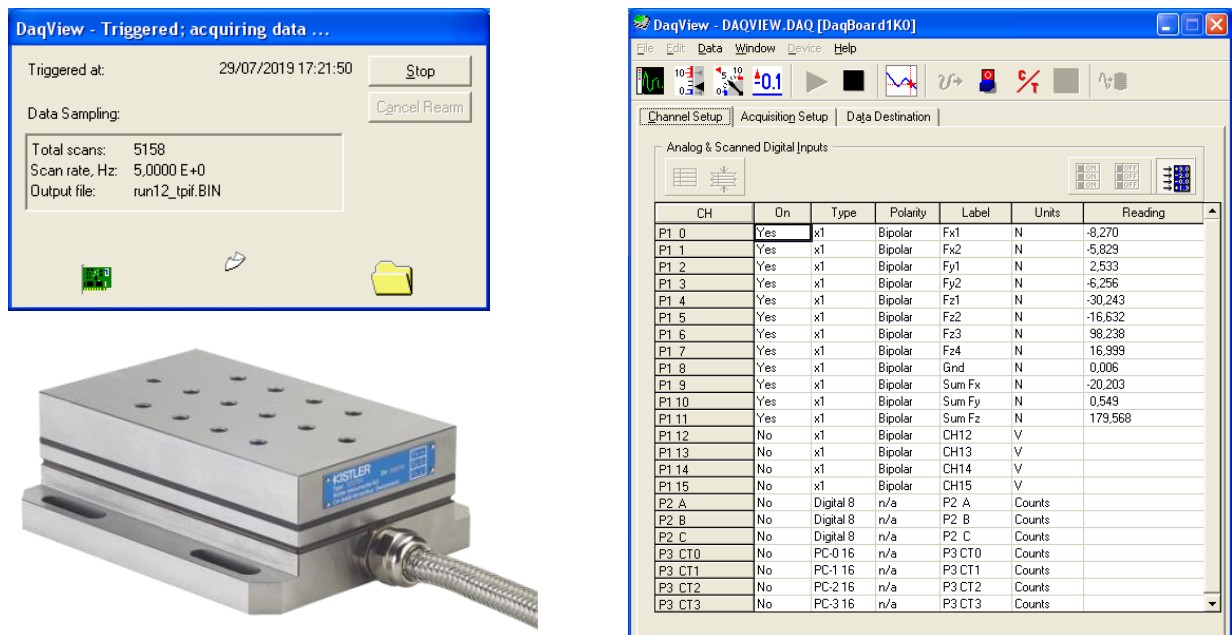


Figura 62 Taula dinamomètrica i software

La taula dinamomètrica està connectada a l'ordinador a través d'una tarja d'adquisició de dades DaqBoard 505 que juntament amb el programa DaqView 9.0.0 permeten obtenir i convertir les dades en formats fàcils per treballar per nosaltres, en forma de taules, amb l'Excel.

Els resultats adquirits es mostren en forma de taula amb una columna per cada canal que té la taula més una columna final on realitza la suma dels 4 canals que mesuren la força en l'eix Z. Aquesta última columna és la que interessa. Les adquisicions han estat amb una freqüència de 5 dades per segons, per tant, a l'hora de voler realitzar l'anàlisi de les dades hem realitzat un filtratge previ per tal d'eliminar possibles interferències i sorolls que no ens interessin. Per realitzar aquest filtre s'ha fet el següent: S'han agafat les dades de cada 2 segons i tot seguit per cada fila de temps s'ha realitzat la mitjana dels 20 valors de força següents. A continuació es pot veure la diferència entre una gràfica no filtrada i una filtrada.

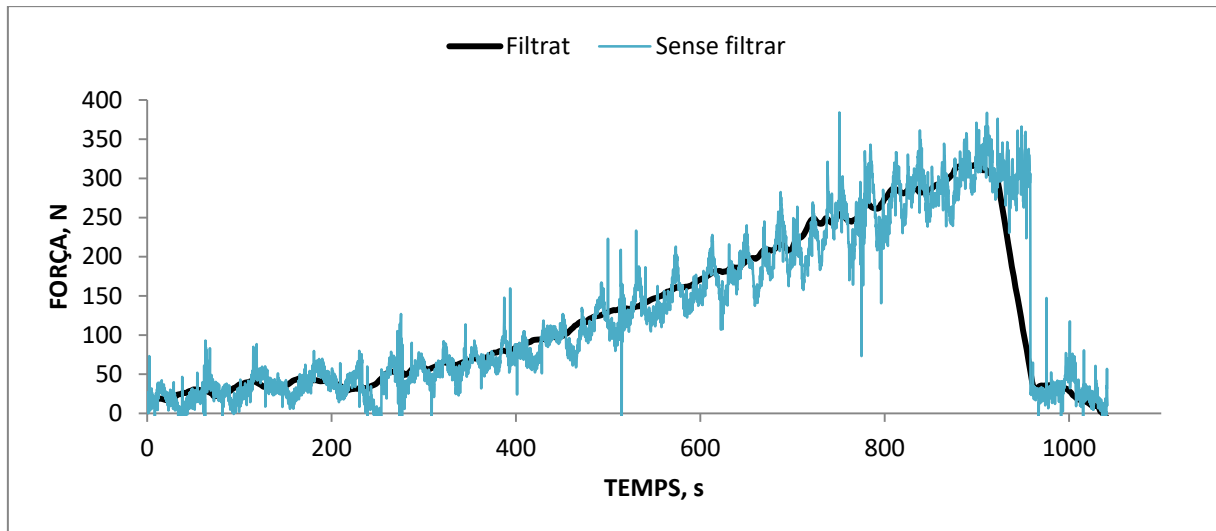


Figura 63 Comparació d'un gràfic sense filtrar i un filtrat

A.5 Temperatura

Les adquisicions de temperatura que s'han realitzat durant els assajos s'han realitzat amb la càmera termogràfica IRBIS ImageIR 3300 que també està connectada a l'ordinador a través d'una tarja d'adquisició i el programa Irbis 3 Professional. El programa ens permet veure en temps real les temperatures però també ens permet enregistrar tot l'assaiig per després exportar totes les dades en formats compatibles amb l'Excel per tal de poder-les tractar. En aquest cas no ens ha fet falta filtrar les dades com en l'apartat anterior ja que hem anat regulant la freqüència d'adquisició a les nostres necessitats.

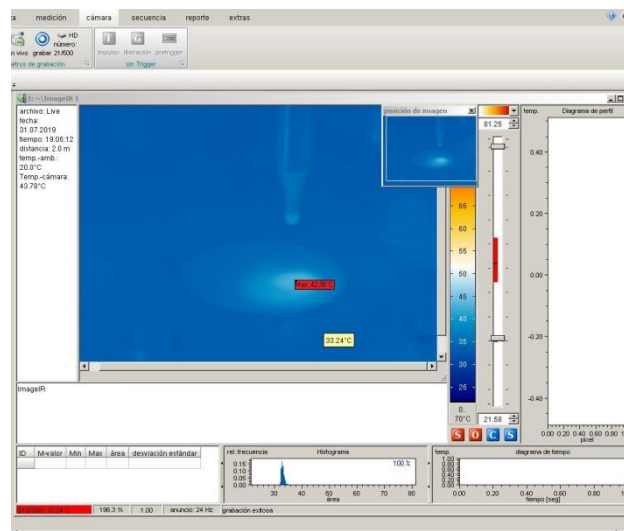


Figura 64 Càmera tèrmica i software

A.6 Anàlisi estadística

Una vegada es tenen totes les dades dels experiments s'han obtingut uns resultats estadístics (gràfic de contorn, gràfics de superfície, anàlisi de la variància, equació del sistema...) amb el programa Minitab v18. A continuació s'explica el procediment utilitzat per aconseguir aquests resultats.

Els nostres resultats s'entren en forma de taula al Minitab, tot seguit realitzem un model d'estudi de regressió lineal. A continuació es defineix com a "resposta" la qual volem aconseguir els resultats (són els outputs que s'han aconseguit al realitzar els experiments: precisió, gruix, rugositat, força i temperatura), es defineix com a "predictors" els nostres tres inputs (velocitat de rotació del capçal, avanç i profunditat de passada) i es crea un model. Aquest model té components lineals, quadràtiques i interaccions, veure Equació 6:

$$\text{Resposta} = a * x_1 + b * x_2 + c * x_3 + x_1 * x_2 + x_1 * x_3 + x_2 * x_3 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \quad (6)$$

On:

- Resposta és la variable que volem obtenir el resultat
- a, b i c són constants multiplicadores
- x_n són els diferents predictors que tenim

De fet, poques vegades obtenim una fórmula amb totes les seves variables ja que un cop s'ha fet el model apareix una taula amb l'anàlisi de la variància (Figura 65) on es fixa amb la columna que, en aquest cas interessa, la columna del Valor-p on a partir dels valors d'aquesta descartem algunes variables. Abans d'explicar com es realitza la selecció de les variables, juntament amb la taula de l'anàlisi de la variància també apareix una taula amb el resum del model (Figura 65) on apareixen unes dades molt importants que també ajuden a descartar o mantenir aquestes variables, els coeficients R^2 : R-cuad, R-cuad (ajustado) i R-cuad (predictivo).

El valor-p determina quines variables són significatives i quines són no significatives ja que els contrast es realitza amb una confiança del 95%. De forma pràctica, si el valor-p d'una variables és inferior a 0,05 aquesta variable és significativa, la tenim en compte, si per contra el valor-p d'una variable és superior a 0,05 aquesta variable és no significativa i no la tenim en compte. El fet de que una variable sigui significativa o no significativa té una conseqüència final a l'equació de regressió. Si és significativa vol dir que una petita oscil·lació d'aquesta variable afecta dràsticament al resultat de la resposta, en canvi si no és significativa, no comporta grans modificacions al resultat final.

Tal i com s'expressa anteriorment, a part del valor-p s'ha de tenir en compte els coeficients R^2 . R-cuad ens permet analitzar el percentatge de variació de la resposta, com més a prop del 100% millor és l'ajustatge. R-cuad (ajustado) és el mateix que l'anterior però amb la diferència que permet té en compte les diferents variables del model, aquest valor és necessari perquè com més variables tenim, més alt tenim el valor de R-cuad indiferentment de les dades. Per últim, R-cuad (predictivo) ens indica el grau d'efectivitat que té el nostre model per predir valors fora del rang de valors del nostre propi model.

Per tant, en aquest treball s'ha intentat aconseguir maximitzar els valor de R-cuad (ajustado) i R-cuad (predictivo) alhora que s'ha intentat aconseguir minimitzar el valor-p.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	9	0,002277	0,000253	5,02	0,045
Avanç, mm/min	1	0,000265	0,000265	5,25	0,071
Vel. Capçal, rpm	1	0,000154	0,000154	3,06	0,140
Prof. Passada, mm	1	0,000000	0,000000	0,00	0,957
Avanç, mm/min*Avanç, mm/min	1	0,000359	0,000359	7,12	0,044
Vel. Capçal, rpm*Vel. Capçal, rpm	1	0,000028	0,000028	0,55	0,493
Prof. Passada, mm*Prof. Passada, mm	1	0,000104	0,000104	2,05	0,211
Avanç, mm/min*Vel. Capçal, rpm	1	0,000000	0,000000	0,00	0,981
Avanç, mm/min*Prof. Passada, mm	1	0,000012	0,000012	0,24	0,642
Vel. Capçal, rpm*Prof. Passada, mm	1	0,000480	0,000480	9,53	0,027
Error	5	0,000252	0,000050		
Total	14	0,002529			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0070991	90,04%	72,10%	18,33%

Figura 65 Captura de pantalla programa Minitab

De forma pràctica a la Figura 66 es pot veure el procés de selecció de les variables en funció del valor-p i els valor de R-cuad. No és més que un conjunt d'iteracions amb l'objectiu d'aconseguir ajustar al màxim la fórmula de regressió.

Cal tenir en compte que a l'hora de descartar les variables que tenen un valor-p superior a 0,05 s'ha de fer de tal manera que no es pot descartar una variable lineal si aquesta variable és significativa en una interacció o en un quadràtic i igualment succeeix si aquesta variable no és significativa en una interacció per sí que ho és en un quadràtic.

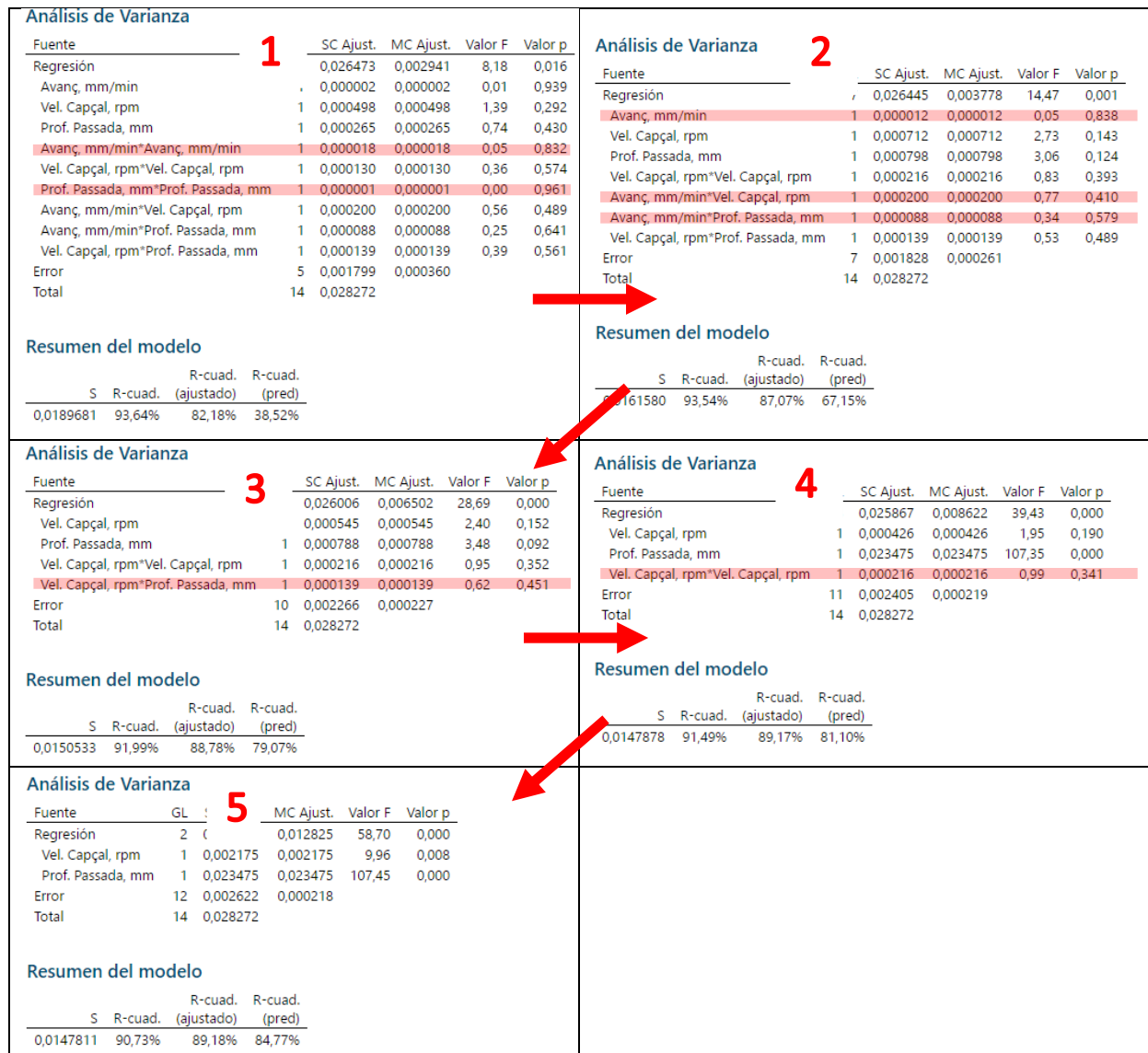


Figura 66 Iteracions anàlisi de variància

El Minitab també ens permet crear superfícies de resposta i gràfics de contorns. Les superfícies de resposta són representacions d'una superfície a l'espai on l'eix vertical correspon a la resposta obtinguda per l'equació de regressió i els dos eixos horitzontals corresponen a les variables que afecten a la resposta. Ja que només tenim dos eixos verticals per representar dues variables, si hi ha més variables aquestes es fixen, normalment a un valor mig.

Els gràfics de contorn no són més que una representació en dues dimensions de la superfície de resposta vista es de sobre. En aquest cas l'eix vertical passa a representar-se en forma de colors i els dos eixos verticals queden representats en forma de X i Y. Igualment si hi ha més de dues variables que afecten al resultat de la resposta es pren un valor mig d'aquestes variables que no es poden representar.

ANNEX B

EXPERIMENTACIÓ SPIF

B.1 Previs

En primer lloc per veure el comportament de les planxes de magnesi AZ31B i per tenir una primera presa de contacte amb els paràmetres que s'han considerat oportuns de bon principi, s'han realitzat diferents experiments.

Taula 19 Experiments previs

Experiment	Prof. Passada, mm	Vel. Capçal, rpm	Avanç, mm/min	Ø eina, mm
0	0,1	2000	300	4
1	0,1	2000	300	4
2	0,1	4000	300	4
3	0,1	4000	300	4
4	0,01	2000	600	4
5	0,03	2000	1000	4

Tal i com es pot veure a les imatges que estan a continuació, els resultats no són els esperats. Tot i que s'han realitzat assajos que no surten en aquest apartat que van tenir un resultat més satisfactori, els paràmetres escollits no eren interessants de cares a la fabricació i per això no s'han tingut en compte.

En les següents imatges es pot veure com totes les pròtesis tenen ruptura de material. Aquesta ruptura sempre es produeix quan l'eina del centre de treball arriba a 3,85 mm de profunditat. Es creu que és degut a què l'eina crea una deformació localitzada massa gran, que la planxa no pot suportar.

També s'hi pot veure com s'hi ha gravat un patró a la part posterior de la planxa, ja que la idea era poder enviar els resultats a la Universitat de Sevilla per tal de que ne poguessin calcular la deformació però, no ha pogut ser degut a la ruptura del material.

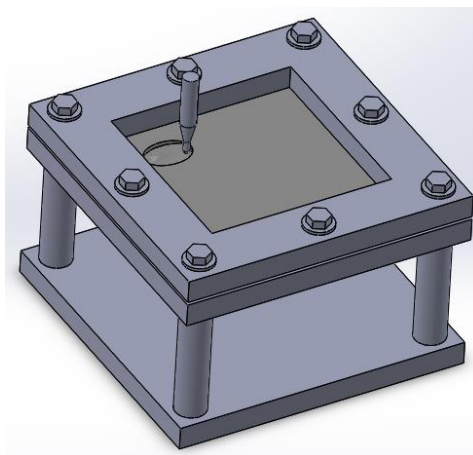


Figura 67 Muntatge experiments previs

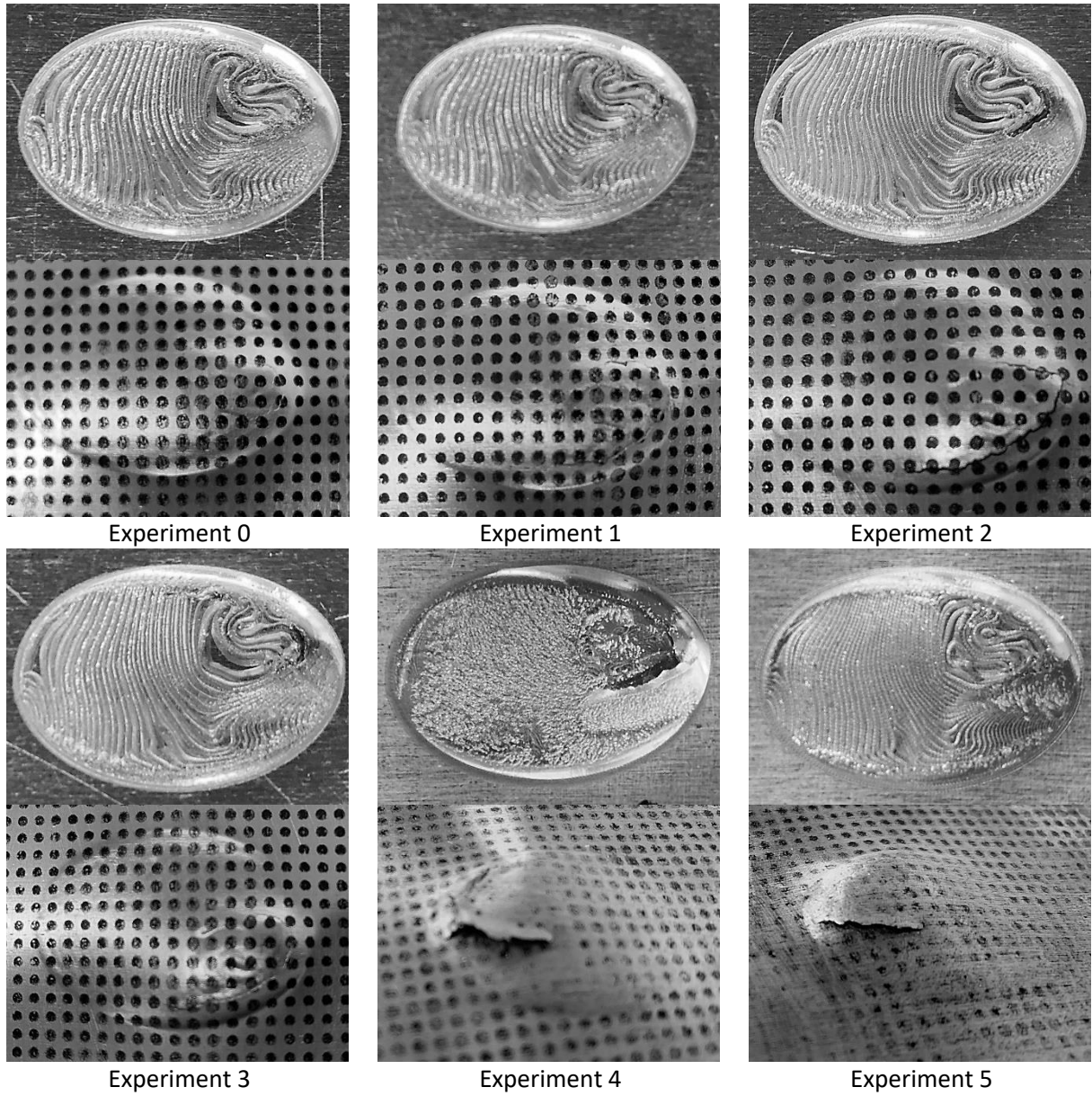


Figura 68 Imatges del dret i revés del resultats dels experiments previs. Es pot comprovar la ruptura

B.2 Primer disseny d'experiments

B.2.1 Disseny d'experiments

Aquest primer disseny d'experiments (Taula 20) ha estat pensat de manera que de les tres variables que tenim per modificar, en fixem dues permanentment. Així doncs, fixem l'avanç i el diàmetre de l'eina a 200 mm/min i 4 mm respectivament. Els valors de les altres variables són deguts als resultats observats en els experiments previs realitzats amb les planxes d'acer inoxidable i alumini. Com que en les proves prèvies al disseny d'experiments es va obtenir com a resultat la ruptura de la planxa i aprofitant que al GREP es disposa d'un forn dissenyat expressament per a ser utilitzat sobre la base d'adquisició Kistler i amb les mateixes especificacions per tal de poder-hi collar la planxa, s'ha optat utilitzar aquest forn. Per tant, la temperatura de de l'assaig estarà influenciada per el forn.

Taula 20 Primer disseny experiments

Experiment	Prof. Passada, mm	Vel. Capçal, rpm	Avanç, mm/min	Ø eina, mm
0	0,03	3000	200	4
1	0,03	4000	200	4
2	0,03	5000	200	4
3	0,04	3000	200	4
4	0,04	4000	200	4
5	0,04	5000	200	4
6	0,05	3000	200	4
7	0,05	4000	200	4
8	0,05	5000	200	4

B.2.2 Muntatge

Seguint amb l'apartat anterior, la planxa es muntarà en el forn i aquest sobre la base d'adquisició de la següent forma:

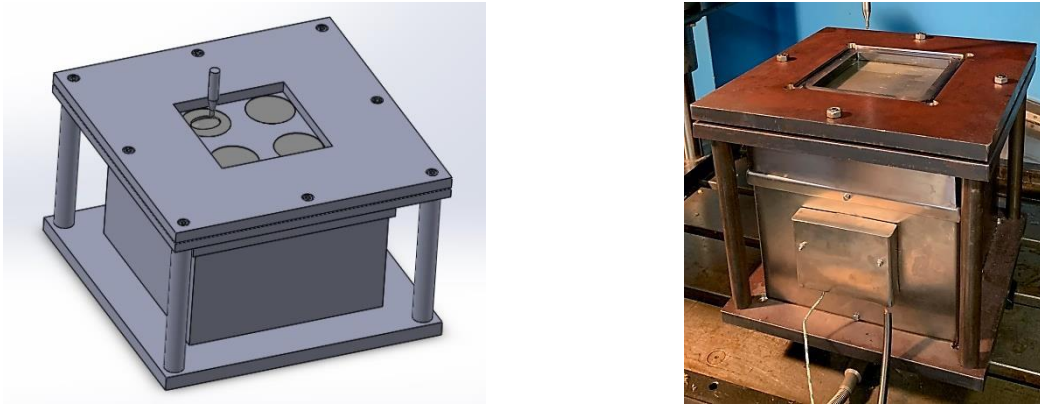


Figura 69 Muntatge del primer disseny d'experiments

B.2.3 Resultats primer disseny experiments

A continuació (Taula 21) es presenten els resultats, en forma de taula, del primer disseny d'experiments.

Taula 21 Resultats del primer disseny experiments

Exp.	Vel. Avanç, mm/min	Vel. Capçal, rpm	Prof. Passada, mm	Ra, μm	Força màx, N	Temp. màx, °C
0	200	3000	0,03	4,773	266,07	82,68
1	200	4000	0,03	4,224	384,65	85,22
2	200	5000	0,03	4,42	410,78	85,16
3	200	3000	0,04	7,085	249,29	85,07
4	200	4000	0,04	7	285,25	85,12
5	200	5000	0,04	6,883	281,12	85,08
6	200	3000	0,05	7,621	261,05	82,21
7	200	4000	0,05	7,43	288,60	85,15
8	200	5000	0,05	7,794	367,59	84,7

B.2.3.1 Imatges

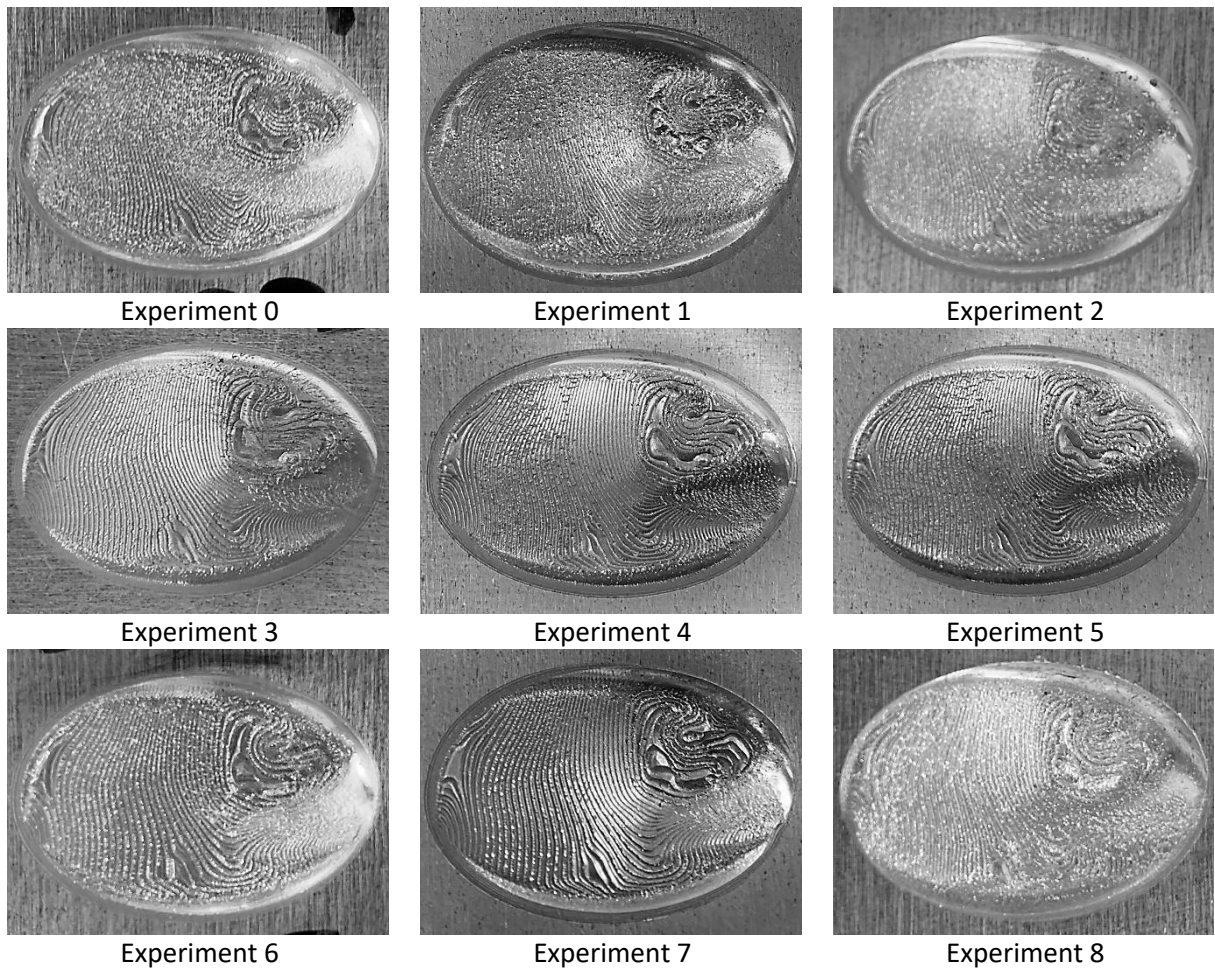


Figura 70 Imatges resultats dels primer disseny d'experiments

B.2.3.2 Força

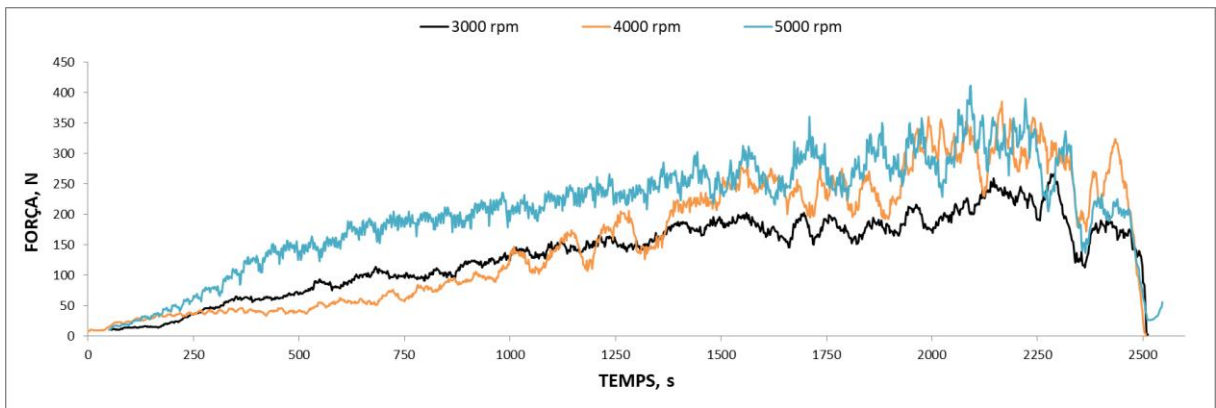


Figura 71 Comparació de força per assajos Δz 0,03 mm i Va 200 mm/min

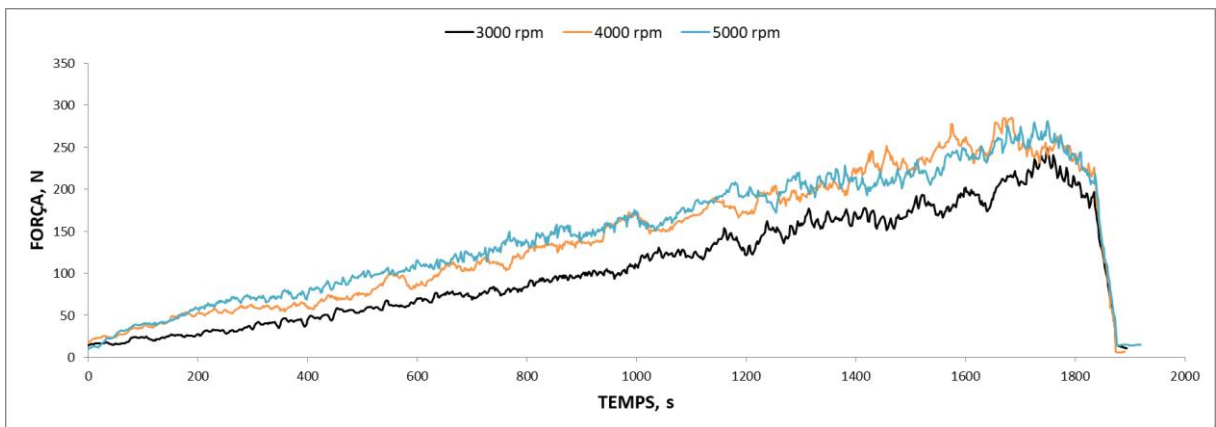


Figura 72 Comparació de força per assajos Δz 0,04 mm i Va 200 mm/min

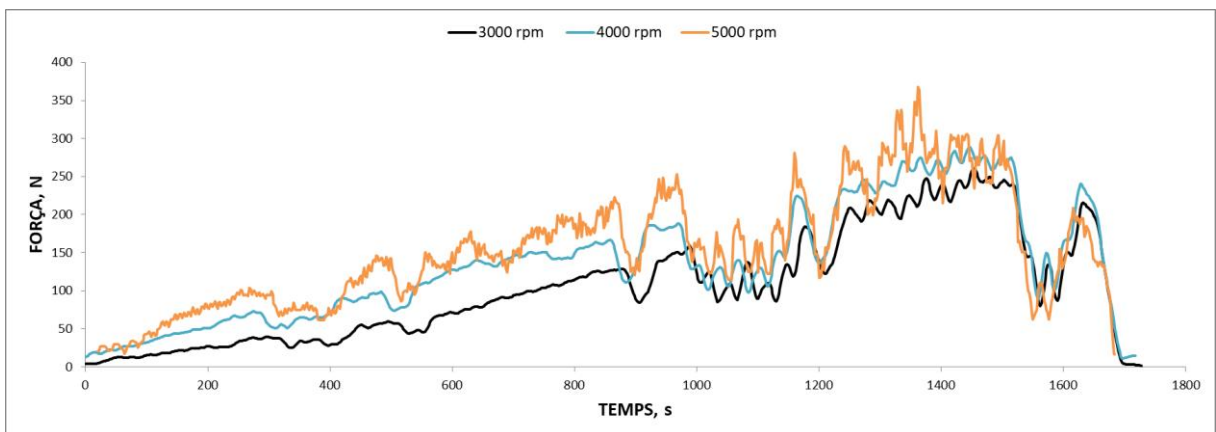


Figura 73 Comparació de força per assajos Δz 0,05 mm i Va 200 mm/min

B.2.3.3 Temperatura:

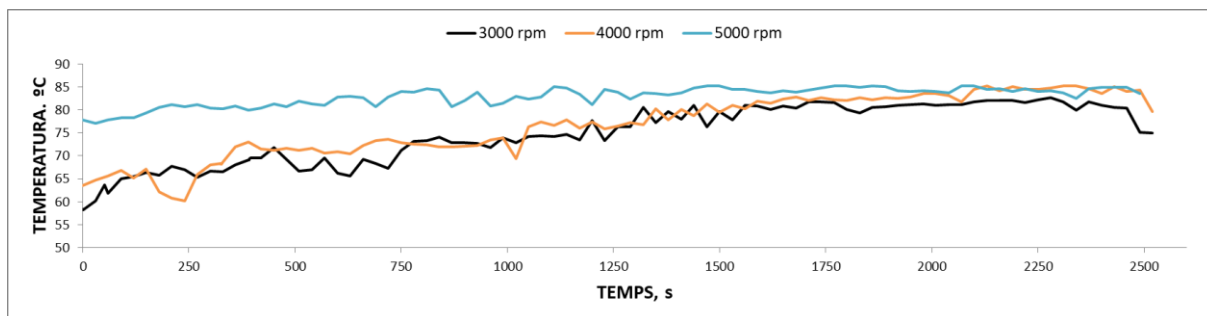


Figura 74 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,03 mm i Va 200 mm/min

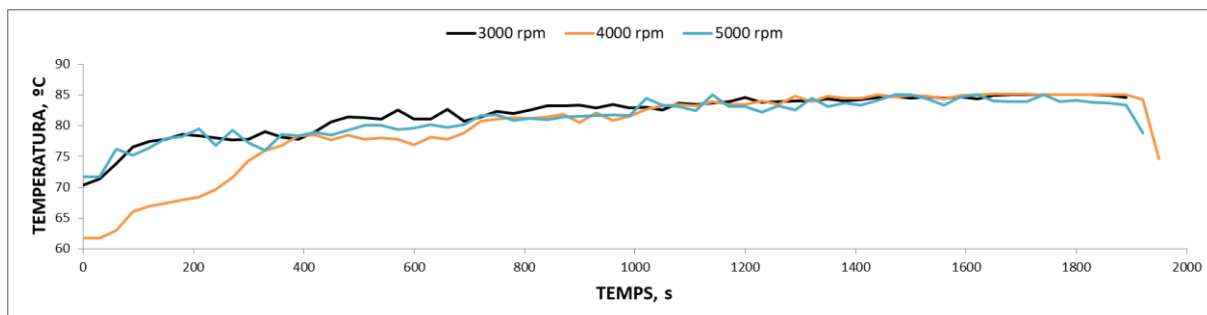


Figura 75 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,04 mm i Va 200 mm/min

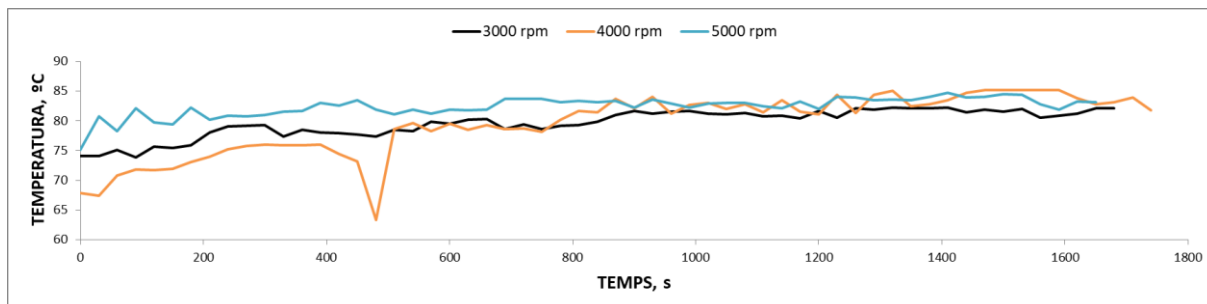


Figura 76 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,05 mm i Va 200 mm/min

B.2.3.4 Comparacions i discussió de resultats:

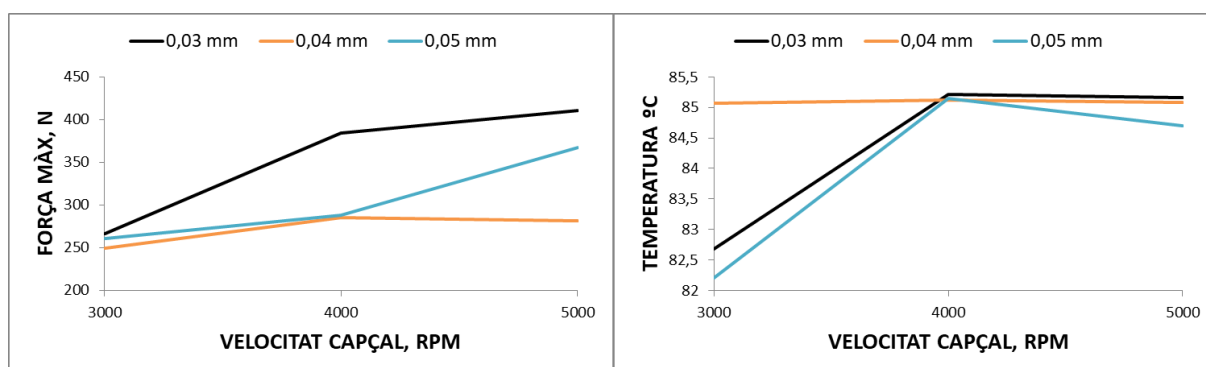


Figura 77 Comparació de força i temperatura en funció de la velocitat del capçal i la Δz . Assajos a Va 200 mm/min

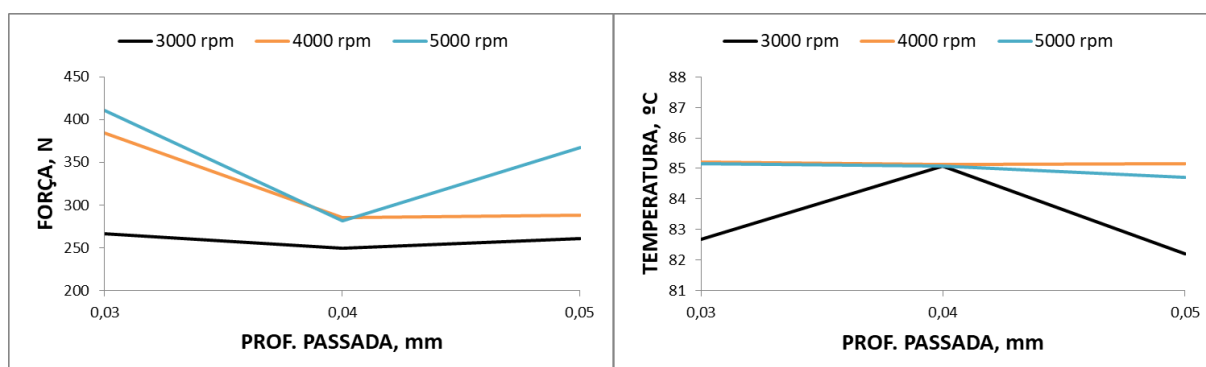


Figura 78 Comparació de força i temperatura en funció de la Δz i la velocitat del capçal. Assajos a Va 200 mm/min

Podem veure com existeix una tendència en els diferents paràmetres. La rugositat disminueix, augmenta la qualitat superficial, a mesura que la velocitat del capçal va augmentant. Això es pot observar tan a les imatges dels diferents experiments (Figura 70) com a la Taula 21. La força augmenta a mida que anem augmentat la velocitat del capçal tal i com es pot veure a la Taula 21 i en les figures que estan a continuació (Figura 71, Figura 72 i Figura 73). Per últim, aquesta tendència en augment també es manté per la temperatura, com més velocitat tenim del capçal, més temperatura. Ho podem comprovar a la Taula 21 i en les figures següents (Figura 74, Figura 75 i Figura 76).

En alguns experiments, en augmentar la velocitat del capçal també fem que augmenti la temperatura que, en conseqüència, fa augmentar la capacitat de deformació del magnesi i ens permet obtenir una superfície més llisa. En altres experiments però, no es compleix aquesta tendència.

Els resultats de la força, en canvi, no són els que esperàvem. Crèiem que al augmentar la velocitat de rotació del capçal i la temperatura, ens seria més fàcil poder deformar la planxa de magnesi i no ha

sigut així. Creiem que al ser la zona de deformació molt petita i el rang de variació dels paràmetres bastant reduït, no ens permet veure amb claredat aquest resultat.

Els resultats de la temperatura també són els esperats ja que al augmentar la velocitat de rotació del capçal, el que fem és augmentar la fricció entre l'eina i la planxa de magnesi causant l'augment de la temperatura.

Potser no hi ha prou sensibilitat del sistema per adquirir la força i la variació de la profunditat de la passada no és prou significativa sumat a que la geometria és molt petita, per a obtenir uns resultats més clars.

B.3 Segon disseny d'experiments

B.3.1 Disseny d'experiments

El segon disseny d'experiments s'ha decidit de realitzar-lo per veure si realment el fet de que els experiments es fessin amb la planxa de magnesi dins el forn, i aquest en funcionament era realment una condició que ajudava a obtenir millors resultats i evitar que la planxa es trenqués quan es deformava la part més profunda de la pròtesis o el forn només ajudava a canviar la microestructura interna del magnesi realitzant el procés d'escalfament.

Així doncs per realitzar aquest disseny d'experiments el que s'ha fet ha estat escalfar la planxa de magnesi durant 90 minuts al forn i després deixar-la refredar, també dins al forn, fins arribar a la temperatura ambient, veure Figura 79.

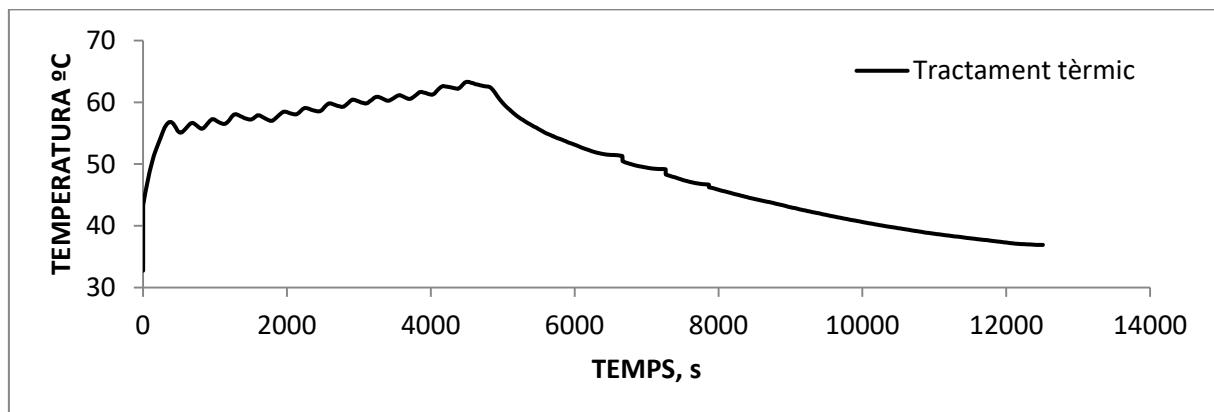


Figura 79 Tractament tèrmic

Ja que es realitza un segon disseny d'experiments i a la vista que el primer disseny d'experiments ha estat un èxit en temes de ruptura del material, s'ha decidit canviar els paràmetres per buscar més variables i intentar obtenir més dades de cares a poder-les estudiar mitjançant un estudi estadístic.

Aquest segon disseny d'experiments s'ha realitzat a partir del mètode de disseny central compost, veure Figura 80, amb un factor $\alpha=1,5$. El rang de valors per la velocitat de rotació del capçal ha estat de [3.333 a 6.666] rpm, el rang per la profunditat de passada de [0,275 a 0,775] mm i el rang per la velocitat d'avanç de [520 a 200] mm/min. Aquests valors s'han codificat amb [1, 0, -1] i tot seguit se'ls hi ha aplicat el factor α per tal d'aconseguir el disseny d'experiments que es pot veure a la Figura 80 i la Taula 22. Cal donar importància al fet de que aquest cop no hi ha cap paràmetre que es deixi fixa com en el primer disseny d'experiments, sinó que tots tenen un rang de valors i, a més, major.

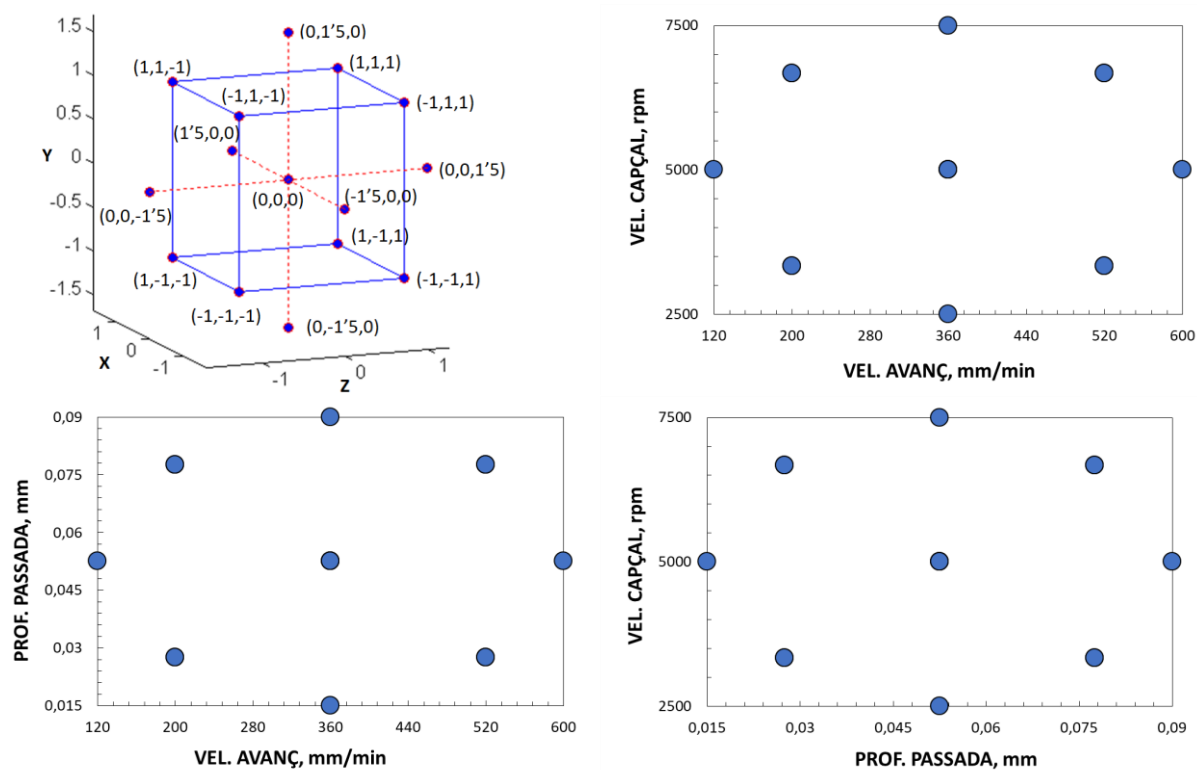


Figura 80 Gràfics disseny d'experiment central compost

Taula 22 Segon disseny d'experiments

Experiment	Prof. Passada (Δz), mm	Vel. Capçal (N), rpm	Avanç (V_a), mm/min	\varnothing eina, mm
0	0,0275	3333	200	4
1	0,0775	3333	200	4
2	0,0275	6667	200	4
3	0,0775	6667	200	4
4	0,0275	3333	520	4
5	0,0775	3333	520	4
6	0,0275	6667	520	4
7	0,0775	6667	520	4
8	0,0525	5000	120	4
9	0,0525	5000	600	4
10	0,0525	2500	360	4
11	0,0525	7500	360	4
12	0,015	5000	360	4
13	0,09	5000	360	4
14	0,0525	5000	360	4

B.3.2 Muntatge

En aquest cas com que no es necessita que la planxa estigui amb temperatura durant l'experiment, no s'ha utilitzat el forn com a suport de la planxa. S'ha utilitzat el muntatge següent (Figura 81):

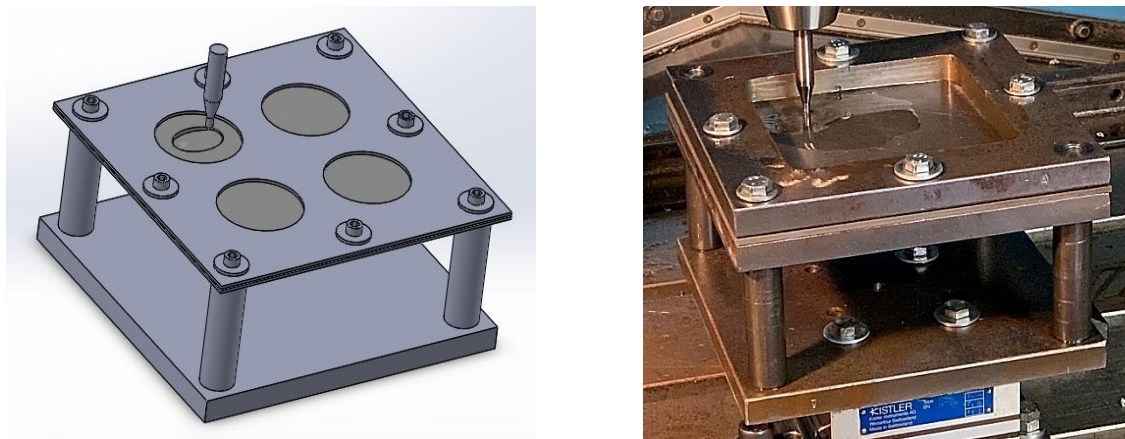


Figura 81 Muntatge del segon disseny d'experiments

B.3.3 Resultats segon disseny experiments

Taula 23 Resultats segons disseny d'experiments

Exp.	Va, mm/min	N, rpm	Δz , mm	Precisió	Gruix mínim, mm	Ra, μm	F. màx, N	T. màx, $^{\circ}\text{C}$
0	200	3333	0,0275	0,0298	0,7767	6,044	228,64	66,45
1	200	3333	0,0775	0,0315	0,86	12,384	256,51	69,15
2	200	6667	0,0275	0,0618	0,7267	4,764	312,86	82,04
3	200	6667	0,0775	0,0282	0,82	13,071	317,49	81,56
4	520	3333	0,0275	0,0244	0,79	4,371	212,91	54,95
5	520	3333	0,0775	0,0168	0,8533	10,483	207,43	55,8
6	520	6667	0,0275	0,0519	0,7533	4,763	284,74	73,86
7	520	6667	0,0775	0,0176	0,84	11,278	212,31	79,97
8	120	5000	0,0525	0,0456	0,8133	8,240	237,10	80,58
9	600	5000	0,0525	0,0363	0,8067	7,740	191,03	64,64
10	360	2500	0,0525	0,0164	0,8333	8,433	210,41	48,61
11	360	7500	0,0525	0,0190	0,8167	9,028	293,01	82,89
12	360	5000	0,015	0,0367	0,7433	4,191	309,2085	55,13
13	360	5000	0,09	0,0283	0,8867	11,891	335,1255	71,03
14	360	5000	0,0525	0,0225	0,79	8,634	313,811	66,39

On (Exp.) és el número d'experiment, (Va) és la velocitat d'avanç, (N) és la velocitat del capçal, (Δz) és la profunditat de cada passada, (Ra) és la rugositat, (F. màx) és la força màxima i (T. màx) és la temperatura màxima.

B.3.3.1 Imatges

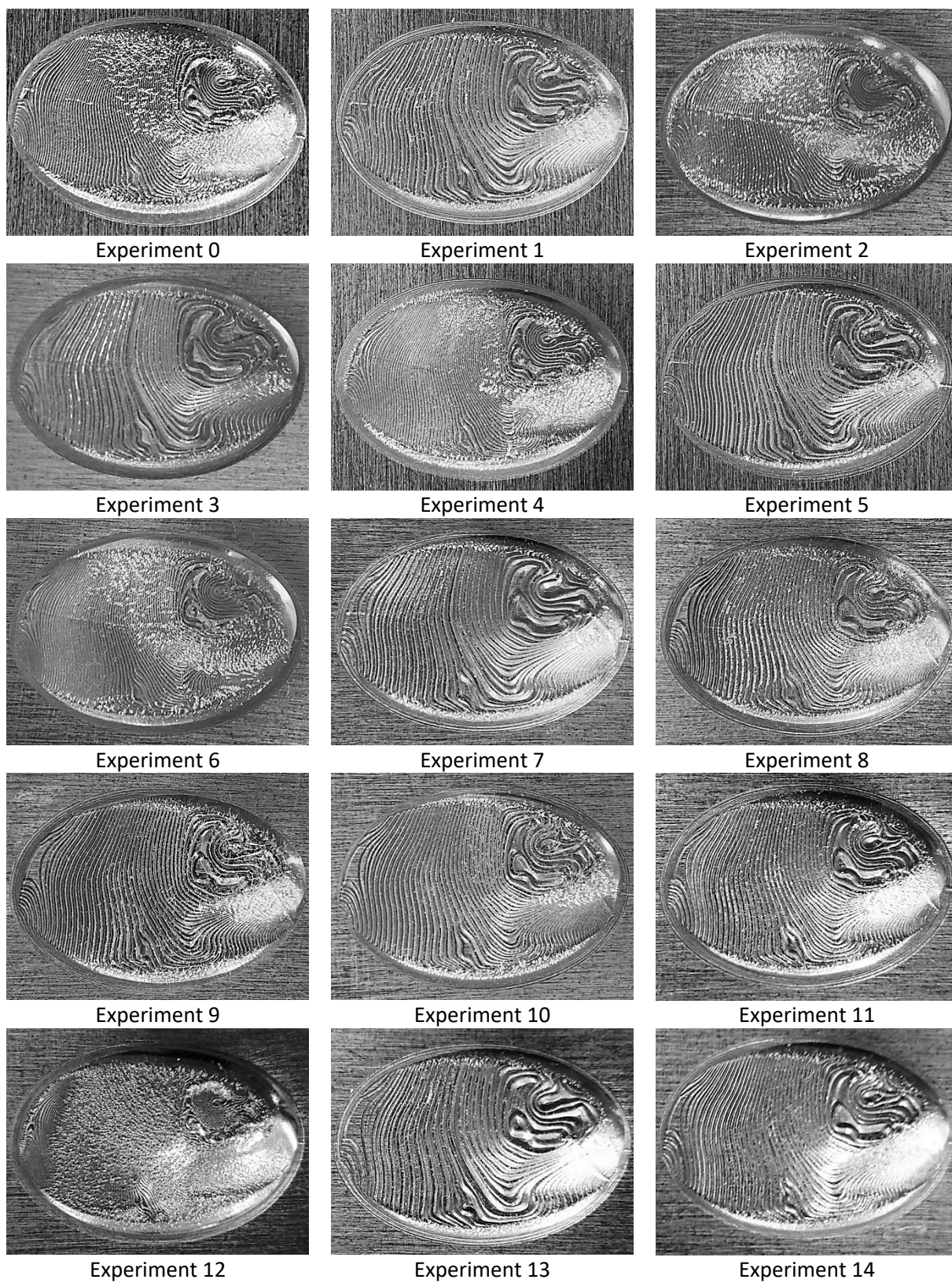
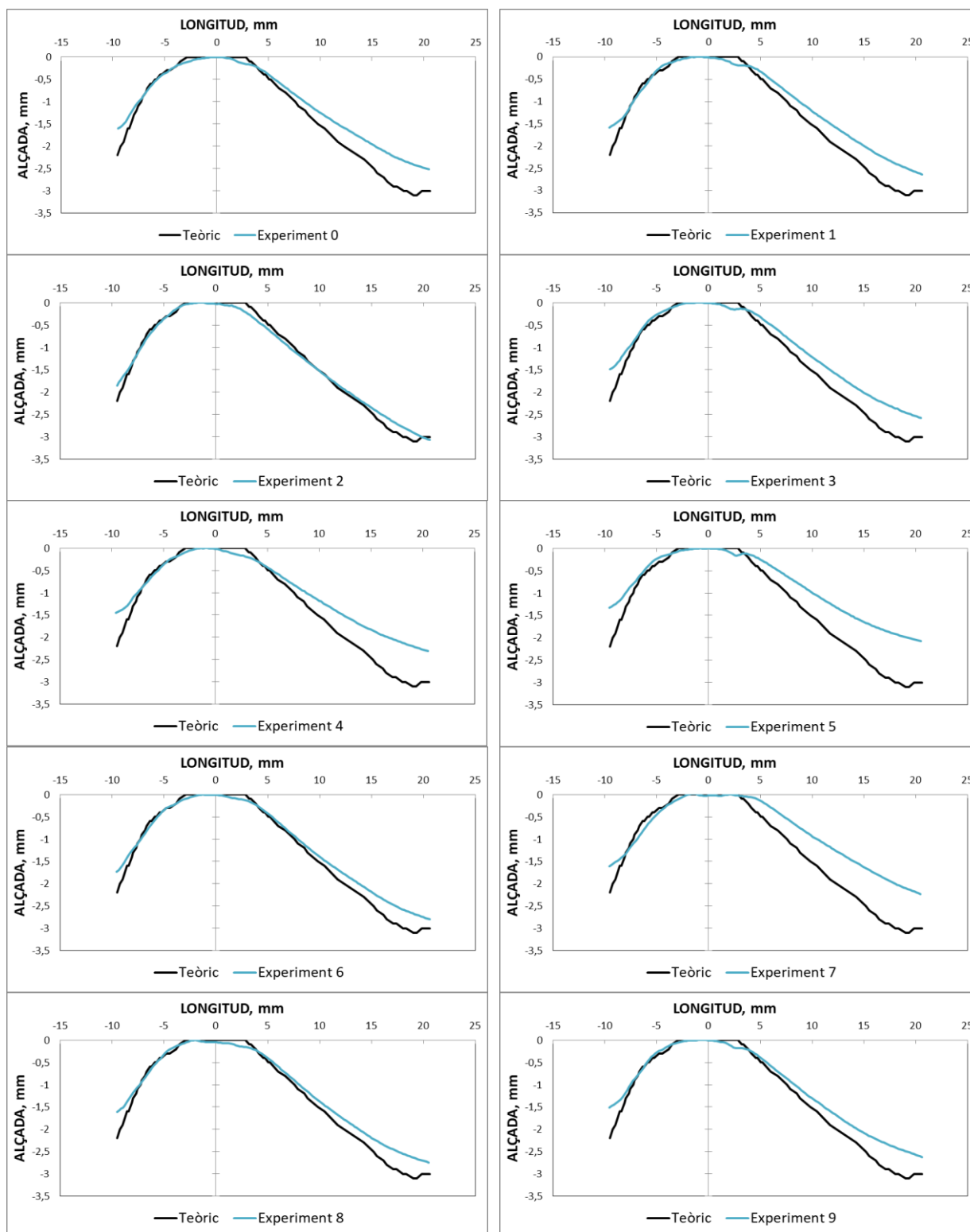


Figura 82 Imatges resultants del segon disseny d'experiments

B.3.3.2 Precisió



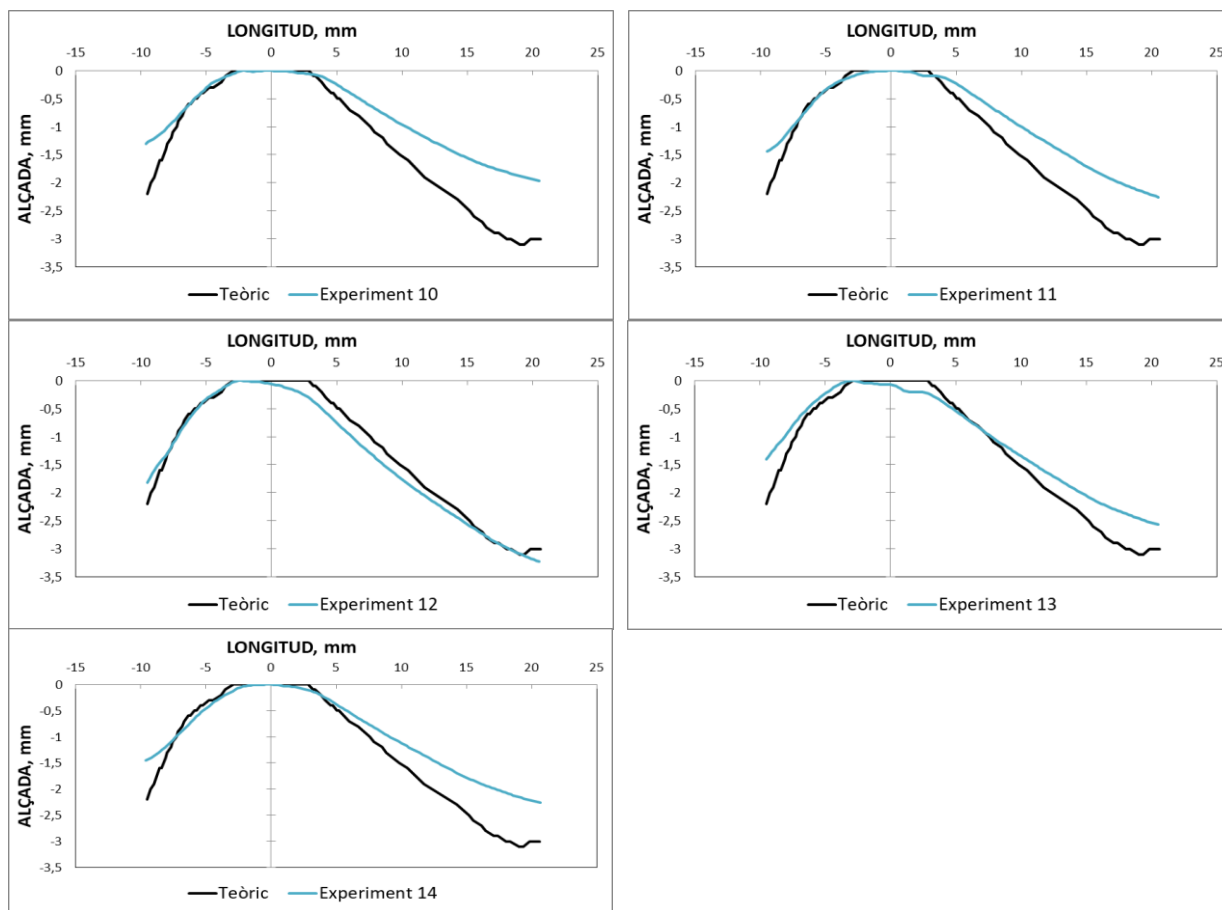


Figura 83 Corbes de geometria

Taula 24 Anàlisi de variància de la precisió

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	6	0,002237	0,000373	10,22	0,002
Avanç, mm/min	1	0,000686	0,000686	18,80	0,002
Vel. Capçal, rpm	1	0,000709	0,000709	19,43	0,002
Prof. Passada, mm	1	0,000010	0,000010	0,28	0,611
Avanç, mm/min*Avanç, mm/min	1	0,000576	0,000576	15,78	0,004
Prof. Passada, mm*Prof. Passada, mm	1	0,000200	0,000200	5,47	0,047
Vel. Capçal, rpm*Prof. Passada, mm	1	0,000480	0,000480	13,16	0,007
Error	8	0,000292	0,000036		
Total	14	0,002529			

Taula 25 Resum del model de la precisió

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0060404	88,46%	79,80%	55,92%

Equació de regressió

$$\begin{aligned} \text{Precisió} = & 0,0496 - 0,000283 \text{ Avanç, mm/min} + 0,000013 \text{ Vel. Capçal, rpm} \\ & - 0,247 \text{ Prof. Passada, mm} + 0,000000 \text{ Avanç, mm/min} * \text{Avanç, mm/min} \\ & + 8,58 \text{ Prof. Passada, mm} * \text{Prof. Passada, mm} \\ & - 0,000186 \text{ Vel. Capçal, rpm} * \text{Prof. Passada, mm} \end{aligned}$$

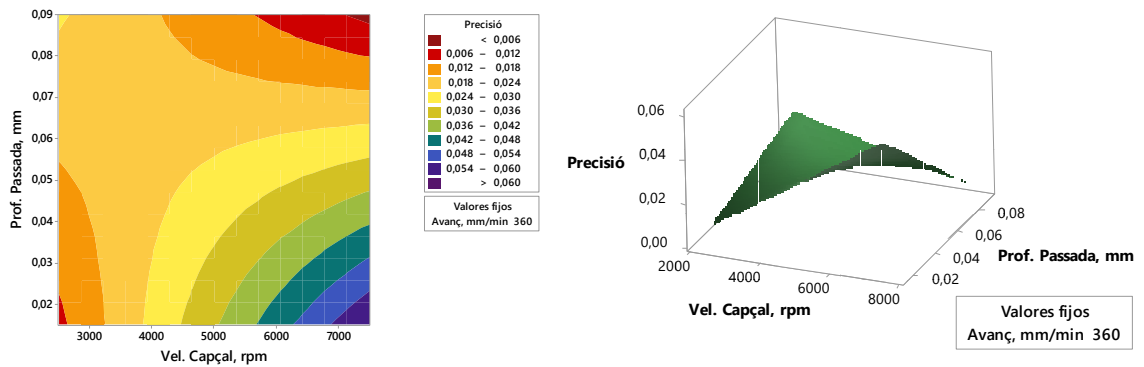


Figura 84 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i la velocitat de rotació del capçal per la precisió

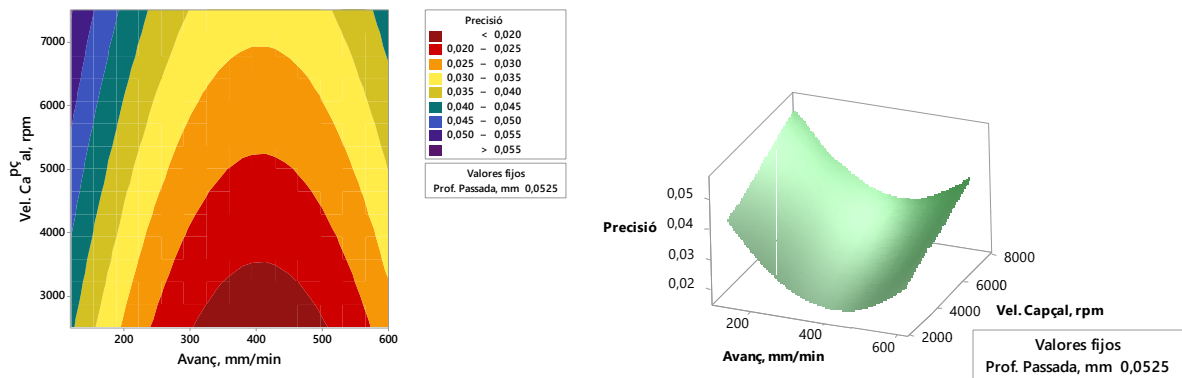


Figura 85 Gràfics de contorn i superfície entre l'avanç i la velocitat de rotació del capçal per la precisió

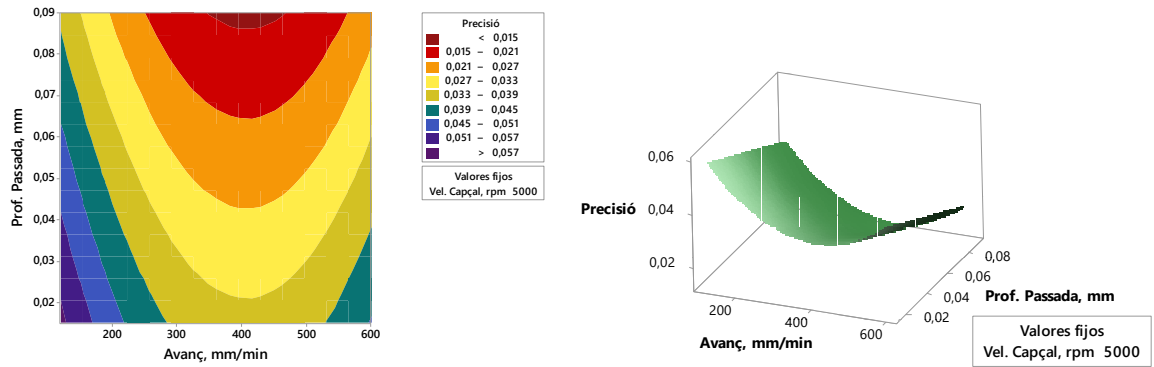
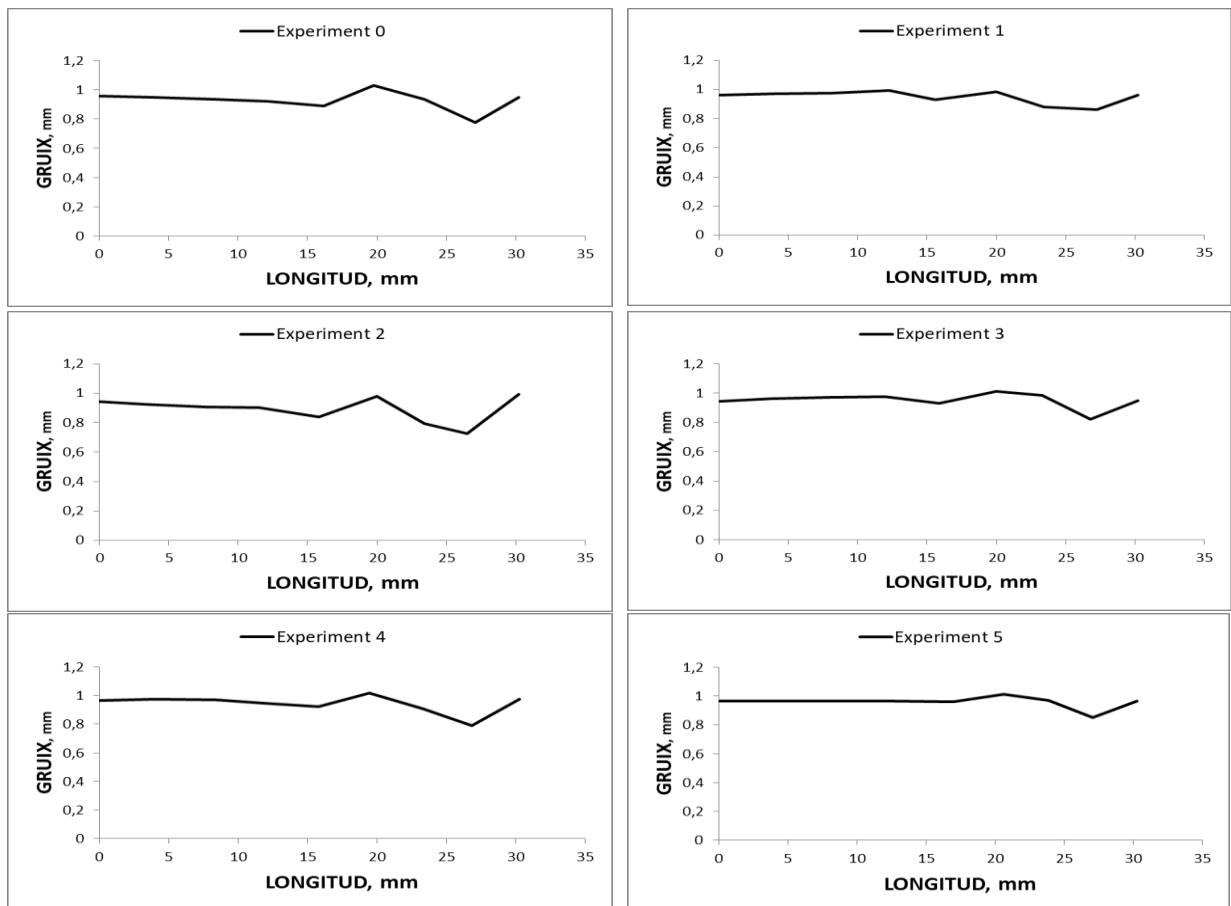


Figura 86 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i l'avanç per la precisió

B.3.3.3 Gruix



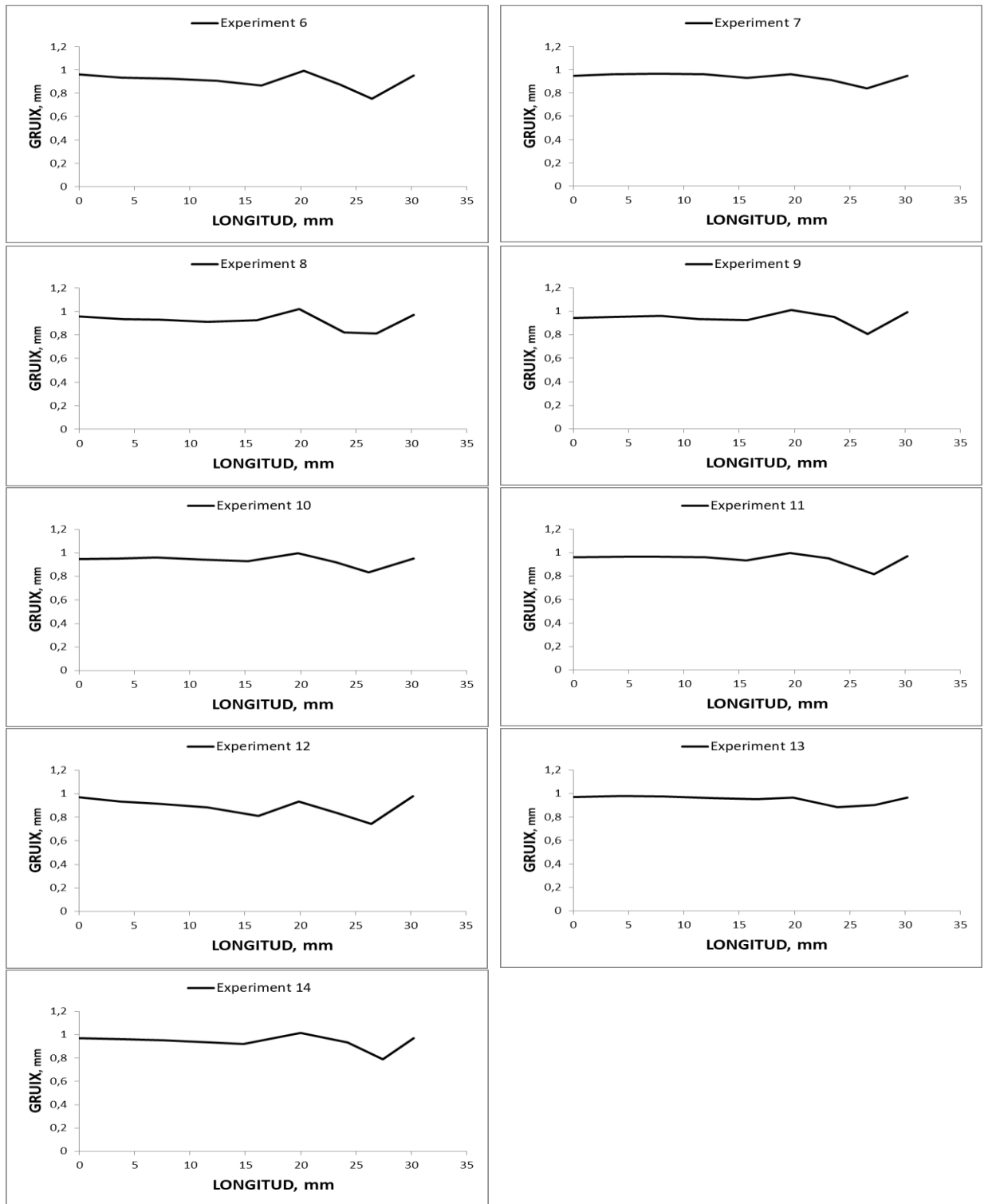


Figura 87 Gràfics del gruix de la pròtesi

Taula 26 Anàlisi de variància del gruix

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	3	0,025867	0,008622	39,43	0,000
Vel. Capçal, rpm	1	0,000426	0,000426	1,95	0,190
Prof. Passada, mm	1	0,023475	0,023475	107,35	0,000
Vel. Capçal, rpm*Vel. Capçal, rpm	1	0,000216	0,000216	0,99	0,341
Error	11	0,002405	0,000219		
Total	14	0,028272			

Taula 27 Resum del model del gruix

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0147811	90,73%	89,18%	84,77%

Equació de regressió

$$\text{Gruix, mm} = 0,7559 - 0,000008 \text{ Vel. Capçal, rpm} + 1,733 \text{ Prof. Passada, mm}$$

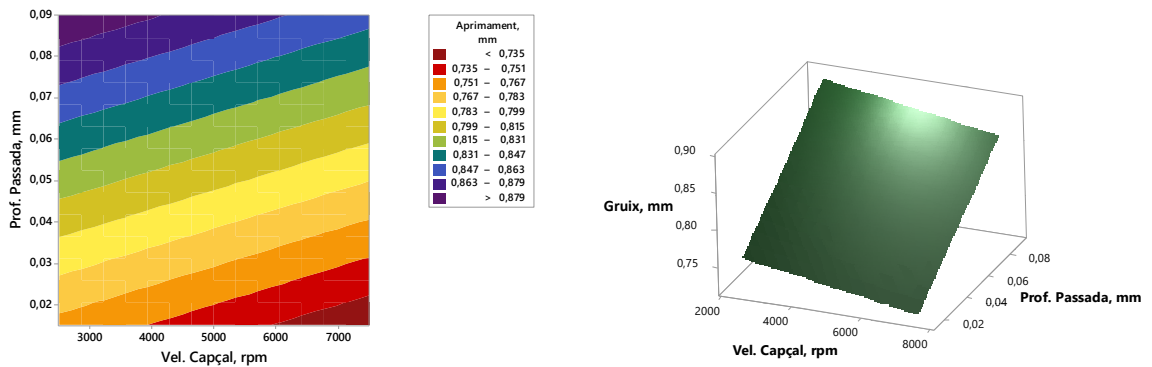


Figura 88 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i la velocitat de rotació del capçal pel gruix

B.3.3.4 Rugositat

Experiment	Avanç, mm/min	Vel. Capçal, rpm	Prof. passada, mm	Ra, µm
0	200	3333	0,0275	6,044
1	200	3333	0,0775	12,384
2	200	6667	0,0275	4,764
3	200	6667	0,0775	13,071
4	520	3333	0,0275	4,371
5	520	3333	0,0775	10,483
6	520	6667	0,0275	4,763
7	520	6667	0,0775	11,278
8	120	5000	0,0525	8,240
9	600	5000	0,0525	7,740
10	360	2500	0,0525	8,433
11	360	7500	0,0525	9,028
12	360	5000	0,015	4,191
13	360	5000	0,09	11,891
14	360	5000	0,0525	8,634

Taula 28 Anàlisi de variància de la rugositat

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	2	123,579	61,789	128,99	0,000
Avanç, mm/min	1	2,994	2,994	6,25	0,028
Prof. Passada, mm	1	120,584	120,584	251,72	0,000
Error	12	5,748	0,479		
Total	14	129,327			

Taula 29 Resum del model de la rugositat

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,692122	95,56%	94,81%	92,63%

Equació de regressió

$$Ra, \mu m = 2,933 - 0,00306 \text{ Avanç, mm/min} + 124,24 \text{ Prof. Passada, mm}$$

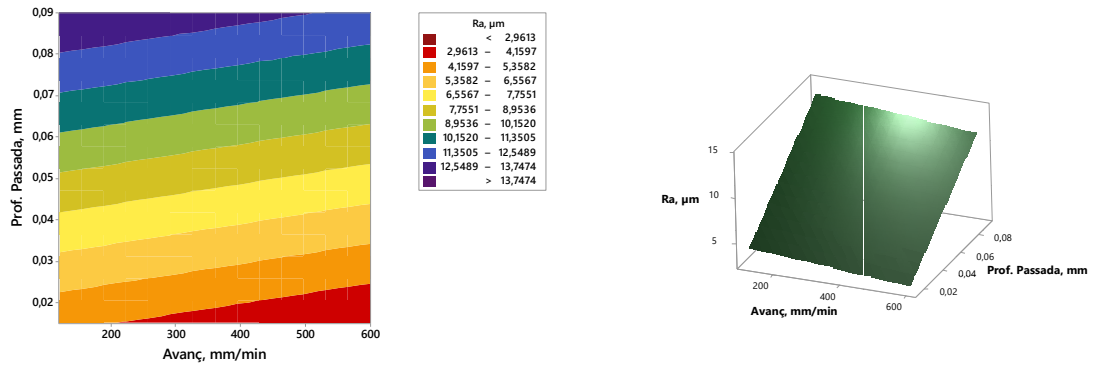
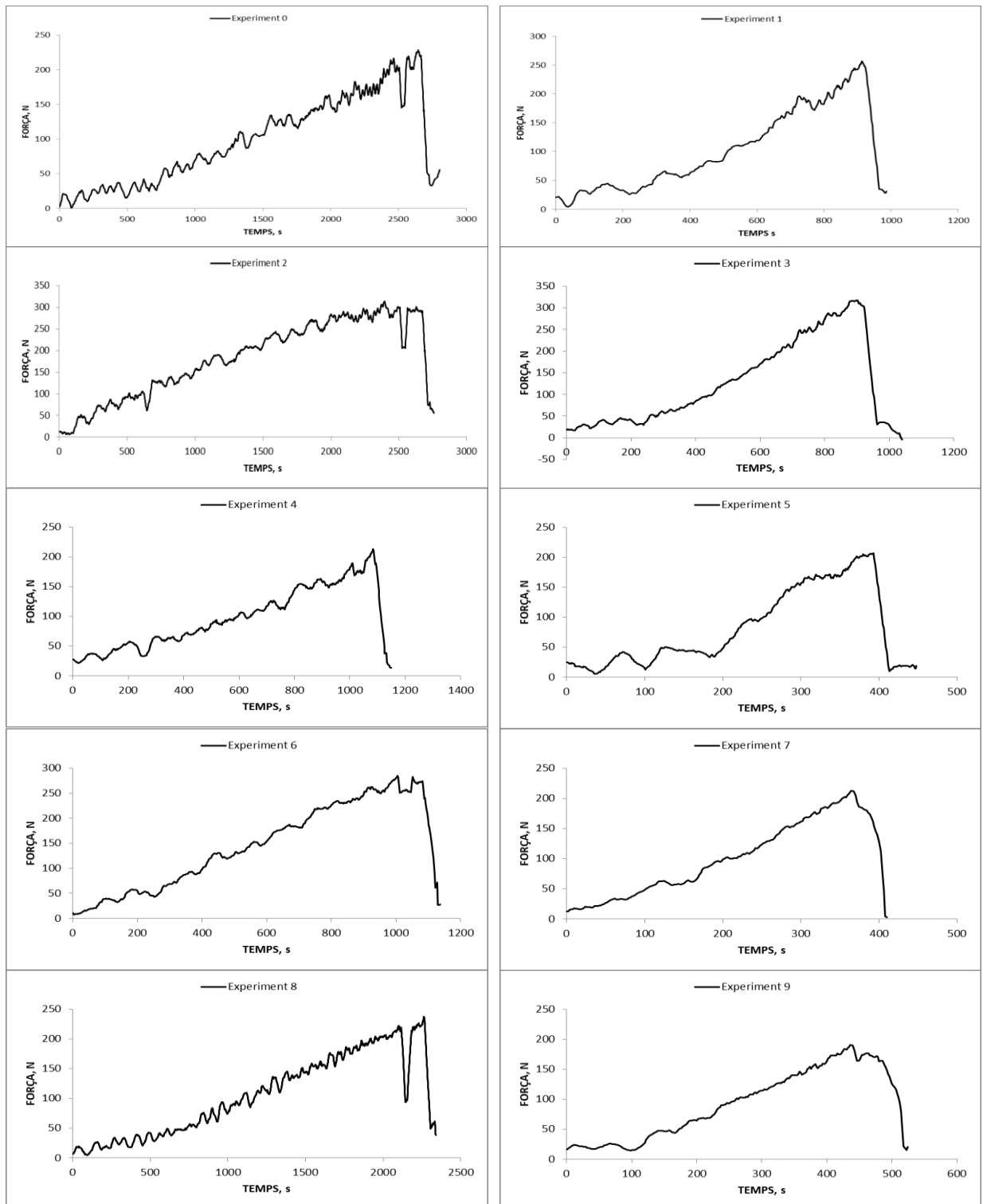


Figura 89 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i l'avanç per la rugositat

B.3.3.5 Força



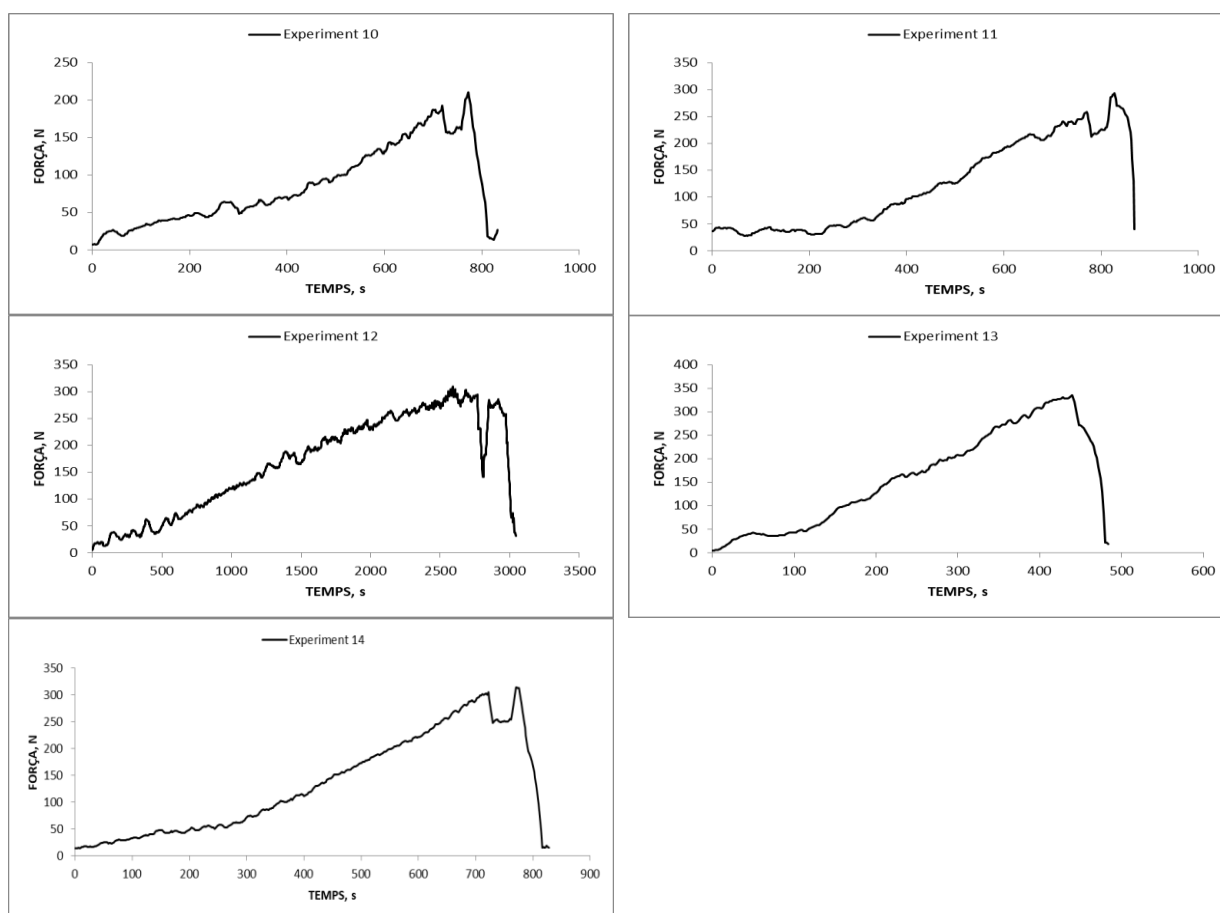


Figura 90 Gràfics de la força

Taula 30 Anàlisi de variància de la força màxima

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	4	30044	7511,1	16,07	0,000
Avanç, mm/min	1	10358	10357,8	22,16	0,001
Vel. Capçal, rpm	1	6904	6903,9	14,77	0,003
Avanç, mm/min*Avanç, mm/min	1	13383	13383,0	28,63	0,000
Vel. Capçal, rpm*Vel. Capçal, rpm	1	5123	5122,7	10,96	0,008
Error	10	4674	467,4		
Total	14	34718			

Taula 31 Resum del model de la força màxima

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
21,6196	86,54%	81,15%	72,99%

Equació de regressió

$$\begin{aligned} \text{Força màxima, N} = & -180,7 + 1,101 \text{ Avanç, mm/min} + 0,1143 \text{ Vel. Capçal, rpm} \\ & - 0,001714 \text{ Avanç, mm/min} * \text{Avanç, mm/min} \\ & - 0,000010 \text{ Vel. Capçal, rpm} * \text{Vel. Capçal, rpm} \end{aligned}$$

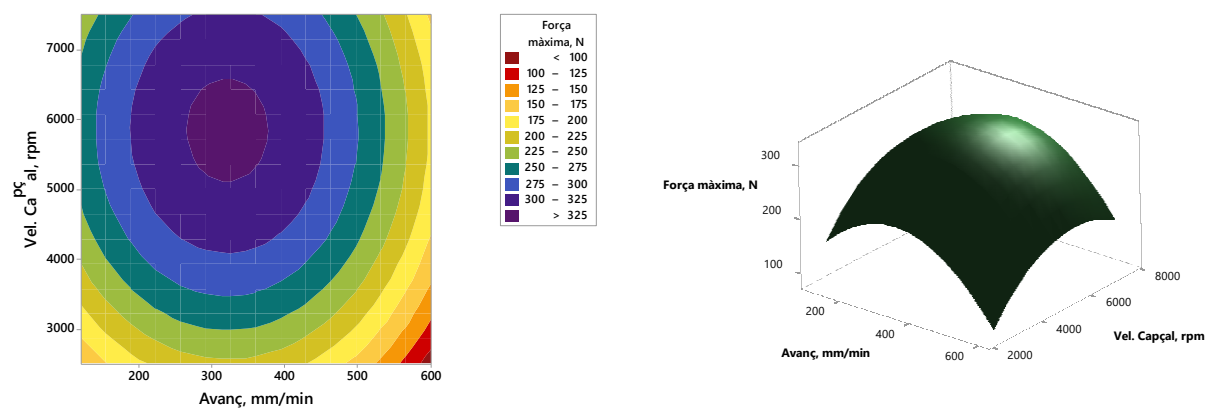
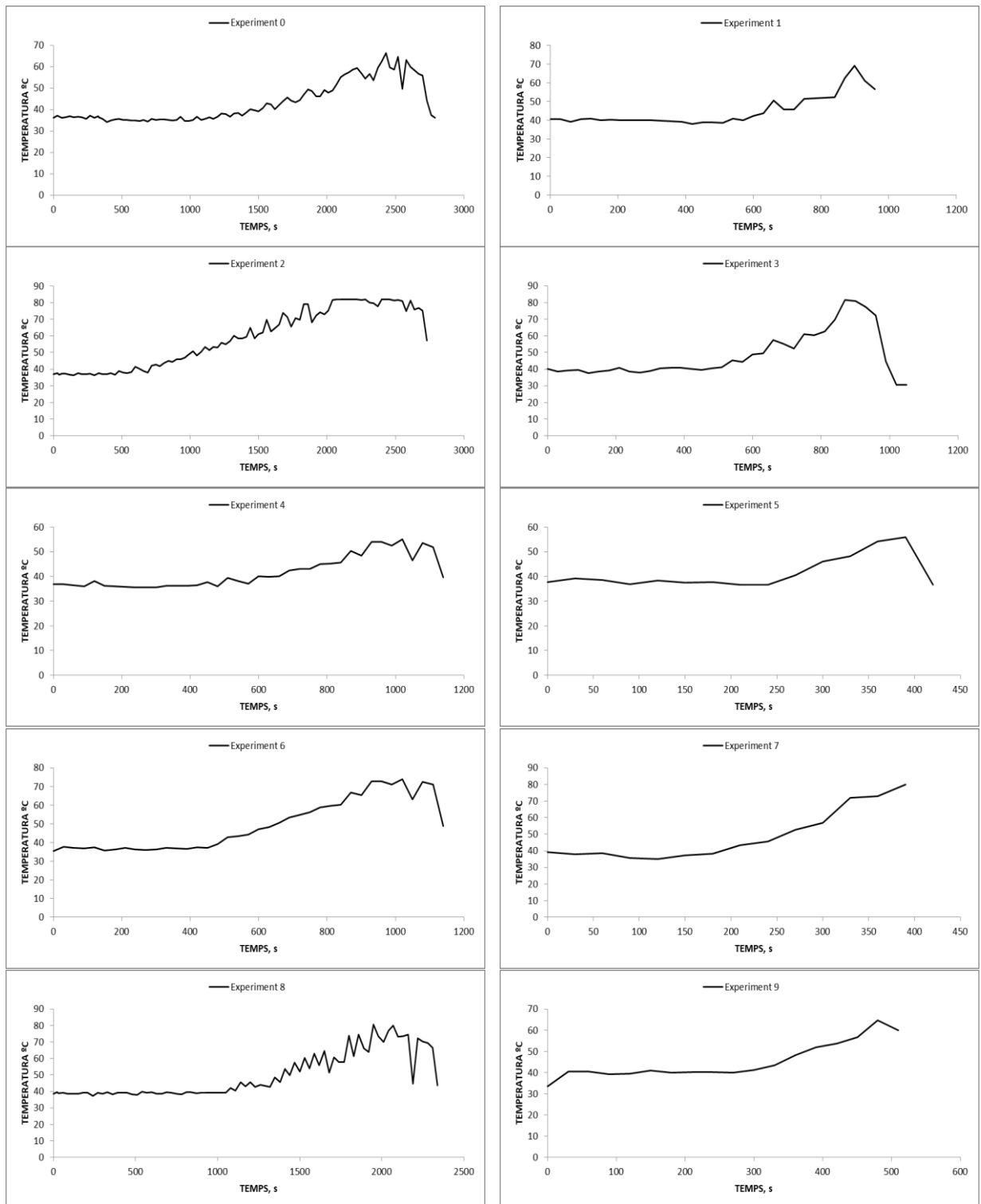


Figura 91 Gràfics de contorn i superfície entre l'avanç i la velocitat de rotació del capçal per la força màxima

B.3.3.5 Temperatura



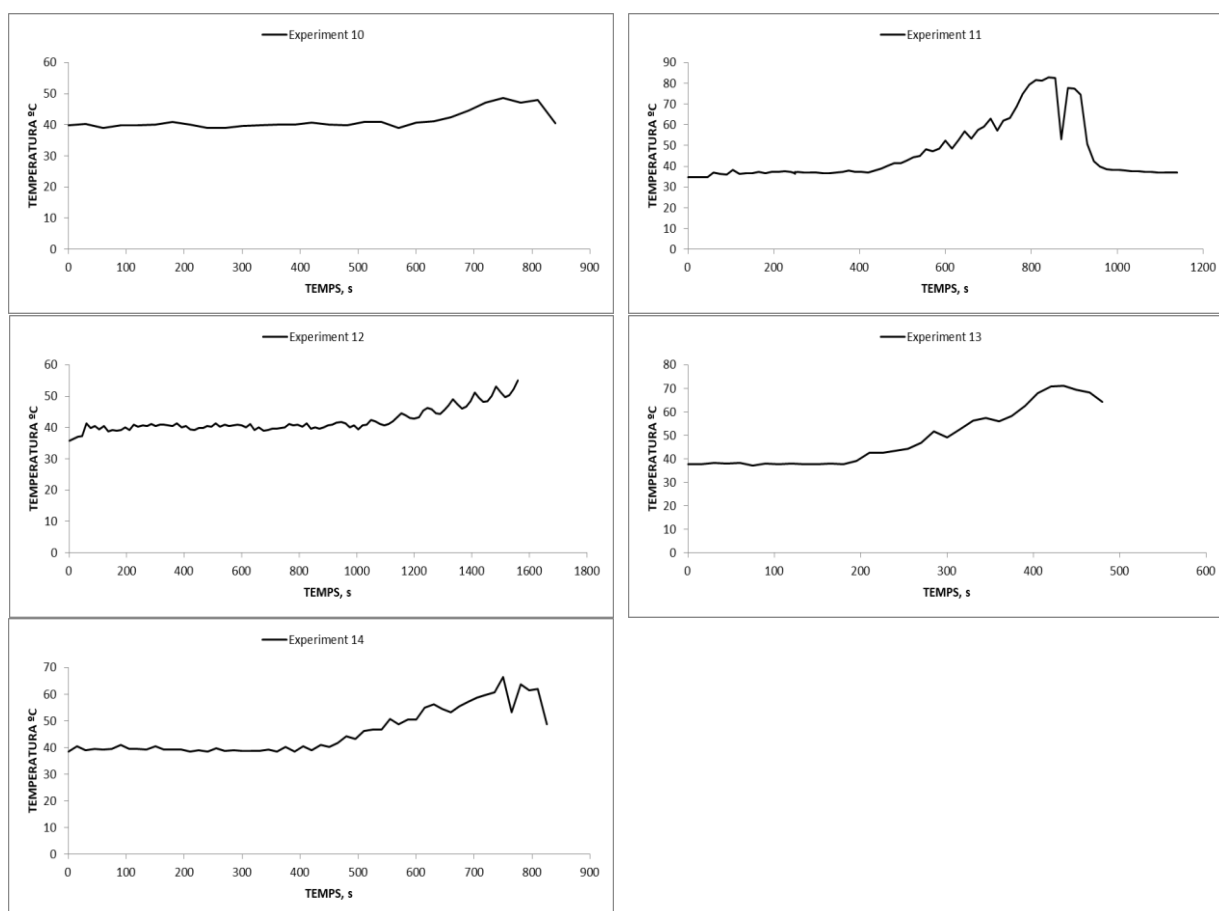


Figura 92 Gràfics de la temperatura

Taula 32 Anàlisi de variància de la temperatura

Font	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regressió	5	1704,31	340,86	27,77	0,000
Avanç, mm/min	1	199,46	199,46	16,25	0,003
Vel. Capçal, rpm	1	43,35	43,35	3,53	0,093
Prof. Passada, mm	1	87,28	87,28	7,11	0,026
Avanç, mm/min*Avanç, mm/min	1	114,05	114,05	9,29	0,014
Avanç, mm/min*Vel. Capçal, rpm	1	28,43	28,43	2,32	0,162
Error	9	110,46	12,27		
Total	14	1814,77			

Taula 33 Resum del model de la temperatura

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,50327	93,91%	90,53%	83,26%

Equació de regressió

$$\begin{aligned} \text{Temperatura màxima, } ^\circ\text{C} = & 73,4 - 0,1728 \text{ Avanç, mm/min} + 0,00334 \text{ Vel. Capçal, rpm} \\ & + 105,7 \text{ Prof. Passada, mm} + 0,000150 \text{ Avanç, mm/min} * \text{Avanç, mm/min} \\ & + 0,000007 \text{ Avanç, mm/min} * \text{Vel. Capçal, rpm} \end{aligned}$$

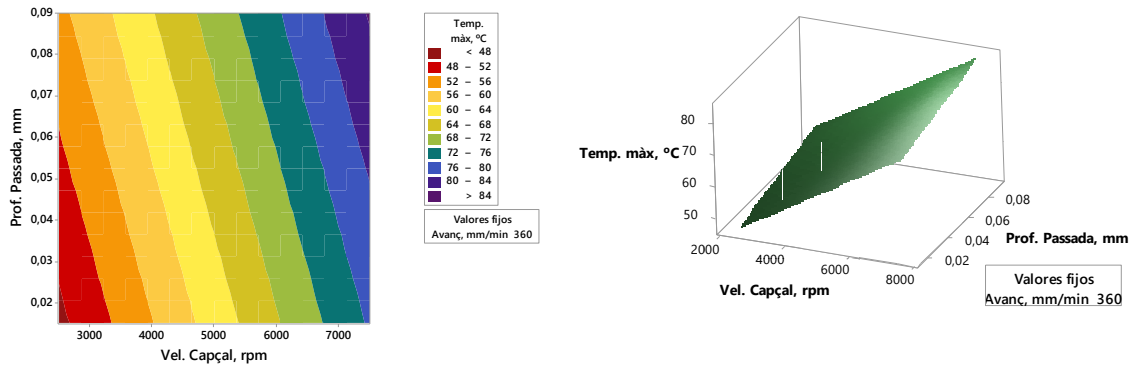


Figura 93 Gràfics de contorn i superfície entre la profunditat de passada i la velocitat de rotació del capçal per temperatura

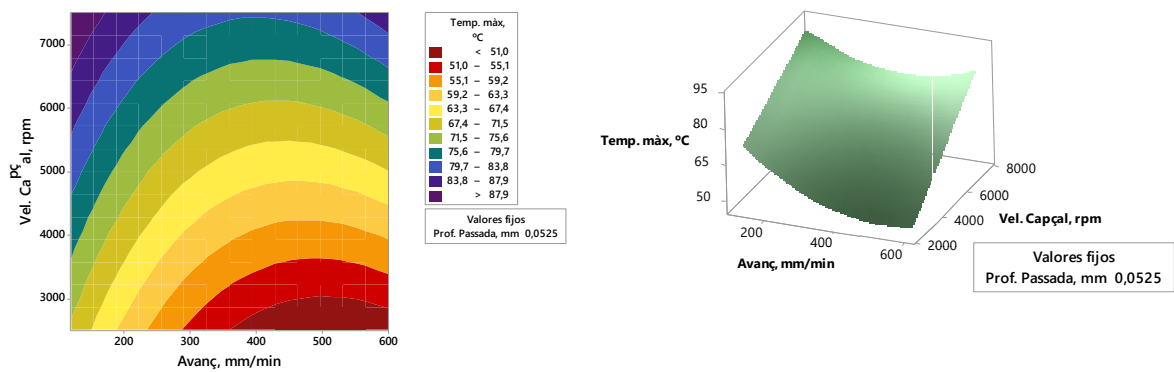


Figura 94 Gràfics de contorn i superfície entre l'avanç i la velocitat de rotació del capçal per temperatura

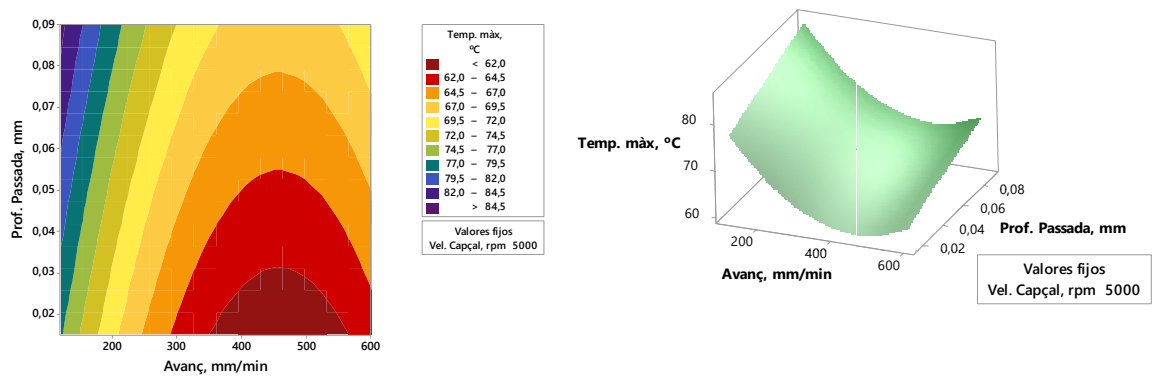


Figura 95 Gràfics de contorn i superfície entre l'avanç i profunditat de passada per temperatura

B.3.3.6 Comparacions i discussió de resultats

En aquest apartat es realitza una comparació dels resultats del segon disseny d'experiments, ja que aquest disseny d'experiments té moltes dades diferents al fer un disseny centrat compost, s'ha intentat agrupar els experiments que compartien les màximes variables de procés per poder treure conclusions i veure gràficament les diferències. Aquestes variables han estat la profunditat de passada i la velocitat d'avanç, dues variables que afecten directament sobre la durada de l'experiment i que per tant si els tenim fixes en la comparació en permet poder comprar els resultats amb la mateixa durada d'experiment. En aquesta primera part es compara gràficament i es comenten els resultats individualment i al final de l'apartat es fa una petita discussió del global dels resultats.

En la primera comparació s'explica el significat dels diferents gràfics i serveix d'exemple per els següents.

Totes les dades i gràfics utilitzats per comparar els resultats estan recopilats ens aquest Annex B.3.3 Resultats segon disseny experiments agrupats per variables.

- **Experiments 0 i 2**

Aquest dos experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0275mm) i la velocitat d'avanç (200mm/min), es diferencien en la velocitat de rotació del capçal (3333rpm i 6667rpm).

La Figura 96 ens mostra les corbes de cada una de les pròtesis en el seu eix longitudinal. En aquest cas la corba negra és el valor teòric i perfecte de la pròtesis extret amb el programa de CAD, les corbes taronja i blava ens mostren els resultats dels experiments 0 i 2 respectivament on els diferencia la velocitat de rotació del capçal. Es pot veure com l'experiment amb més velocitat de rotació del capçal (corba blava) és el que té una millor coincidència amb el valor teòric, per tant, millor resultat.

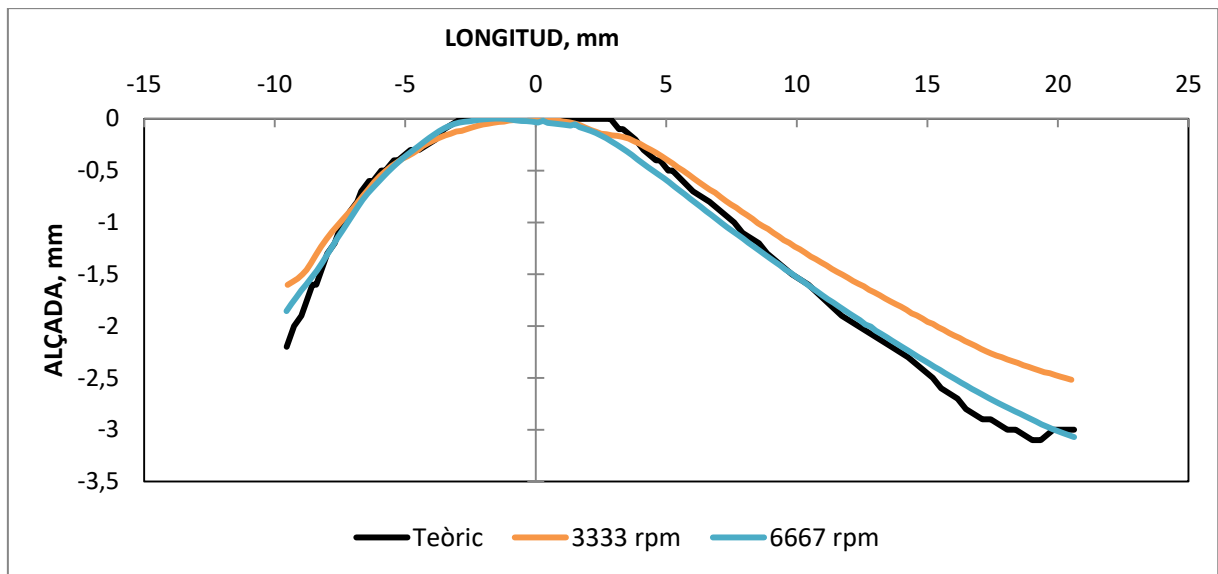


Figura 96 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 200 mm/min

La Figura 97 ens il·lustra sobre el gruix de la pròtesis al llarg del seu eix longitudinal, el mateix eix el qual s'ha fet la mesura de la precisió. Ja que partim d'una planxa de 1mm de gruix, podem calcular l'aprimament de forma senzilla. El resultat d'interès és aquell que tingui el màxim gruix ja que d'aquesta manera es mantenen amb un grau més alt les propietats del material. Podem observar com l'experiment de menys velocitat de rotació (experiment 0) té un major gruix al llarg de la pròtesi i per tant, s'ha deformat menys que la pròtesi de l'experiment 1. Aquest fet lliga amb els resultats de la precisió ja que si una pròtesi s'ha deformat menys, és difícil que hagi aconseguit una bona precisió dimensional.

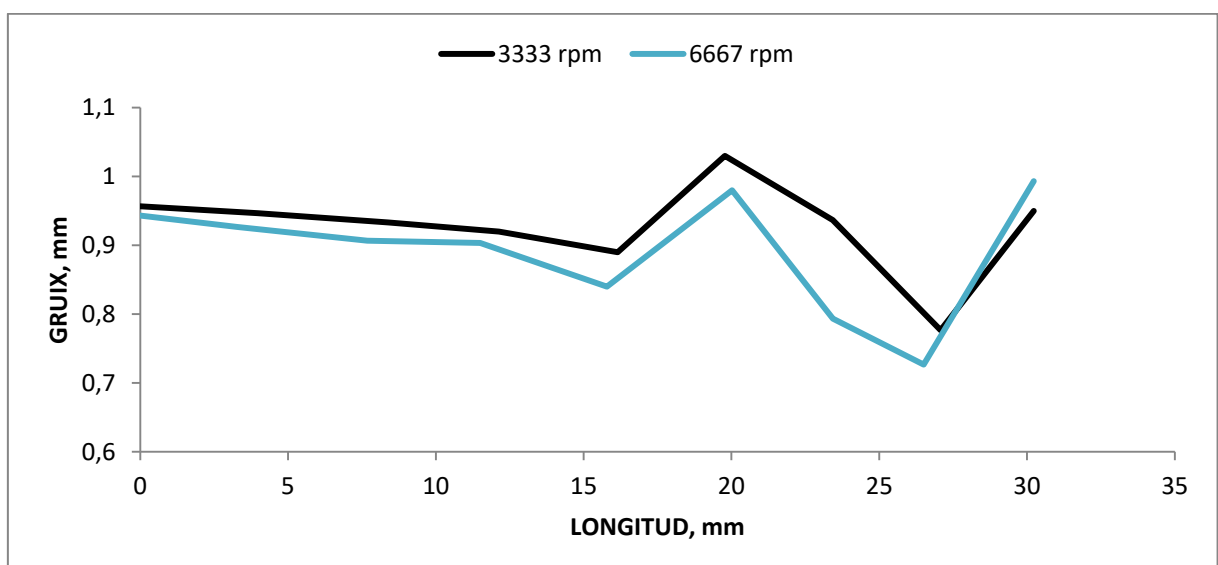


Figura 97 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 200 mm/min

Per la rugositat no es tenen gràfics ja que és simplement una dada, en aquest cas per l'experiment 0 tenim una rugositat de $6,044\mu\text{m}$ i per l'experiment 2 de $4,764\mu\text{m}$. Aquest valors ens donen a entendre que la qualitat superficial de la pròtesi és millor en l'experiment 2 (menys rugositat). Aquest fet ve donat lògicament, ja que és la variable que canvia, per la diferència de velocitats de rotació del capçal.

A continuació a la Figura 98 podem veure les corbes adquirides durant els assaigs de les forces que han estat sotmeses les planxes de magnesi per conformar les pròtesis. En aquest gràfic és el primer que podem veure la durada de l'experiment (2.750 segons aprox.), també podem observar com a mesura que va avançant l'assaig la força va augmentant de manera constant fins arribar al seu punt màxim quasi al final de l'experiment. Es pot veure com hi ha alguna baixada sobtada de la força cap al final, això és degut a que segons la profunditat de la passada, el programa ISO llançat a la màquina creat amb el software de CAM no realitza tota la peça de cop, o sigui, un cop comença a tocar la planxa no es manté en contacte amb ella fins al final del programa, sinó que hi ha fases que es mou a més alçada sense tocar-la. Amb major velocitat de rotació del capçal obtenim una major força durant tot el procés.

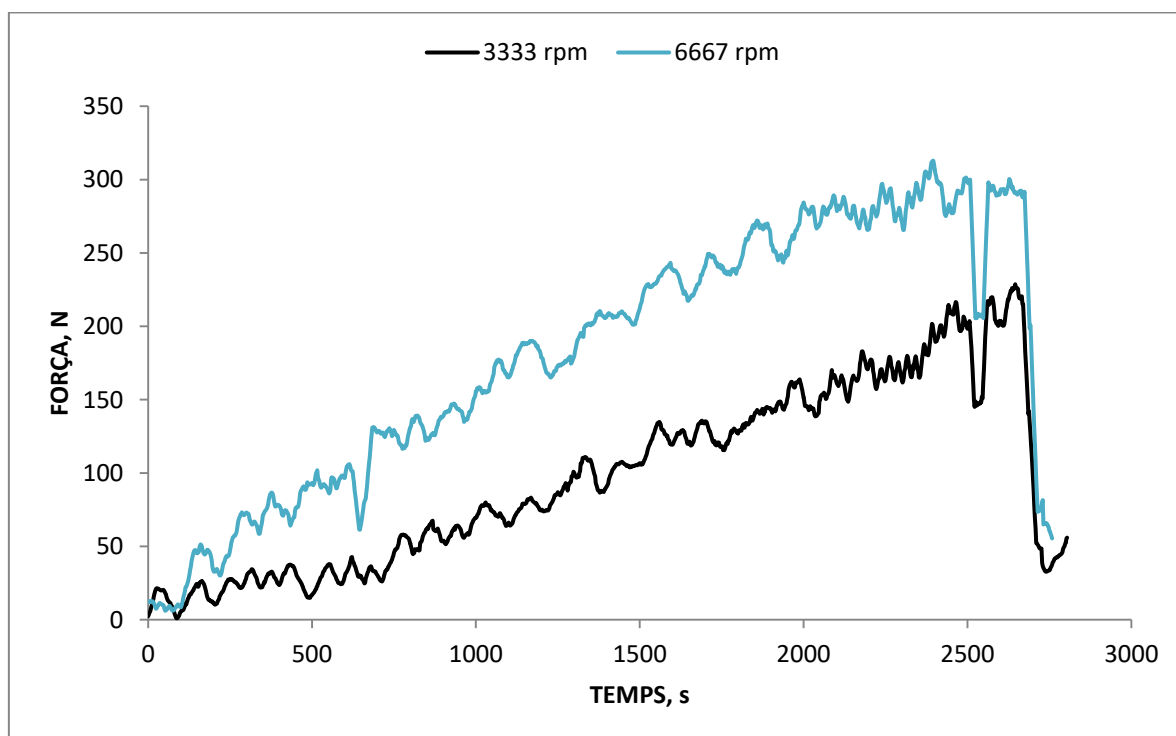


Figura 98 Comparació de força per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 200 mm/min

La temperatura dels experiments 0 i 2 es mostra a la Figura 99. Igual que amb la força, es mostra la temperatura màxima que ha assolit la pròtesis durant l'experiment, evidentment el punt de contacte entre l'eina del centre de treball amb la planxa de magnesi. Aquests gràfics poden presentar alguns salts ja que la pròpia llum del taller i del centre de treball realitzaven interferències amb la càmera tèrmica a mode de reflexes. De totes maneres es pot veure clarament com, una altra vegada, l'experiment amb més velocitat de rotació del capçal (experiment 2) és el que obté una major temperatura durant tot el procés. Aquesta temperatura més elevada ajuda a millorar la capacitat de deformació del magnesi, i per tant, és interessant aconseguir valors elevats.

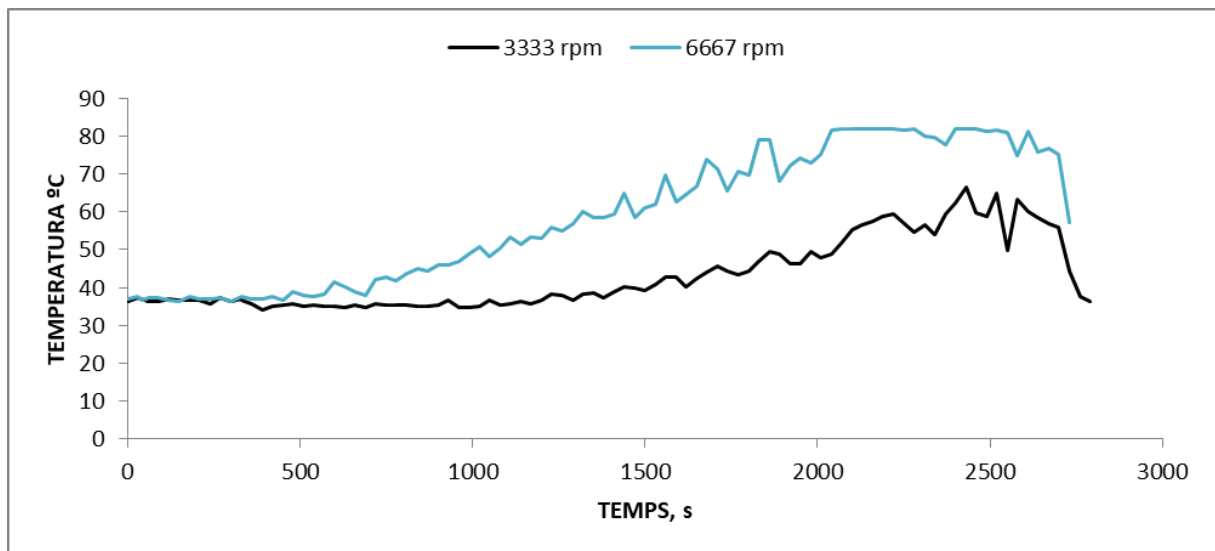


Figura 99 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0275 mm i V_a 200 mm/min

- **Experiments 1 i 3**

Els dos experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0775mm) i la velocitat d'avanç (200 mm/min), es diferencien en la velocitat de rotació del capçal (3333rpm i 6667rpm).

A la Figura 100 podem veure les corbes de precisió, en aquest cas les dues geometries són molt semblants tot i que segons la Taula 23 podem veure com és una mica millor la corba taronja (experiment 1). En aquest cas és el contrari que l'anterior Figura 96.

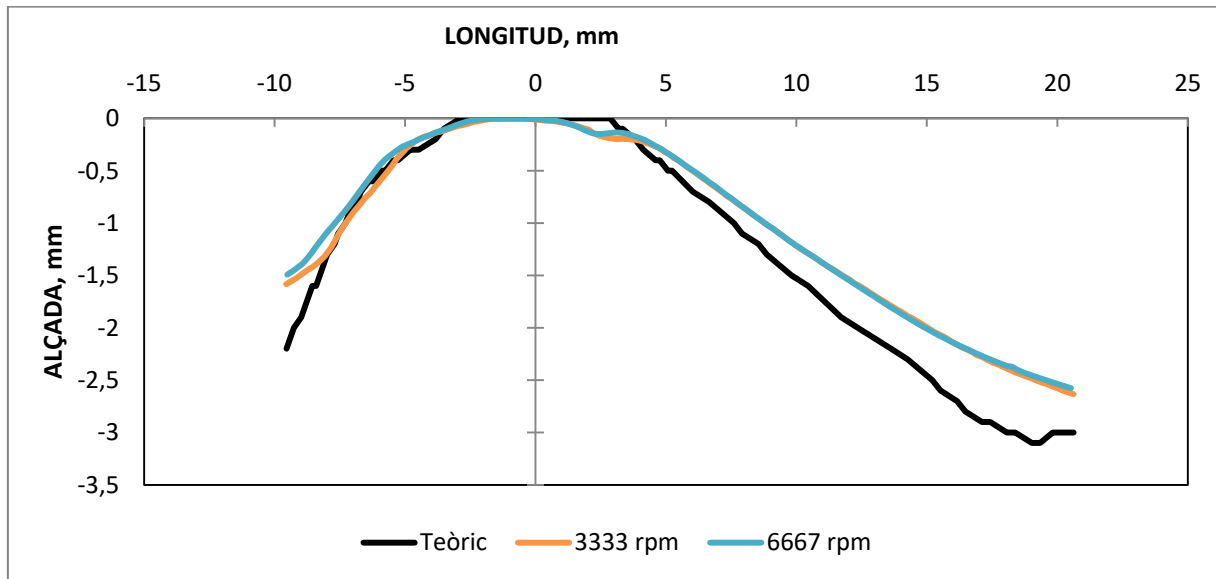


Figura 100 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0775 mm i V_a 200 mm/min

En aquest cas la Figura 101 indica com el gruix de l'experiment 2 (corba blava, 6667rpm) té un major gruix tot i que igual que en l'anterior Figura 100 el resultat és molt similar, només es diferencia entre les longituds de 20 i 25mm. Igualment que en la comparació dels experiments anteriors, l'experiment amb menys gruix és el que més precisió obté.

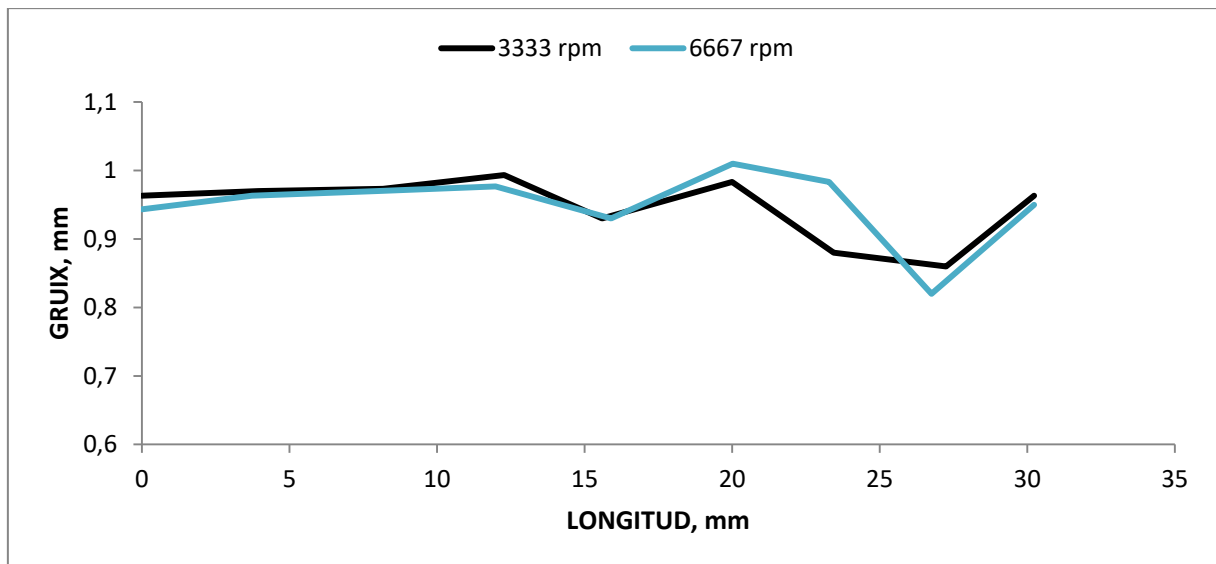


Figura 101 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0775 mm i Va 200 mm/min

Per el que fa la rugositat els experiments 1 i 3 tenen unes rugositats de $12,384\mu\text{m}$ i $13,071\mu\text{m}$ respectivament. Una altra vegada el resultat és molt similar tot i que el de l'experiment 1 (3333rpm) és lleugerament millor. En aquests experiments es creu que al tenir una profunditat de passada més alta, no afecta tant la velocitat de rotació del capçal.

El gràfic de força de la Figura 102 segueix la mateixa tendència descrita anteriorment.

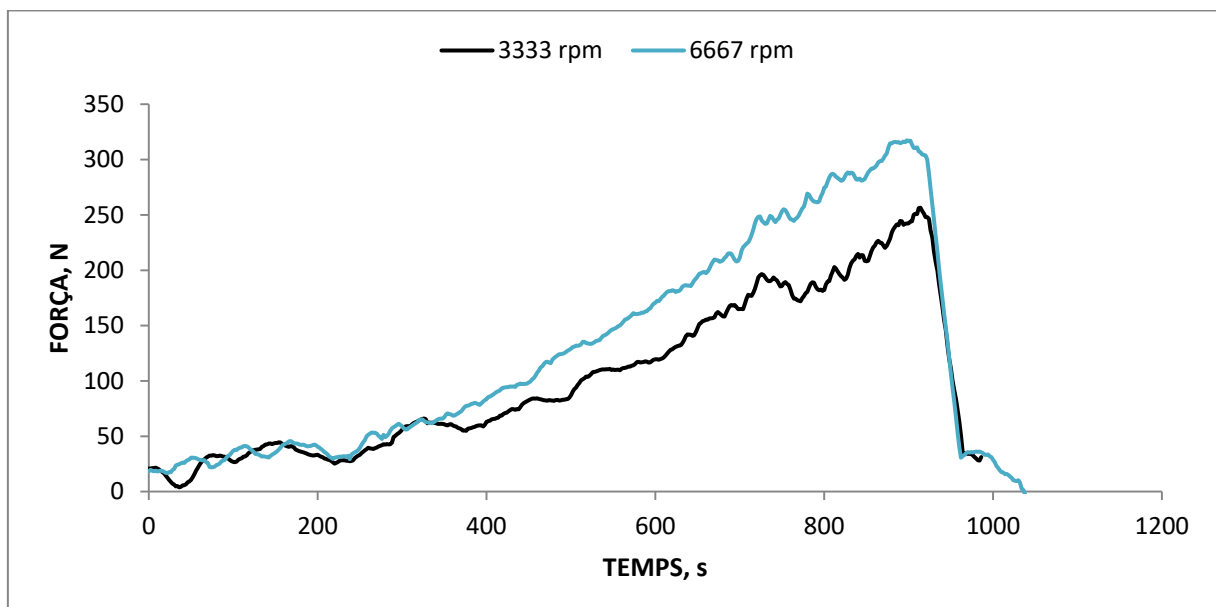


Figura 102 Comparació de força per assajos Δz 0,0775 mm i Va 200 mm/min

Igual que el gràfic de la força la Figura 103 sobre la temperatura també segueix la tendència anterior.

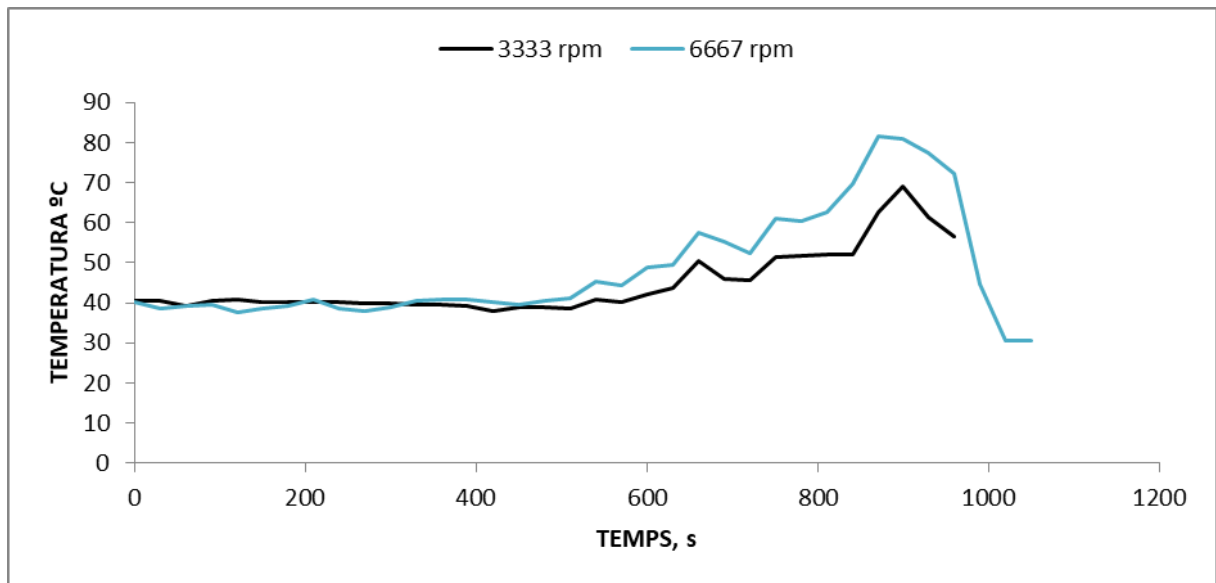


Figura 103 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0775 mm i V_a 200 mm/min

- **Experiments 10, 11 i 14**

Aquests tres experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0525mm) i la velocitat d'avanç (360mm/min). Es diferencien per les velocitats de rotació del capçal: 2500rpm per l'experiment 10, 5000rpm per l'experiment 14 i 7500rpm per l'experiment 11).

La precisió es veu reflectida a la Figura 104 de manera que la velocitat de rotació intermèdia és la que té millor precisió.

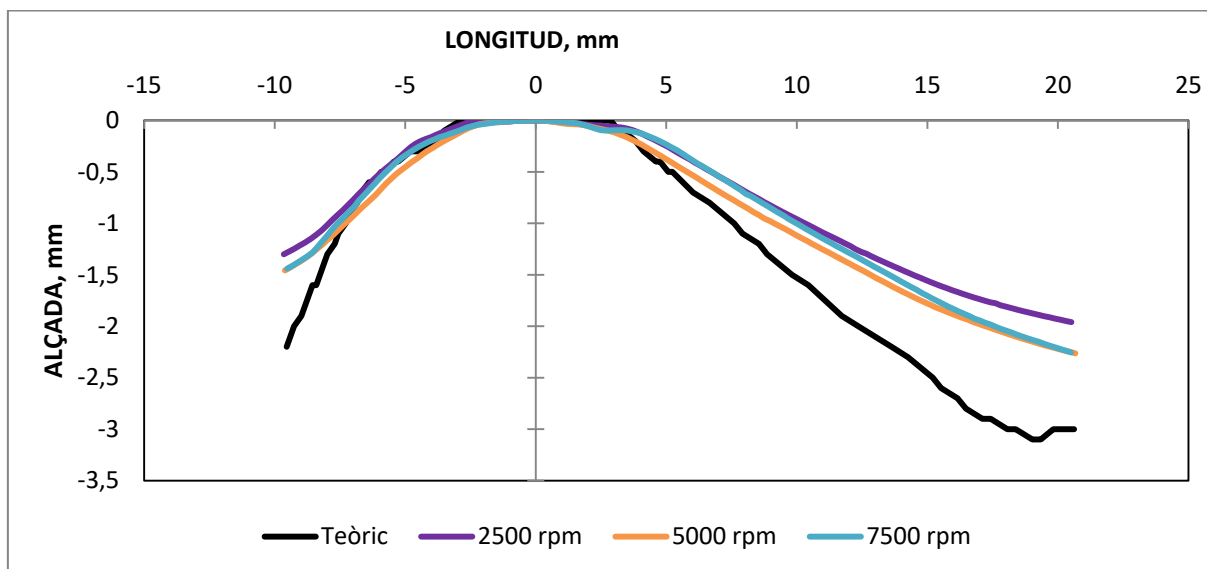


Figura 104 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0525 mm i Va 360 mm/min

A través dels gruixos que es poden veure a la Figura 105 s'interpreta que el mínim gruix el té l'experiment 14 (5000rpm) de manera que igual que les anteriors figures l'experiment amb més precisió és el que més s'ha deformat.

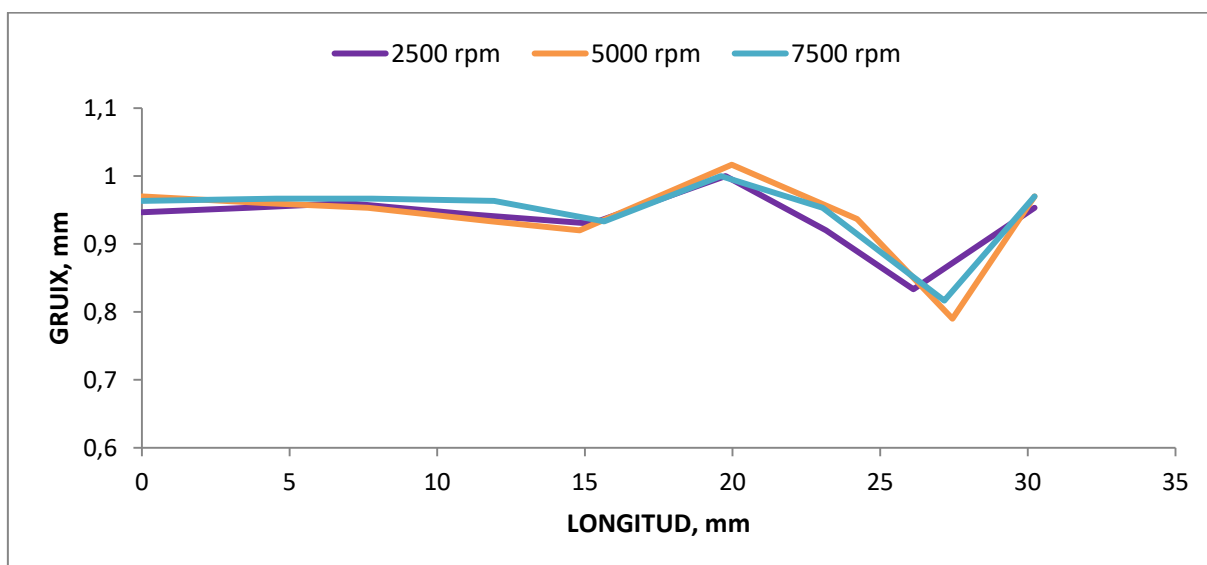


Figura 105 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0525 mm i Va 360 mm/min

La força, Figura 106, en aquest cas no compleix la tendència anterior sobre com a major velocitat de rotació del capçal major força. Sí que compleix però que l'experiment amb major precisió també és el de major força (experiment 14).

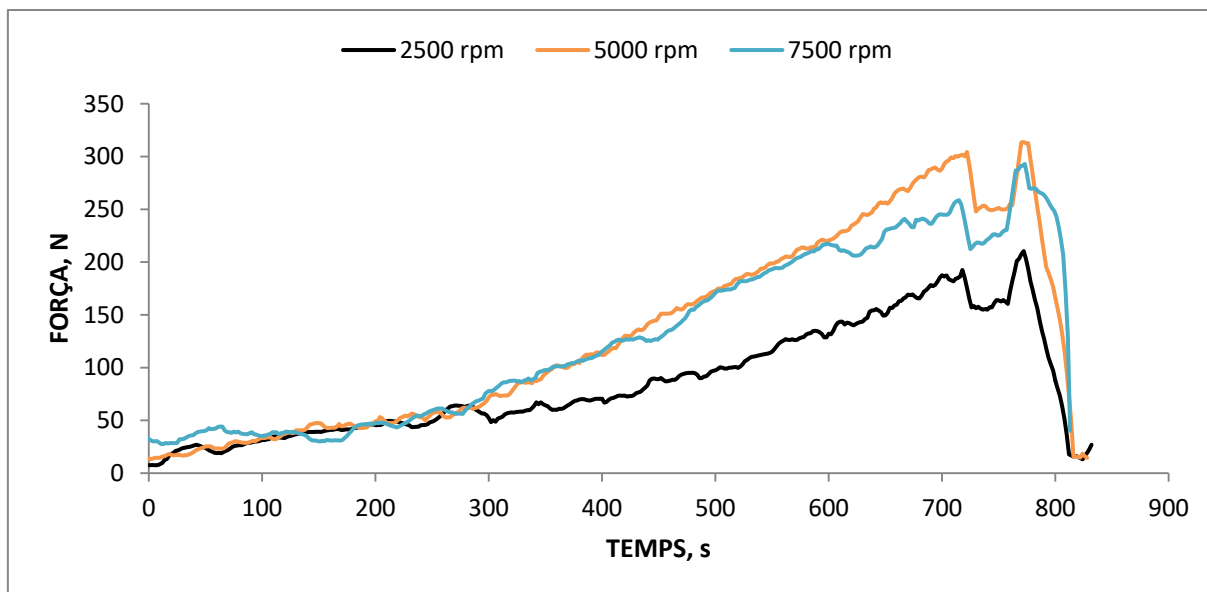


Figura 106 Comparació de força per assajos Δz 0,0525 mm i Va 360 mm/min

Per contra tal i com es pot veure a la Figura 101, la temperatura sí que segueix la tendència de com a major velocitat de rotació del capçal major temperatura de treball.

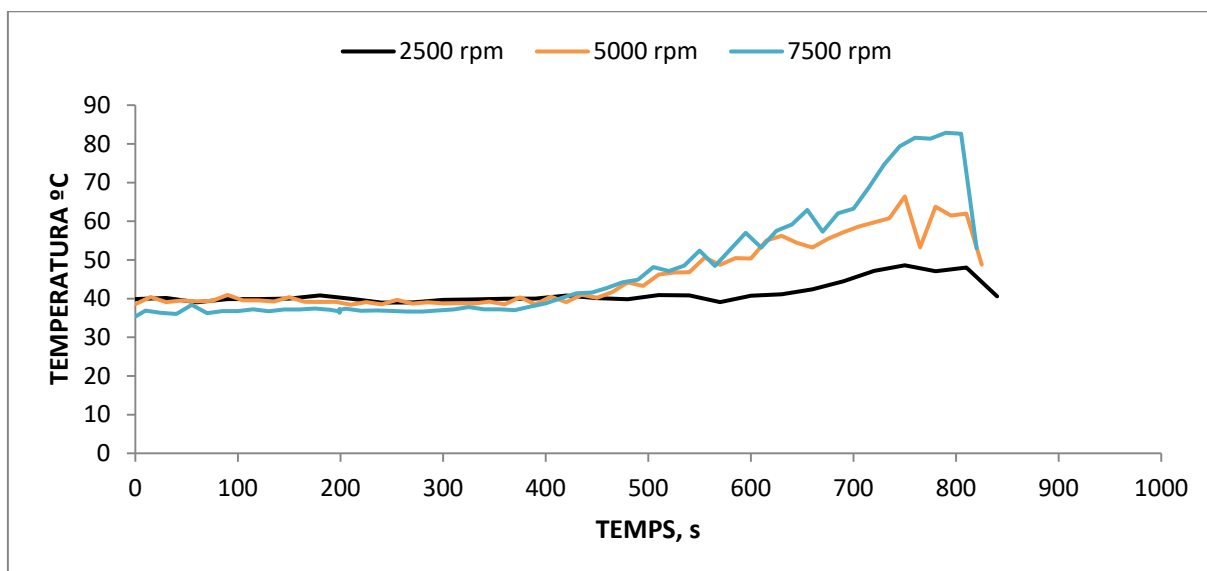


Figura 107 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0525 mm i Va 360 mm/min

- **Experiments 4 i 6**

Els dos experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0275mm) i la velocitat d'avanç (520 mm/min), es diferencien en la velocitat de rotació del capçal (3333rpm i 6667rpm)

Aquests experiments segueixen les tendències descrites a la primera comparativa entre els experiments 0 i 2 menys en la rugositat que al ser quasi idèntica no es dóna importància i es considera dins el rang de possible error de mesura. Els gràfics es poden veure a: Figura 108, Figura 109, Figura 110 i Figura 111. I les rugositats són de 4,371 μ m i 4,763 μ m respectivament.

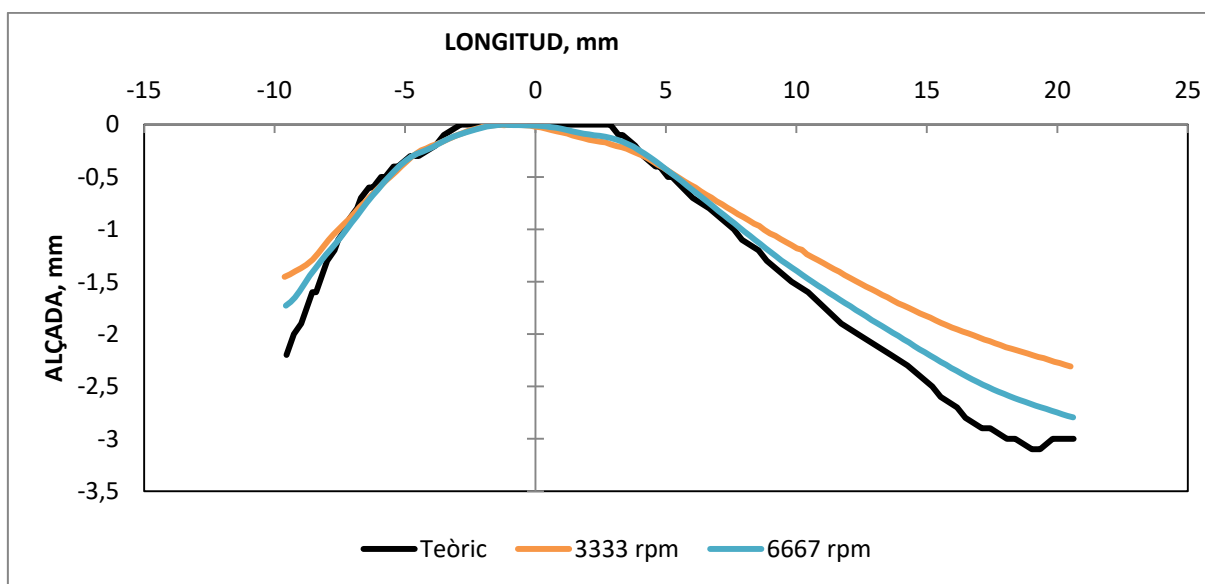


Figura 108 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0275 mm i Va 520 mm/min

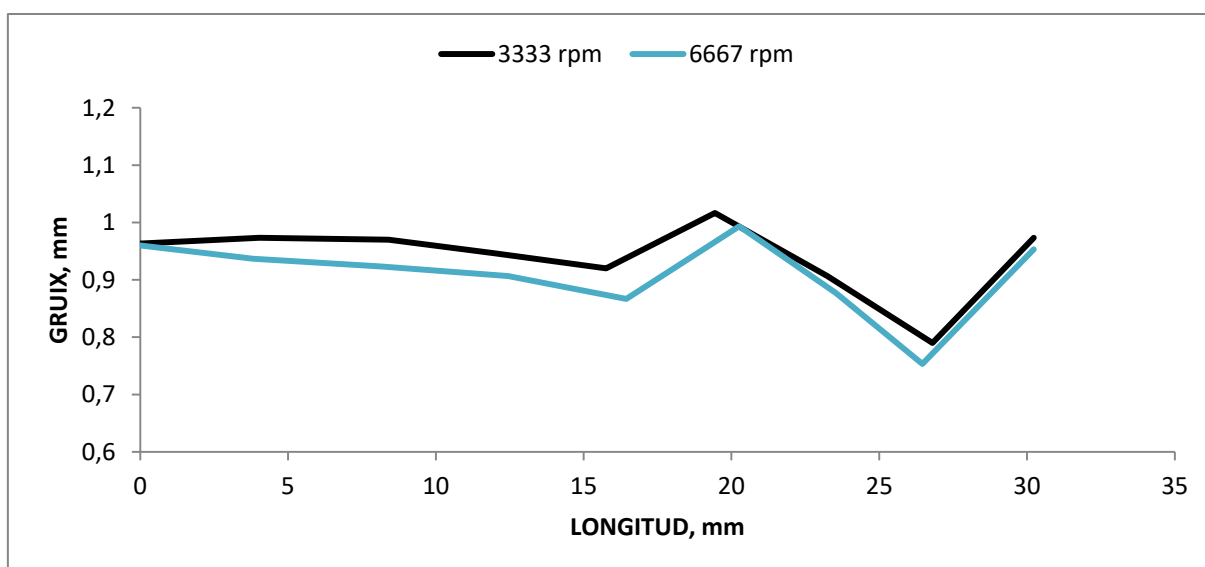


Figura 109 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0275 mm i Va 520 mm/min

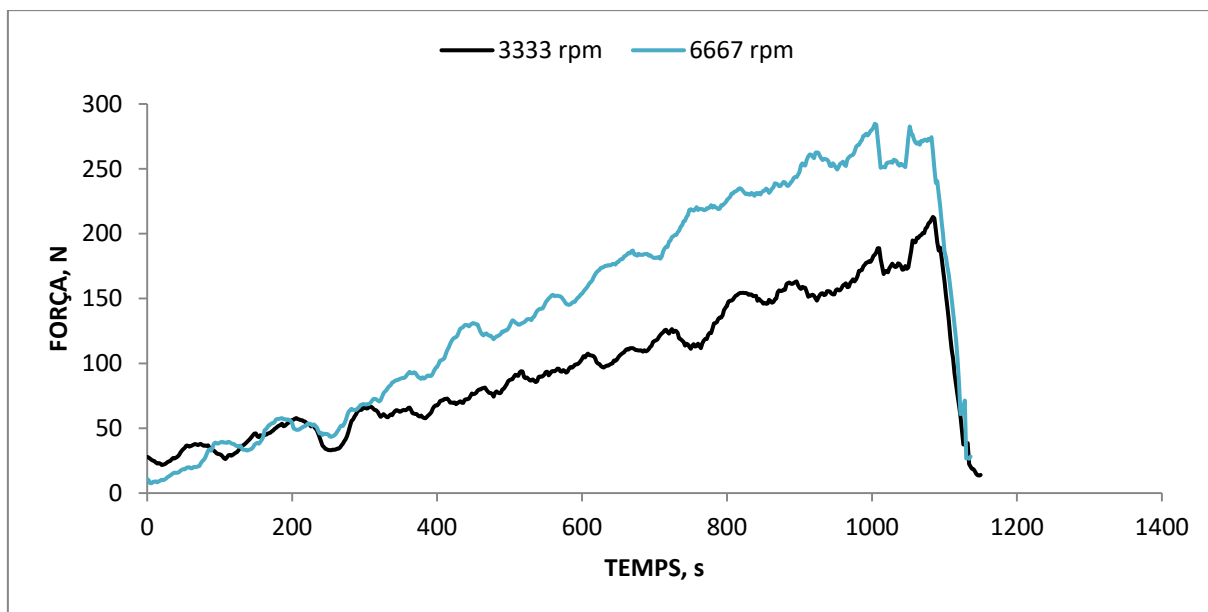


Figura 110 Comparació de força per assajos Δz 0,0275 mm i Va 520 mm/min

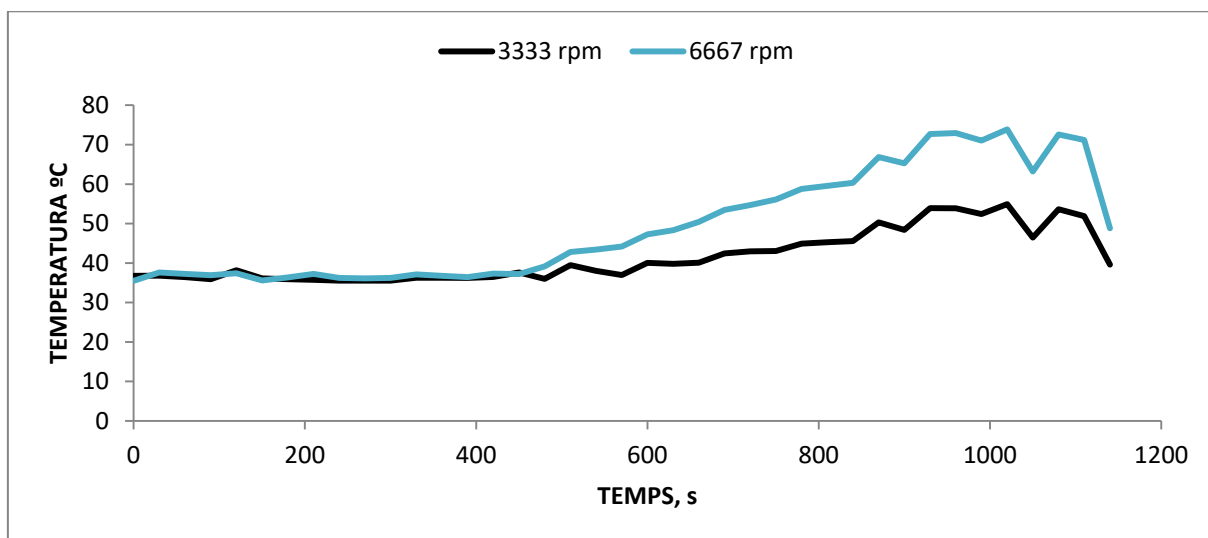


Figura 111 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0275 mm i Va 520 mm/min

- **Experiments 5 i 7**

Els dos experiments comparteixen la profunditat de passada (0,0775mm) i la velocitat d'avanç (520 mm/min), es diferencien en la velocitat de rotació del capçal (3333rpm i 6667rpm).

En aquests dos experiments ens trobem al mateix cas que amb els dos experiments anteriors, es compleixen les tendències dels experiments 0 i 2 però la tendència de les rugositats és inversa. La rugositat de l'experiment 5 (3333rpm) és de 10,483 μ m i la de l'experiment 7 (6667rpm) és de 11,278 μ m.

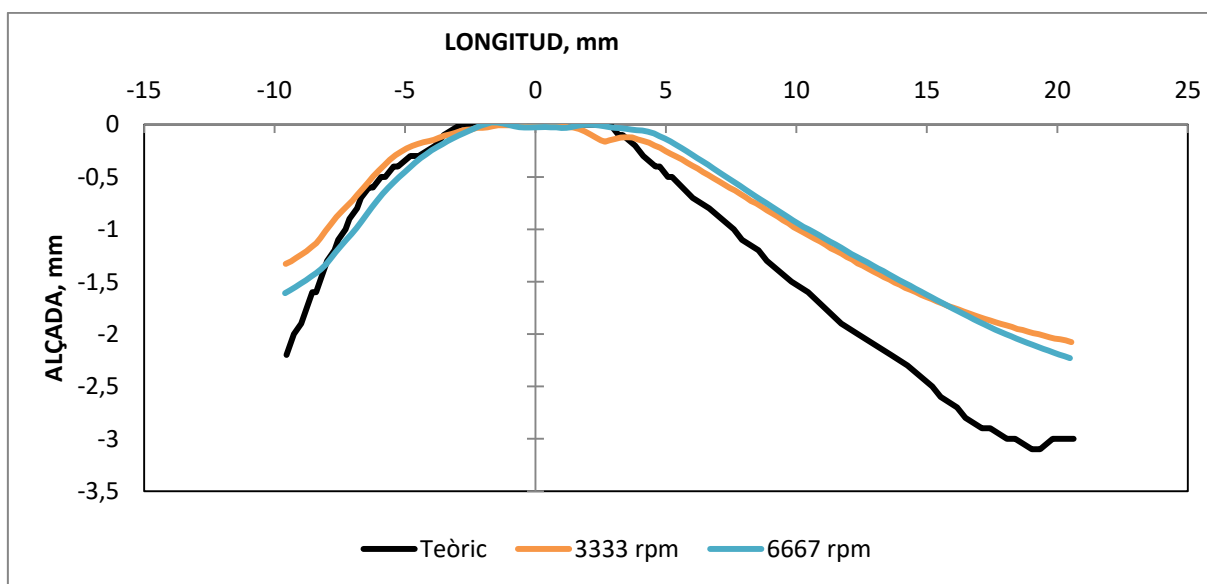


Figura 112 Comparació de precisió per assajos Δz 0,0775 mm i V_a 520 mm/min

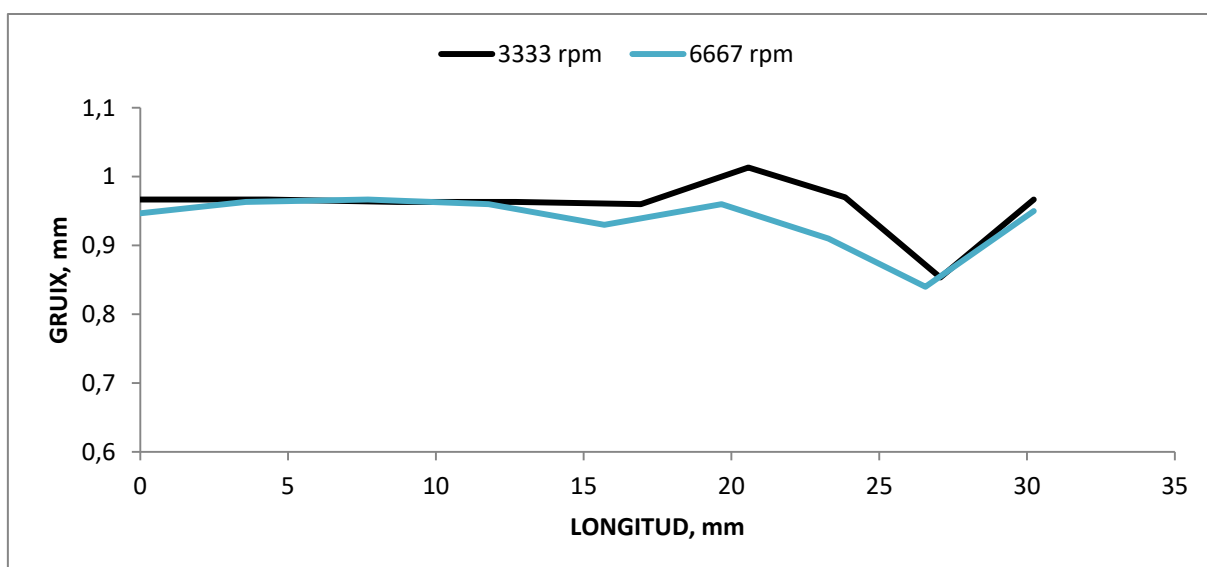


Figura 113 Comparació del gruix per assajos Δz 0,0775 mm i V_a 520 mm/min

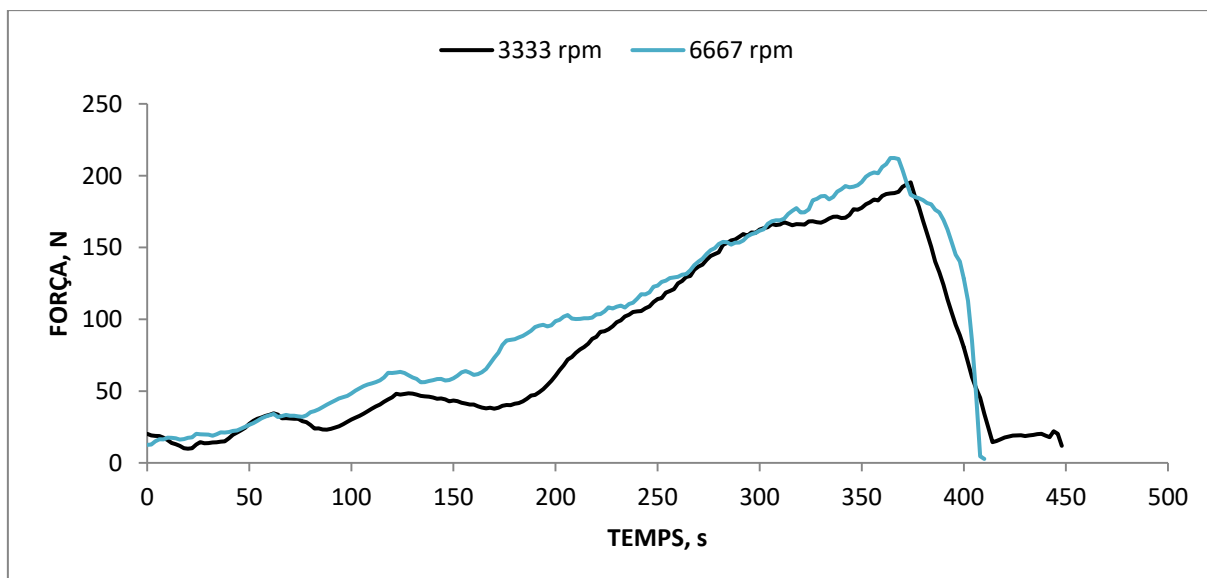


Figura 114 Comparació de força per assajos Δz 0,0775 mm i Va 520 mm/min

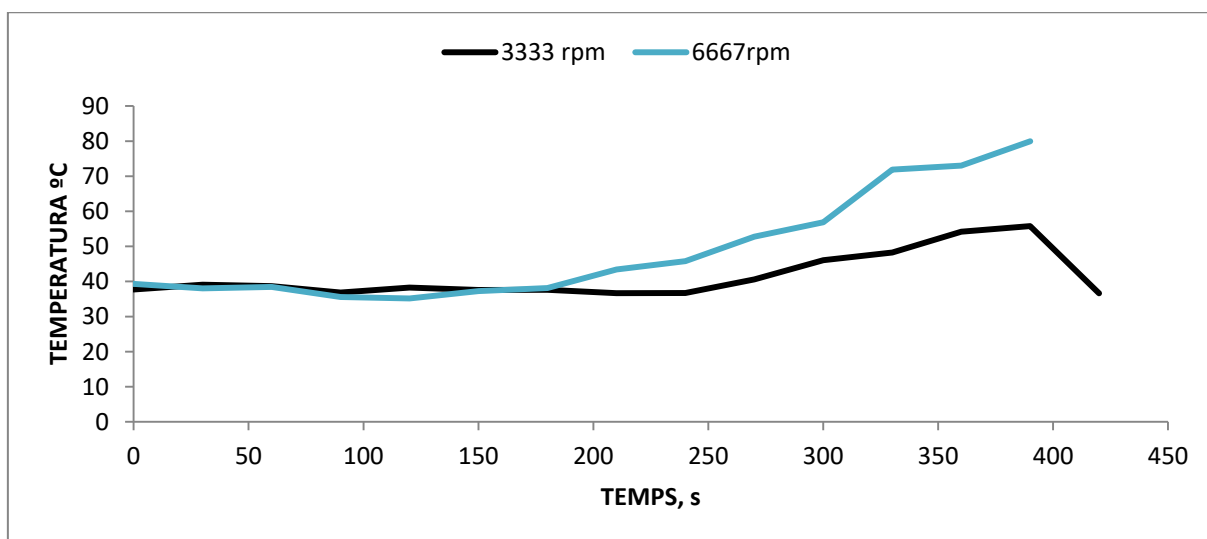


Figura 115 Comparació de temperatura per assajos Δz 0,0775 mm i Va 520 mm/min

Un cop s'ha fet la comparació dels diferents resultats, podem treure algunes conclusions per les diferents variables:

- Precisió: No sempre la millor precisió ha estat amb el valor més elevat de velocitat de rotació del capçal. Degut això es creu que per la precisió hi intervenen més factors com la profunditat de passada (molt important) i la velocitat d'avanç. Ja que amb una profunditat de passada elevada hi ha punts on l'eina no arriba a deformar i per tant, no s'aconsegueix una bona precisió.
- Gruix: Aquesta variable va lligada amb la precisió i no tant amb la velocitat de rotació del capçal. En conseqüència va més lligada a la profunditat de passada i l'avanç. El que sí que ens queda clar és que quan s'ha tingut un aprimament major (menor gruix) és quan s'ha aconseguit una major precisió degut a que la planxa s'ha deformat més.
- Rugositat: La rugositat també és una variable que va lligada a altres factors a part de la velocitat de rotació. Tot i que casi sempre s'ha tingut una millor rugositat (rugositat més baixa) amb la velocitat de rotació del capçal, és important la profunditat de la passada per tal de no crear escalons entre passada i passada i la velocitat d'avanç per tal de donar temps a la xapa a deformar-se correctament.
- Força: Una velocitat de rotació alta implica una major força al final de l'experiment i normalment al llarg de tot ell, menys en un cas que es creu que pot ser degut o al filtratge de les dades o de la sensibilitat de l'aparell d'adquisició. Que amb un increment de la velocitat de rotació del capçal augmenti la força es pot entendre degut a que al girar a més velocitat l'eina del centre de treball sobre la peça, crea una major fricció i per tant, ha de fer més força per avançar. Igualment la velocitat d'avanç influeix per les mateixes raons de fricció.
- Temperatura: Una velocitat de rotació alta implica major temperatura al final de l'experiment i normalment al llarg de tot ell. Aquests resultats tenen sentit ja que amb una major velocitat de rotació de l'eina sobre la pròtesis, crea una major fricció i per tant un augment de la temperatura. Per la temperatura també són importants les variables de la profunditat de passada i la velocitat d'avanç ja que valors elevats d'aquestes també produeixen un augment de la fricció (profunditat de passada en l'eix Z i velocitat d'avanç en l'eix X i Y).

Tots aquests resultats no fan més que confirmar els resultats explicats a partir de l'anàlisi estadística explicats a l'apartat 3.3 Segon disseny d'experiments d'aquest mateix document.

ANNEX C

EXPERIMENTACIÓ TPIF

C.1 Experiments

L'experimentació amb la tècnica TPIF interessava molt per poder comparar els resultats obtinguts amb la tècnica SPIF i poder treure unes bones conclusions de les diferències amb els dos sistemes. A més, amb la tècnica TPIF hem afegit la utilització de dos motlles per fabricació additiva.

Degut a l'interès esmentat al paràgraf superior, s'ha optat per escollir dos experiments del segon disseny d'experiments de la tècnica SPIF, el millor i el pitjor en temes de resultats, donant més importància a la precisió, rugositat i gruix de la peça.

Així doncs s'han escollit els experiment 12 (millor) i 5 (pitjor), veure Taula 34. El planteig que s'ha fet ha estat el de realitzar aquests dos experiments en els 3 tipus de materials que es tenen els motlles (Prolab 65, PLA i Resina Rígid) i a més realitzar una repetició amb el material Prolab 65 per tal de poder valorar si existeix una repetibilitat o no. Per tant, es realitzen 8 experiments (Taula 35).

Taula 34 Resultats segon disseny d'experiments SPIF

Exp.	Va, mm/min	N, rpm	Δz , mm	Precisió	Gruix mínim, mm	Ra, μm	F. màx, N	T. màx, °C
5	520	3333	0,0775	0,0168	0,8533	10,483	207,43	55,8
12	360	5000	0,015	0,0367	0,7433	4,191	309,2085	55,13

Taula 35 Experiments TPIF

Experiment	Antic	Avanç, mm/min	Vel. Capçal, rpm	Prof. Passada, mm	Motlle
0	5	520	3333	0,0775	Prolab 65
1	5	520	3333	0,0775	Prolab 65
2	12	360	5000	0,015	Prolab 65
3	12	360	5000	0,015	Prolab 65
4	5	520	3333	0,0775	PLA
5	5	520	3333	0,0775	Resina rígid
6	12	360	5000	0,015	PLA
7	12	360	5000	0,015	Resina rígid

C.2 Muntatge

Hi ha hagut dos muntatges a esmentar. El primer ha estat el dels inserts (motlles de PLA i Resina Rígid) dins les cavitats del motlle de cavitats, veure Figura 128. El segon muntatge ha estat el del motlle de cavitats i el motlle de pròtesis sobre la taula dinamomètrica Kistler i la planxa de suport, utilitzades anteriorment en els experiments SPIF, veure Figura 116.

Aquest segon muntatge s'ha utilitzat aprofitant al màxim el material que ja estava disponible al taller. Tal i com es pot veure al document Plànols en els plànols nº1, 2 i 3, els motlles i la planxa de suport disposen de 8 forats repartits simètricament al seu perímetre, els quatre forats dels extrems, en el cas dels motlles, són forats passants pensats perquè hi passi un cargol de mètric 8 que unirà la base, que està subjectada a la taula dinamomètrica, amb el motlle i la planxa de suport. A més els 4 forats restants dels motlles són roscats pensant que la planxa de suport quedarà unida al motlle, a més, per quatre cargols de mètric 8 més.

Entremig del motlle i la planxa de suport es situarà la planxa de magnesi per ser deformada.



Figura 116 Muntatge experimentació TPIF

C.3 Resultats

Taula 36 Resultats TPIF

Exp.	Va, mm/min	N, rpm	Δz , mm	Precisió	Gruix mínim, mm	Ra, μm	F. màx, N	T. màx, $^{\circ}\text{C}$	Motlle
0	520	3333	0,0775	0,0550	0,810	13,69	293,864	51,28	Prolab 65
1	520	3333	0,0775	0,0419	0,820	13,53	271,464	51,76	Prolab 65
2	360	5000	0,015	0,0854	0,707	6,19	268,913	61,38	Prolab 65
3	360	5000	0,015	0,0889	0,717	5,17	266,911	56,9	Prolab 65
4	520	3333	0,0775	-	-	13,14	258,159	56,55	PLA
5	520	3333	0,0775	-	-	12,81	264,910	53,04	Resina
6	360	5000	0,015	-	-	5,72	291,851	58,22	PLA
7	360	5000	0,015	-	-	5,83	253,533	63,28	Resina

On (Exp.) és el número d'experiment, (Va) és la velocitat d'avanç, (N) és la velocitat del capçal, (Δz) és la profunditat de cada passada, (Ra) és la rugositat, (F. màx) és la força màxima i (T. màx) és la temperatura màxima.

A la Taula 36 es mostren els resultats dels experiments realitzats amb TPIF. Primer de tot cal destacar que els experiments 4, 5, 6 i 7 els resultats han estat la ruptura de la pròtesis durant el conformat d'aquesta, una altra vegada al punt de màxima profunditat (3,85mm) com ja s'havia donat el cas en els experiments previs. Degut a aquestes ruptures les columnes sobre la precisió i el gruix queden en blanc ja que és impossible realitzar una mesura precisa de la geometria si aquesta està deformada per la ruptura i igualment és negligible la mesura del gruix de la peça ja que amb la ruptura aquest valor és 0.

Exposat aquests primers resultats, es pot veure com igualment que en els resultats amb SPIF s'obtenen millors resultats en temes de precisió quan s'utilitza una velocitat d'avanç i una profunditat de passada menor amb una velocitat de rotació del capçal elevada. Juntament amb la precisió es té que el gruix de la peça és menor en els experiments on tenim una major precisió. Igualment amb la rugositat es té la mateixa tendència que amb la tècnica SPIF, millor resultats amb valors baixos de profunditat de passada.

Les variables de força i temperatura serviran per poder fer la comparació amb els resultats del segon disseny d'experiments realitzat amb SPIF.

C.3.1 Imatges

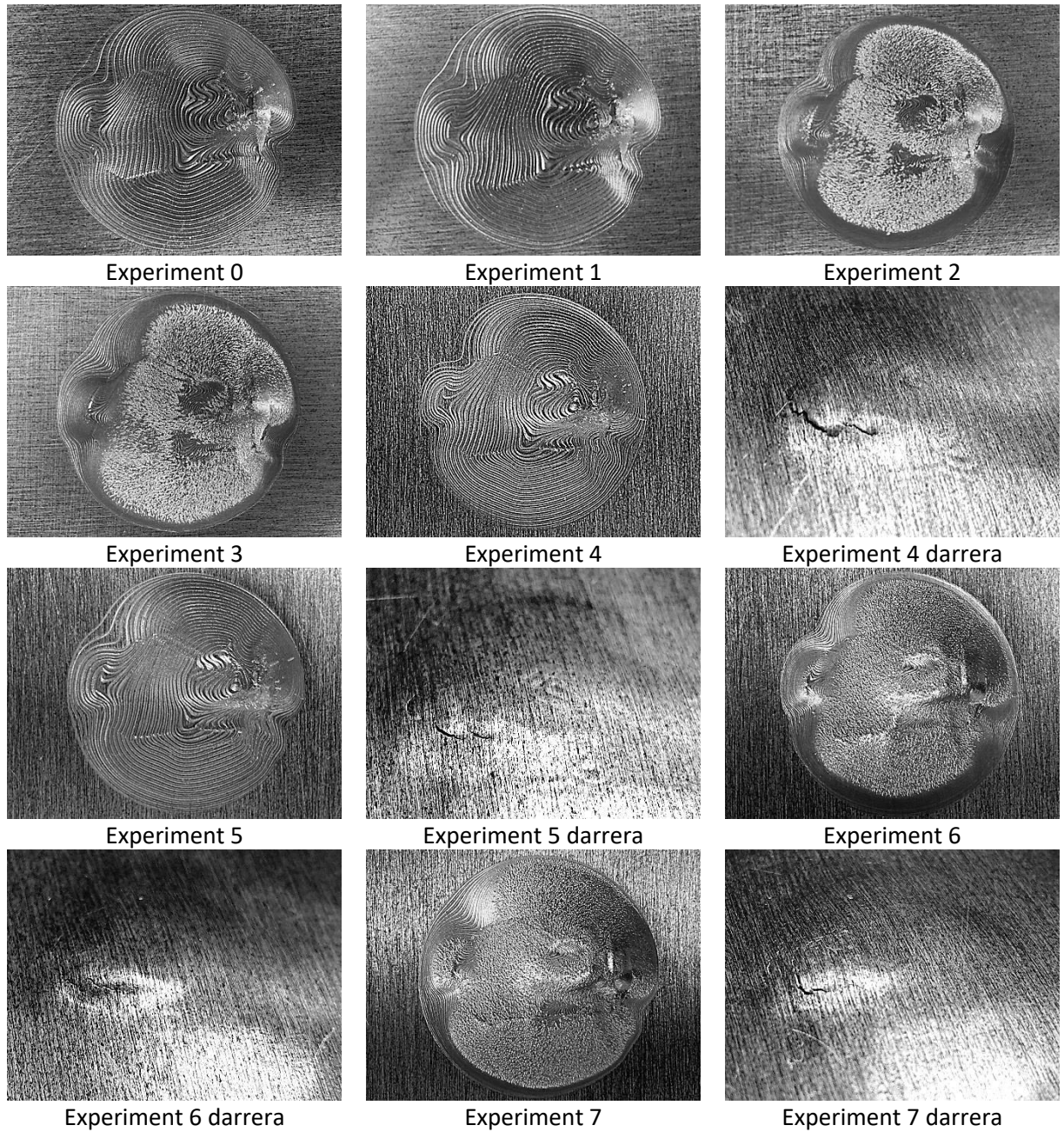


Figura 117 Imatges resultats experimentació TPIF

C.3.2 Precisió

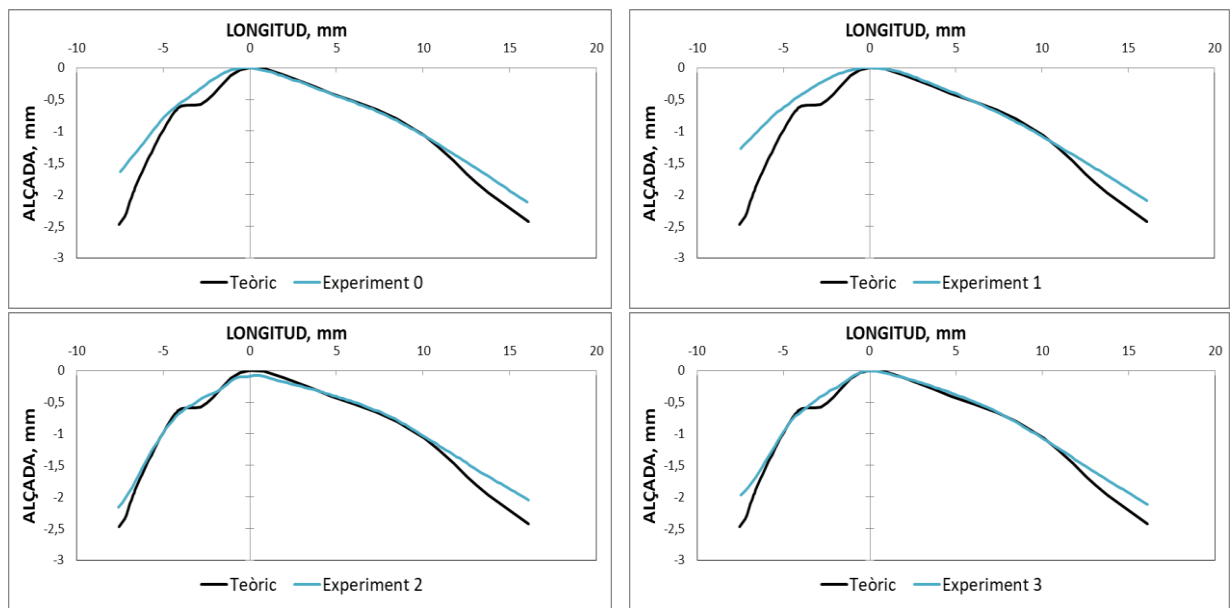


Figura 118 Corbes de geometria

C.3.3 Gruix

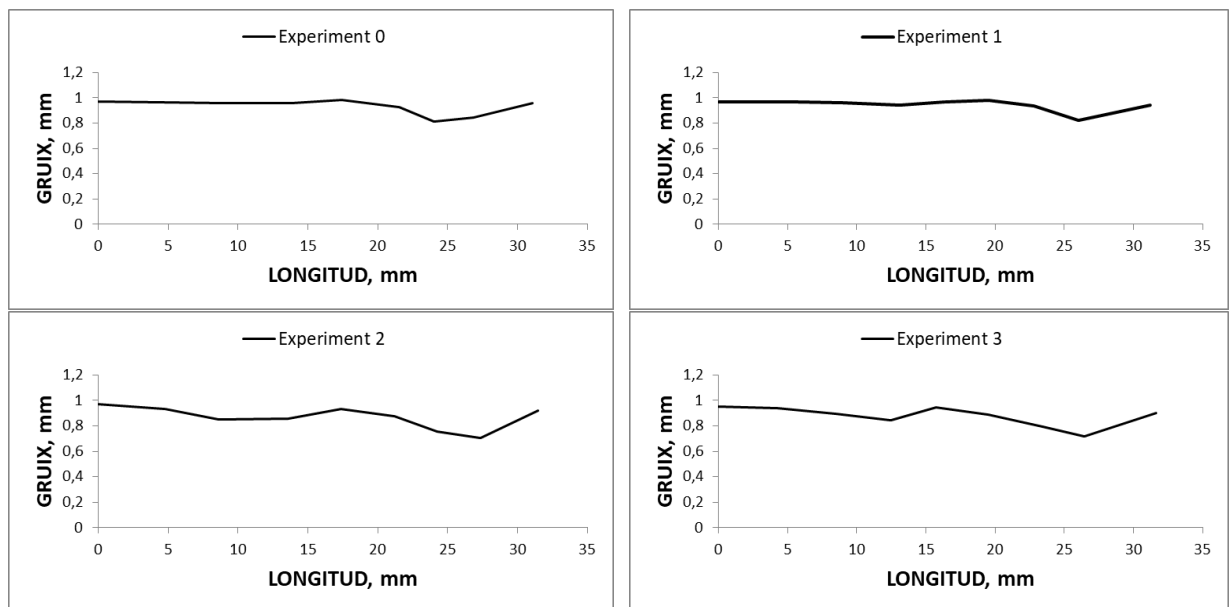


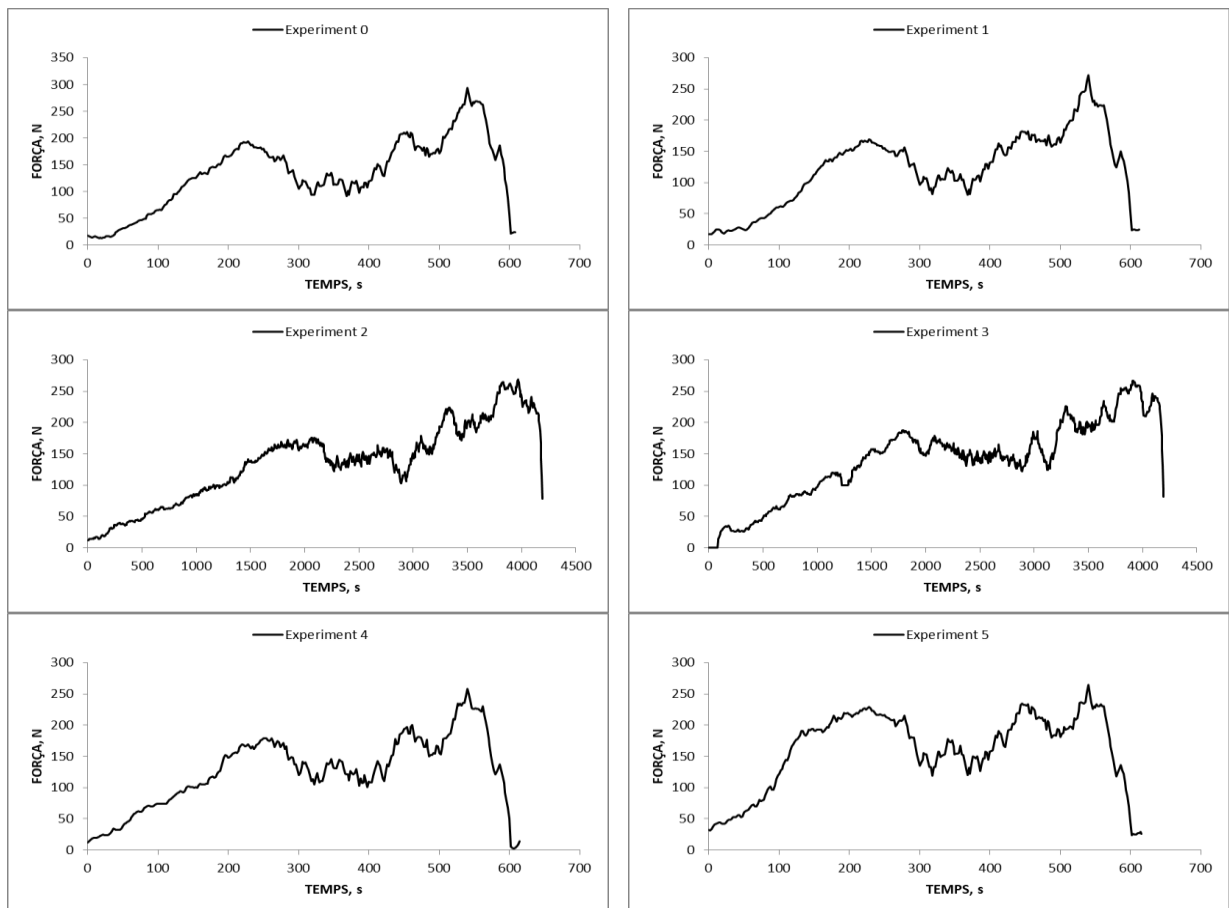
Figura 119 Gràfics del gruix de la pròtesi

C.3.4 Rugositat

Taula 37 Rugositats

Experiment	Avanç, mm/min	Vel. Capçal, rpm	Prof. Passada, mm	Ra, μm
0	520	3333	0,0775	13,698
1	520	3333	0,0775	13,530
2	360	5000	0,015	6,199
3	360	5000	0,015	5,178
4	520	3333	0,0775	13,145
5	520	3333	0,0775	12,819
6	360	5000	0,015	5,727
7	360	5000	0,015	5,835

C.3.5 Força



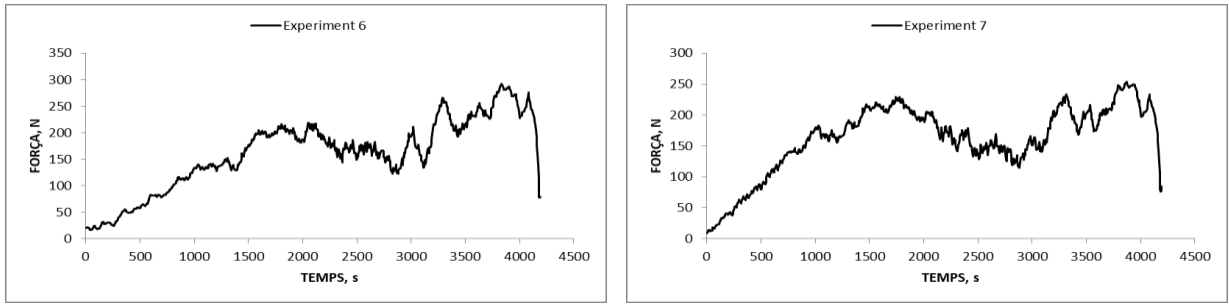


Figura 120 Gràfics de la força

C.3.6 Temperatura

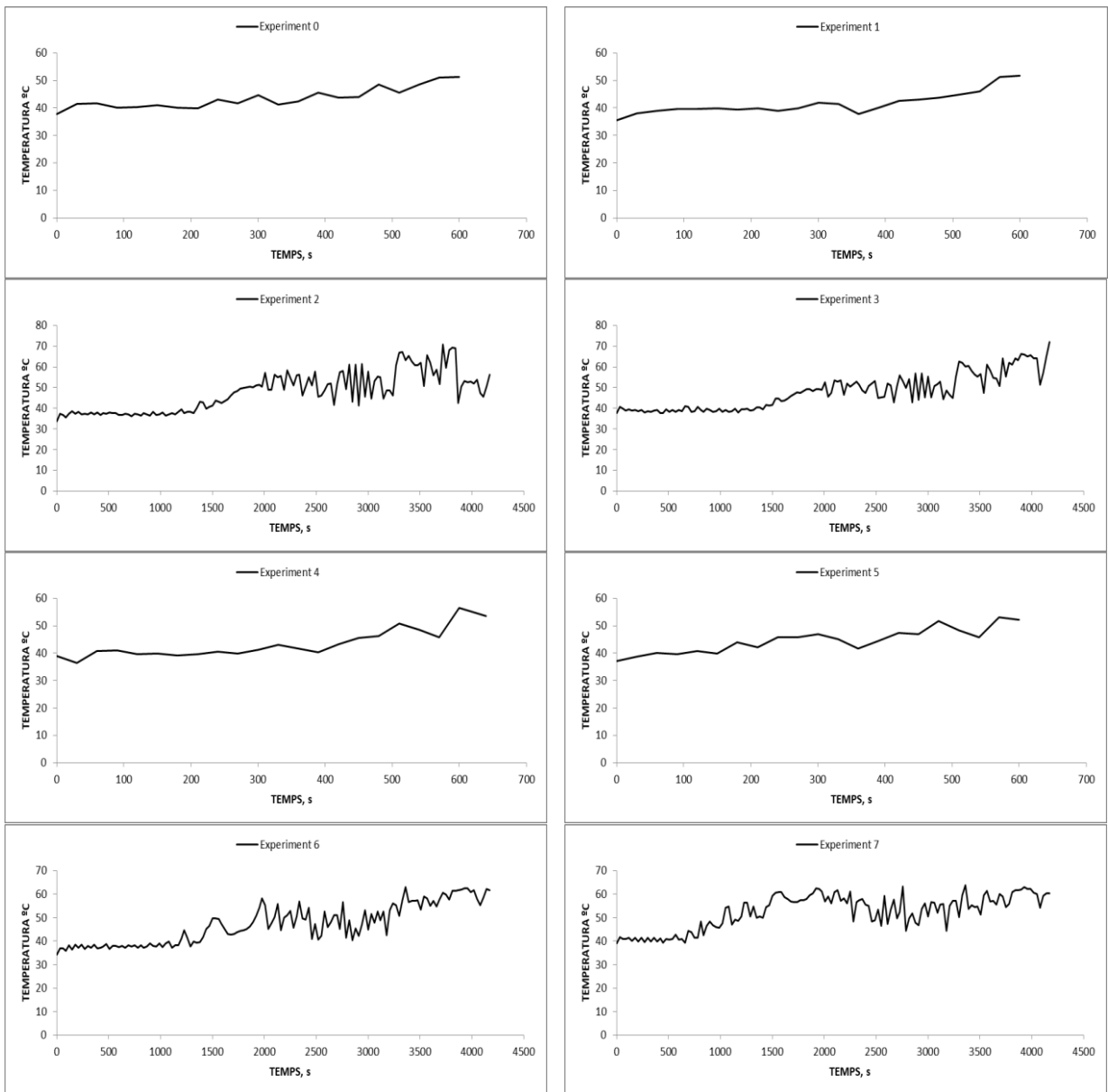


Figura 121 Gràfics de la temperatura

C.4 Caracterització Motlles

Per tal de poder verificar que els motlles han fet la seva funció i poder-ne mesurar el seu desgast de cares a estudiar la viabilitat dels motlles amb fabricació additiva, s'han caracteritzat els motlles abans i després del procés de deformació incremental. Aquesta caracterització també ens ha permès verificar que les impressores han imprès correctament el motlle i mesurar-ne la possible desviació.

C.4.1 Precisió

Per a realitzar la caracterització s'ha realitzat una mesura amb la màquina de coordenades de l'eix central longitudinal del motlle.

Els resultats es presenten de forma conjunta a la Figura 122 on podem veure en color taronja la corba teòrica del motlle provinent del CAD, en color negre podem veure el motlle un cop imprès amb la impressora i abans de ser utilitzat i en color blau podem veure l'estat final del motlle un cop ha sigut utilitzat. En tots dos casos els motlles s'han utilitzat dues vegades.

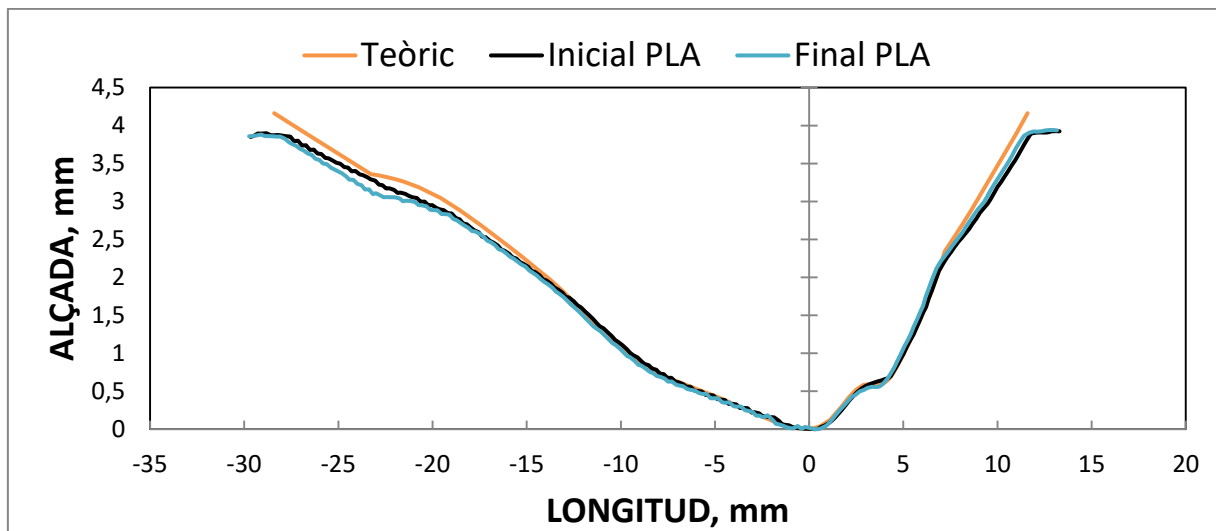


Figura 122 Comparació de la forma del motlle de PLA

Entre el motlle teòric i el motlle a l'estat inicial tenim una desviació de 0,5 mm. Entre el motlle a l'estat inicial i el motlle utilitzat dues vegades tenim una desviació de 0,033 mm.

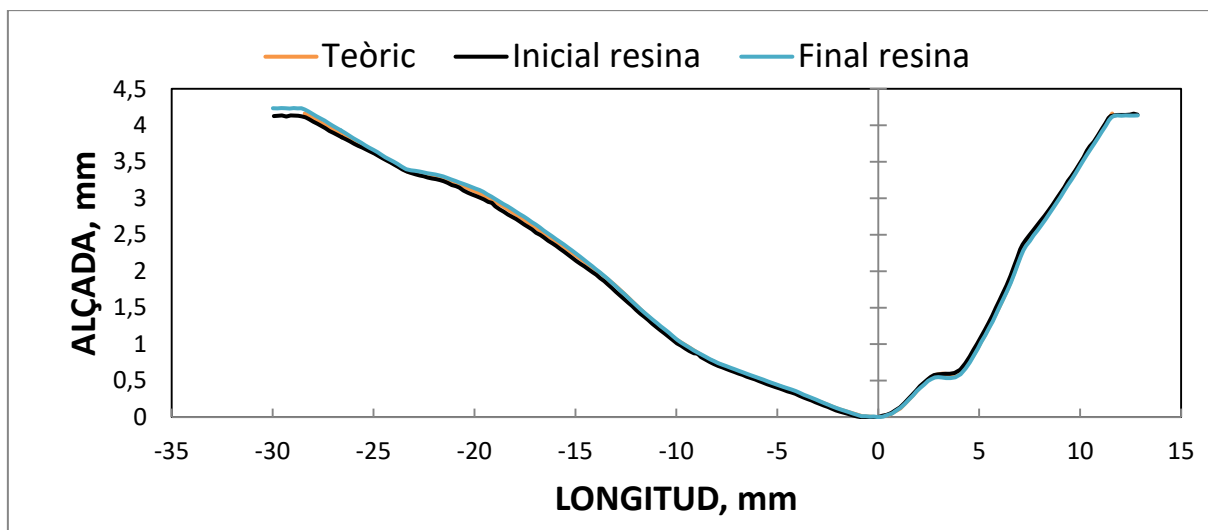


Figura 123 Comparació de la forma del motlle de Resina

En aquest cas a simple vista podem veure a la Figura 123 com la corba teòrica (taronja) queda solapada amb la corba inicial (negre), això és degut a que la precisió que ens permet obtenir la impressora amb la tecnologia utilitzada (SLA) és superior a l'anterior (FDM) i no existeix desviació entre el valor teòric i l'inicial. Entre el motlle a l'estat inicial i el motlle utilitzat dues vegades tenim una desviació de 0,045 mm, molt semblant en l'anterior motlle fabricat amb PLA.

Tot i no ser de fabricació additiva sinó directament mecanitzat, també s'ha caracteritzat de la mateixa forma que els anteriors, les pròtesis mecanitzades en el motlle de pròtesis.

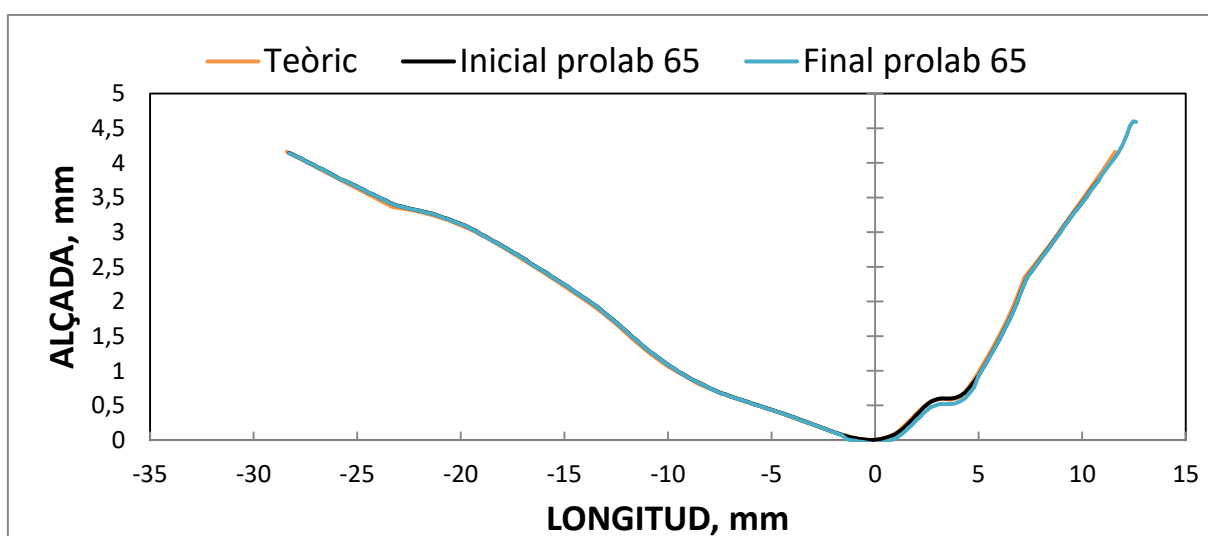


Figura 124 Comparació de la forma del motlle de Prolab 65

En aquest últim cas a la Figura 124 també podem veure com les tres corbes són pràcticament iguals, això és degut a que el procés de mecanitzat és més precís que algunes tècniques de fabricació additives com les que s'han utilitzat. La desviació que s'obté entre la corba inicial i la final és de 0,023 mm i sobretot està en el punt on es trencaven les pròtesis i, per tant, el punt més crític de la peça.

En tots tres casos podem afirmar que els motlles han realitzat la seva funció i no s'han deformat excessivament per poder influir en el resultat de la pròtesi.

C.4.2 Rugositat

També s'ha tingut en compte la rugositat a l'hora de caracteritzar els motlles ja que és un bon indicatiu per saber si la planxa de magnesi s'ha recolzat sobre el motlle o no.

Els resultats inicials i finals es presenten a la Taula 38.

Taula 38 Rugositat dels motlles

Motlle	Instant	Ra, μm
Prolab 65	Inicial	4,435
	Final	2,886
PLA (FDM)	Inicial	14,064
	Final	12,390
Resina Rígid (SLA)	Inicial	2,217
	Final	0,769

Es pot veure clarament com en tots els casos la rugositat després de realitzar l'experiment és inferior que en el moment inicial, això ens dóna a entendre que en tots els casos la planxa de magnesi s'ha deformat fins a arribar a tocar el motlle.

Si ens fixem i comparem la rugositat inicial dels motlles amb les diferents formes de fabricació, podem apreciar com la tecnologia SLA té uns molt bon acabats (tot i ser fabricació additiva), el motlle mecanitzat també té un bon acabat (afegint processos al full de ruta es podrien aconseguir millors en cas que fos necessari) i amb la tecnologia FDM tenim uns resultats acceptables.

El fet de que amb la tecnologia FDM es van sumant capes una sobre l'altre i cada capa es realitza en zig-zag afegint material des d'un extrusor, crea una rugositat força elevada. Tenint el coneixement com tenim de la tecnologia FDM, el motlle s'ha fabricat amb una alçada de capa de 0,06 mm (molt baixa) intentant aconseguir el millor acabat superficial possible sense haver de postprocessar la peça. Si haguéssim adquirit una alçada de capa major, la rugositat hauria estat més elevada encara.

ANNEX D

FABRICACIÓ MOTLLES

D.1 Motlle cavitats

Tal i com s'ha explicat anteriorment per realitzar els experiments amb la tècnica TPIF (two point incremental forming) es necessita tenir un motlle. Com que s'ha volgut treballar amb tecnologies de fabricació additives com poden ser la FDM, els motlles s'han fabricat amb impressores 3D. Ja que no és viable la fabricació d'un motlle el suficientment gros per poder-lo collar a la taula dinamomètrica que tenim instal·lada al centre de treball, s'ha optat per realitzar un motlle general amb quatre cavitats on aniran ubicats els motlles amb la geometria de la pròtesi impresos amb les impressores 3D. El motlle modular amb les quatre cavitats s'ha fet de Prolab 65. Les seves dimensions són d'acord el plànol nº2 motlle cavitats del document Plànols.

El motlle s'ha mecanitzat al centre de treball Deckel Maho DMC 64 V linear del taller de mecanització que disposa l'edifici PII de la Politècnica, al qual s'hi ha carregat el programa ISO realitzat prèviament amb softwares CAD/CAM com són el Solidworks i el Creo Parametric.

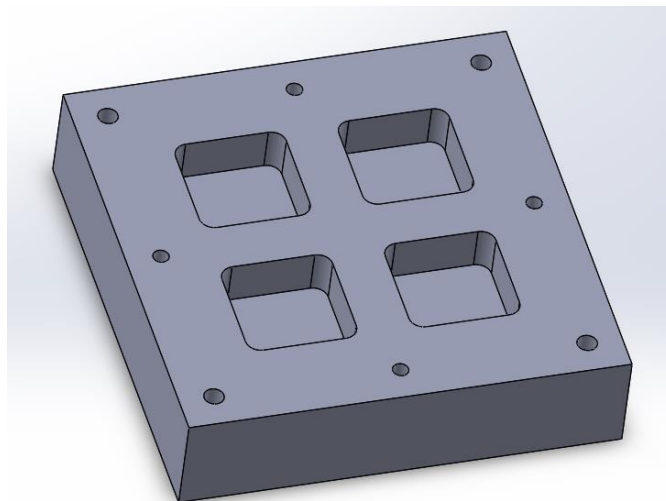


Figura 125 Creació i mecanització del motlle

Per a la fabricació s'ha seguit el següent full de ruta:

Taula 39 Full de ruta del motlle cavitats

FASE	SUBFASE	OPERACIÓ	DESCRIPCIÓ	EINA	N, rpm	VA, mm/min		
1 Fresa	1	11	Planejat	Plat d.63	1090	1960		
		12	Escairat	Fresolí d.16	8000	3000		
		13	Buidat	Fresolí d.16	8000	3000		
		14	Buidat	Fresolí d.10	6000	800		
		15	Buidat	Fresolí d.6	10000	3600		
		16	Centrat forats	Broca d.3,3	10000	1300		
		17	Foradat	Borca d.6	10000	860		
		18	Foradat	Broca d.3,3	6000	400		
		19	Desbast	Fresolí d.10	6000	800		
		20	Remecanitzat	Fresolí d.6	6500	3600		
		21	Fresat sup. Y	Fresolí bola d.4	6500	2540		
		22	Fresat sup. X	Fresolí bola d.4	6500	2540		
		2	22	21	Escairat	Fresolí d.16	8000	3000
				22	Buidat	Fresolí d.16	8000	3000
		3	31	31	Roscatge	Mascle M8	Manual	Manual

D.2 Insert pròtesi

Per fer els inserts que s'allotgen a les cavitats del motlle anterior, s'ha fet servir la tecnologia de fabricació additiva. El primer insert s'ha fet amb la impressora Ultimaker 3 amb el material PLA, amb una alçada de capa de 0,06 mm i un infill del 50%. El segon insert s'ha fet amb la impressora Form 2 de Formlabs amb una la resina rígida, una resina que conté reforços de fibra de vidre i expressa per realitzar peces d'alta rigidesa.

Les seves dimensions són d'acord el plànol nº4 insert del document Plànols. S'ha optat per fer els radis dels arrodoniments de les quatre cantonades majors que en el motlle de les cavitats per tal de facilitar la introducció de l'insert dins el motlle i també per facilitar-ne l'extracció. Els quatre forats que hi ha als extrems també són per ajudar a treure l'insert de motlle en cas que sigui necessari.

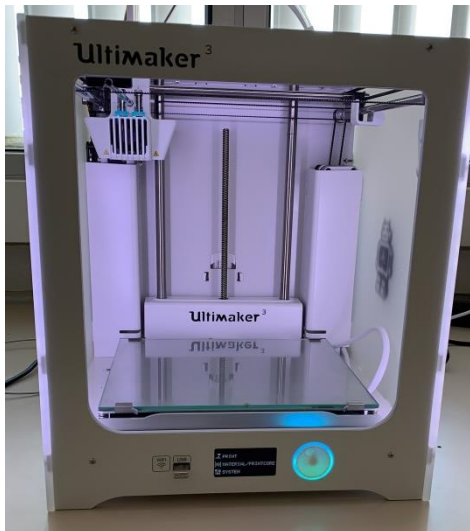


Figura 126 Impressora Ultimaker 3

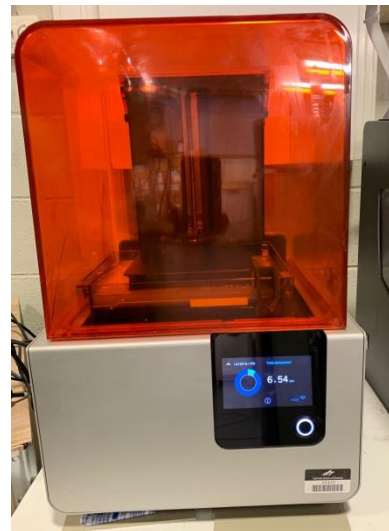


Figura 127 Impressora Form 2 Formlabs

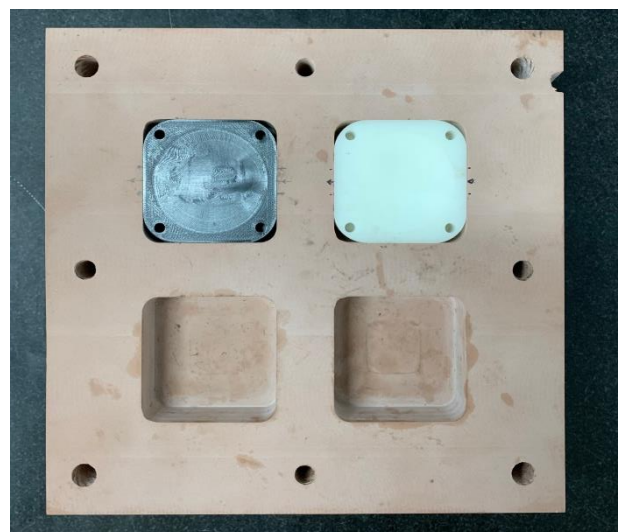
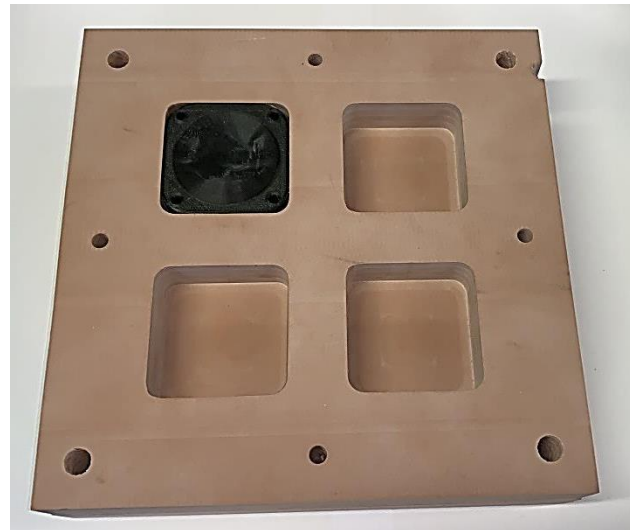


Figura 128 Inserts de PLA (negre) i de Resina Rígid (blanc) amb el motlle de cavitats

D.3 Motlle pròtesis

En aquest cas l'objectiu ha estat el de fabricar un motlle completament massís mecanitzant-lo per tal de poder comparar els resultats entre els motlles de fabricació additiva i un de mecanitzat. Igual que en el motlle de cavitats la idea és de realitzar quatre motlles de pròtesi mecanitzats dins un bloc de Prolab 65. Les dimensions del motlle són d'acord el plànol nº3 motlle de pròtesis del document Plànols.

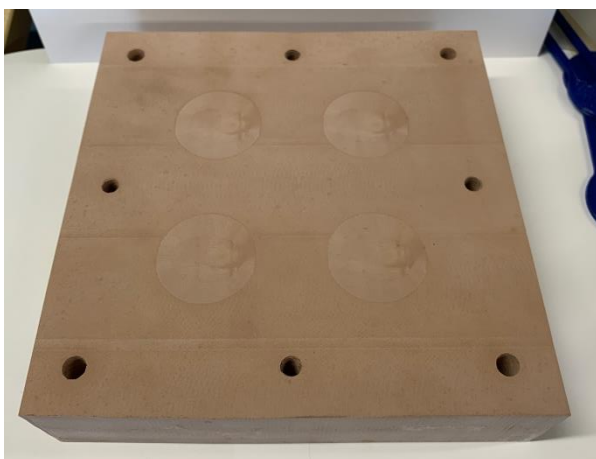


Figura 129 Motlle pròtesis



Figura 130 Motlle pròtesis detall unitat

Per a la fabricació s'ha seguit el següent full de ruta:

Taula 40 Full de ruta motlle pròtesis

FASE	SUBFASE	OPERACIÓ	DESCRIPCIÓ	EINA	N, rpm	VA, mm/min
1 Fresa	1	11	Planejat	Plat d.63	1090	1960
		12	Escairat	Fresolí d.16	8000	3000
		13	Buidat	Fresolí d.16	8000	3000
		14	Buidat	Fresolí d.10	6000	800
		15	Buidat	Fresolí d.6	10000	3600
		16	Centrat forats	Broca d.3,3	10000	1300
		17	Foradat	Broca d.6	10000	860
		18	Foradat	Broca d.3,3	6000	400
		19	Desbast	Fresolí d.10	6000	800
		20	Remecanitzat	Fresolí d.6	6500	3600
		21	Fresat sup. Y	Fresolí bola d.4	6500	2540
		22	Fresat sup. X	Fresolí bola d.4	6500	2540
	2	23	Escairat	Fresolí d.16	8000	3000
		24	Buidat	Fresolí d.16	8000	3000
	3	31	Roscatge	Mascle M8	Manual	Manual