



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria Mecànica**

**BRUNYIT ULTRASÒNIC DE PECES CÒNCAVES I CONVEXES  
D'ACER INOXIDABLE AISI 316L**



**Memòria i Annexos**

**Autor:** Jordi Escoda Fonollosa  
**Director:** Ramón Jerez Mesa  
**Convocatòria:** Juny 2017



## Resum

El brunyit és un procés d'acabament per a peces mecanitzades de metall, consisteix en aconseguir una acabat superficial millor mitjançant una pressió constant sobre la superfície exterior d'una peça mitjançant una eina de brunyit amb una bola de contacte d'acer endurit.

La pressió que exerceix la bola d'acer endurit 100Cr6 (57-66HRC) sobre la superfície acompanyada de la seqüència de moviments en l'eix y i l'eix x aconsegueix enfonsar les crestes més altes generades pel mecanitzat previ i a la vegada s'empeny el material a les valls per que la rugositat sigui menor a l'anterior, amb això la superfície cada vegada és més plana.

Amb aquest treball s'ha buscat un punt més de dificultat ja que s'ha utilitzat un material més dur, un acer inoxidable, i amb una rugositat inicial molt precària, a més a més, no s'ha treballat en superfícies planes sinó que s'ha utilitzat una superfície còncava formada per dos radis, un de 50 mm i un altre de 100 mm i una altra superfície convexa formada pels mateixos radis.

Una de les causes de brunyir un material en un acabat tant precari es podia veure durant els moviments generats en l'eix y, com la bola pujava i baixava en cada pic de la rugositat, això significava calor que s'acumulava a la bola d'acer endurit, que quan s'acabava el procés estava a una temperatura considerable.

En la part pràctica del TFG s'han agafat diferents paràmetres per veure quina influència tenen en el brunyit els paràmetres són la força, l'amplitud d'ona i el radi de la superfície.

## Resumen

El bruñido es una mejora del acabado superficial. Consiste en conseguir un acabado superficial mejor mediante una presión constante sobre la superficie exterior de una pieza mediante una herramienta de bruñido constituido por una bola de contacto fabricada de acero endurecido.

La presión que ejerce la bola de acero endurecido 100Cr6 (57-66HRC) sobre la superficie acompañada de la secuencia de movimientos en el eje y el eje x consigue bajar las crestas más altas generadas por el mecanizado previo y a la vez poner material en los valles para conseguir una rugosidad menor a la anterior, conseguimos una superficie cada vez más plana.

Con este trabajo se ha buscado un punto más de dificultad porque se ha utilizado un material más duro como son los inoxidable y con una rugosidad inicial muy precaria, además no se ha trabajado sobre una superficie plana sino que se ha utilizado una superficie cóncava formada por dos radios uno de 50 mm y otro de 100 mm, y con otra superficie convexa formada por los mismos radios.

Una de las causas de bruñir un material con un acabado tan precario se podía ver durante los movimientos en el eje y como la bola subía y bajaba en cada rugosidad, eso significaba calor que se acumulaba en la bola de acero endurecido, que cuando se terminaba el proceso estaba a una temperatura considerable.

En la parte práctica de TFG se han cogido diferentes parámetros para ver que influencia tienen en el bruñido los parámetros son fuerza, amplitud de onda y el radio de la superficie.

## Abstract

The ball-burnishing is a finishing touch process for machining metal pieces, which is to achieve a better surface finish using a constant pressure on the piece outer surface with a burnishing tool with a hardened steel ball contact.

The pressure from the hardened steel 100Cr6 (57-66HRC) ball on the surface in top if the sequence of movements in the axis y and x axis helps to get the highest ridges generated by pre-machining dented and simultaneously push the material in the valleys so that roughness is less than the each time and, the surface becomes more flat.

The approach of this project is to look for a further step using a harder material: a stainless steel with a very low initial roughness, Also, it has not been worked on flat surfaces but worked on a concave surface with two radius, one 50 mm and one 100 mm and one convex surface with by the same radio.

One of the causes of burnishing material with such a precarious finish could be found out during the movements generated in the y-axis and how the ball went up and down each roughness peak so this meant heat accumulation on the ball of hardened steel, which when the process finished it was really hot.

During the experimental part of this project there have been taken different settings to check what influence the parameters have in the burnishing. Parameters have been force, the wavelength and the radius of the surface.

## Agraïments

En primer lloc, m'agradaria donar les gràcies al director d'aquest projecte Ramón Jerez Mesa per ensenyar-me i explicar-me tots els dubtes que m'han anat sorgint al llarg d'aquest treball, també agrair-li que tot hi estar molt enfeinat, els moments que ha buscat, per poder seguir endavant sense pausa. També m'agradaria agrair als professors José Antonio Travieso Rodríguez i Jordi Lluma Fuentes per la ajuda rebuda, ja sigui en la part pràctica o donant-me consells per poder buscar dades per a la memòria.

També m'agradaria donar les gràcies als meus amics de la universitat, perquè com ells ja havien passat per aquesta fase, m'han donat consells que crec que són molt importants, i als meus amics de tota la vida perquè com els vaig dir, durant aquest temps, no els podria prestar l'atenció que necessitaven.

Per últim, però no menys important donar les gràcies a la meva família per la paciència que han tingut, ja que aquest període de temps no ha sigut com havia de ser, i perdonar-me el suport que he necessitat. També, a la meva parella per l'ajut que m'ha suposat tot i no haver-li donat l'atenció que mereixia. I als meus caps, per proporcionar-me informació tècnica.

## Glossari

$R_a$	Rugositat superficial mitja aritmètica.
$R_t$	Rugositat màxima total en la longitud de avaluació.
HV	Duresa en l'escala Vickers.
HBN	Duresa en l'escala Brinell.
G54	Compensació en els desplaçaments.
G00	Posicionament punt a punt.
G1	Interpolació lineal recta.
G2	Interpolació circular en el sentit de les agulles del rellotge.
G3	Interpolació circular en el sentit contrari de les agulles del rellotge.
G43	Correcció longitudinal de l'eina.
G90	Programació en mesures absolutes.
G91	Programació en mesures incrementals o relatives.
G25	Repetició de línies de programa.
G41	Correcció de l'eina radialment.
G40	Anul·lació de correcció de l'eina radialment.
M3	Rotació del capçal en sentit de les agulles del rellotge.
M8	Connexió refrigerant.
M5	Parada de la rotació del capçal.
M9	Desconnexió del refrigerant.

# Índex

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>IV</b>
<b>GLOSSARI</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDEX DE TAULES I FIGURES</b>	<b>VIII</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>X</b>
1.1. Origen del treball .....	x
1.2. Motivació .....	xi
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>13</b>
2.1. Objectius del treball.....	14
2.2. Abast del treball.....	15
2.3. Descripció del procés de brunyit amb bola segons la bibliografia .....	15
<b>3. METODOLOGIA DE TREBALL</b>	<b>18</b>
3.1. Disseny de l'experiment .....	18
3.2. Mecanitzat de les peces de treball.....	20
3.3. Brunyit de les peces .....	23
3.4. Mesura de la rugositat superficial .....	26
3.4.1. Avaluació dels resultats .....	27
3.5. Mesura de la duresa superficial .....	30
3.5.1. Avaluació de resultats per a petjades de 500 g de pes en l'indentació .....	32
3.5.2. Avaluació de resultats per a petjades de 25 g de pes en l'indentació .....	35
<b>4. ANÀLISI DE RESULTATS</b>	<b>38</b>
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>45</b>
<b>PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMIC</b>	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>49</b>
A1. FULLES DE RUTA TECNOLÒGICA.....	51
A2. MECANITZAT DE LES PECES DE TREBALL.....	59



A3.	PROGRAMA DE LES PECES A BRUNYIR .....	60
A4.	PLÀNOLS PECES .....	62

## Índex de Taules i Figures

Figura 2. 1 Esquema explicatiu del procés de brunyit	13
Figura 2. 2 Esquema explicatiu del procés de brunyit	16
Figura 2. 3 Representació gràfica d'una superfície amb petjades de brunyit	17
Taula 3. 1 Factors i nivells inclosos al disseny de l'experiment.	18
Taula 3. 2 Ordre seguit en el brunyit de les petjades de l'experiment	18
Taula 3. 3 Disseny de l'experiment complet	19
Figura 3. 1 Posició de les mordasses	21
Figura 3. 2 Gràfic generat per la fresadora de CNC	23
Figura 3. 3 Posicionament de la peça i l'eina per fer el brunyit	24
Figura 3. 4 Estacada de la peça convexa	24
Figura 3. 5 Mostra de peça còncava amb 18 petjades brunyides	25
Figura 3. 6 Rugosímetre Mitutoyo SJ210	26
Figura 3. 7 Rugosímetre Mitutoyo fixat al rosset	26
Figura 3. 8 Rugositat mitjana $R_a$ per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 50 mm	27
Figura 3. 9 Rugositat mitjana per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 100 mm	28
Figura 3. 10 Rugositat mitja per a la peça convexa, per petjades en superfície radi 100 mm	29
Figura 3. 11 regla per graduar l'ull.	30
Figura 3. 12 representació d'una indentació	30
Figura 3. 13 duròmetre buehler 5114 utilitzat per l'experiment.	31
Figura 3. 14 indentador piramidal vickers amb un angle base $136^\circ$	31
Figura 3. 15 Duresa mitja per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 50 mm	32
Figura 3. 16 Duresa mitja per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 100 mm	33
Figura 3. 17 Duresa mitja per a la peça convexa, per petjades en superfície radi 100mm	34
Figura 3. 18 Duresa mitja per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 50 mm	35
Figura 3. 19 Duresa mitja per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 100 mm	36
Figura 3. 20 Duresa mitja per a la peça convexa, per petjades en superfície radi 100 mm	37
Figura 4. 1 Comparació de la rugositat superficial $R_a$	38
Figura 4. 2 Gràfica d'efectes mitjans dels paràmetres dels DOE sobre la $R_a$	38
Figura 4. 3 Comparació de la rugositat superficial $R_t$	39
Figura 4. 4 Gràfica d'efectes mitjans dels paràmetres dels DOE sobre la $R_t$	39
Figura 4. 5 Comparació de duresa per indentacions de 500 g	40
Figura 4. 6 Gràfica d'efectes mitjans dels paràmetres dels DOE sobre la HV 500 g	41
Figura 4. 7 Comparació de duresa per indentacions de 25 g	42
Figura 4. 8 Gràfica d'efectes mitjans dels paràmetres dels DOE sobre la HV 25 g	42
Taula 4. 1 Taula de l'experiment dissenyat i resultats obtinguts de la rugositat i duresa	43



# 1. Prefaci

Aquest treball consisteix en l'últim pas per poder aconseguir el títol de grau en enginyeria mecànica. En aquest treball es poden veure els efectes que causa una operació de brunyit sobre una superfície prèviament mecanitzada, amb diferents formes i radis de curvatura.

Els efectes del brunyit depenen dels paràmetres seleccionats per a l'execució del procediment. De tots aquests factors, hi ha alguns que exerceixen una major influència sobre els resultats, com podria ser la força que exerceix la bola sobre el material. En aquest treball, s'empra una eina de brunyit que permet executar el procés amb vibracions. Així, un altre paràmetre que influeix sobre els resultats i que s'estudia en aquest TFG és l'amplitud de la vibració de la bola que deforma. Al llarg del treball, es podrà veure i entendre millor de quina manera influeixen aquests paràmetres entre altres, i s'avaluen els resultats en termes de rugositat superficial i microduresa.

## 1.1. Origen del treball

Pels meus estudis previs a la carrera i els treballs obtinguts, vaig decidir optar per un treball de final de grau del sector dels mecanitzats, ja que es el sector on tinc més coneixements tècnics.

En primer lloc, com he comentat, jo estic acostumat a mecanitzar peces amb una fresadora de control numèric diàriament. Per aquest motiu, em vaig plantejar treballar amb una superfície que tingués dos radis diferents, així, innovàriem en el brunyit. A la nostra universitat, únicament el Doctor José Antonio Travieso havia fet anteriorment un estudi relacionat amb peces de forma complexa. Aquesta experiència prèvia ens va permetre abordar el brunyit de peces còncaues i convexes, i comparar els resultats amb els obtinguts als esmentats treballs previs. Tot l'experiment es va dur a terme al taller de la universitat.

Per això, es van mecanitzar dues peces d'acer d'inoxidable L316 en forma còncaua i convexa. Sobre aquestes peces, es va executar un brunyit amb diferents paràmetres emprant un disseny experimental factorial complet.

## 1.2. Motivació

L'haver cursat la formació professional de producció per mecanització i haver-me dedicat professionalment al món dels mecanitzats de peces complexes, per fresadora de control numèric, ha portat a que em cridés l'atenció aquest projecte sobre el brunyit ultrasònic de peces còncaves i convexes d'acer inoxidable, ja que s'utilitza la mateixa maquinària per desenvolupar aquest procés.

Amb els meus coneixements pels mecanitzats podria veure com millora l'acabat superficial d'una peça brunyint-la, saber els temps que pot emprar brunyir una superfície, veure les forces més adients per a treballar un inoxidable 316L, si millora l'acabat amb vibracions o empitjora i de quina manera influeix el radi de la peça.



## 2. Introducció

L'acabat que ens proporciona una peça mecanitzada per una fresadora de control numèric, en les condicions de treball òptimes, és adequat. Tot i així, la rugositat superficial pot caracteritzar a la peça d'unes propietats incorrectes per a la seva funció, per aquest motiu s'estudien les propietats que pot aportar el brunyit a una peça. Les propietats que es poden millorar a través d'aquest procés són reduir la rugositat superficial i aconseguir una duresa exterior per a la deformació plàstica en fred.

El brunyit consisteix a aconseguir un acabat superficial de major qualitat, mitjançant una pressió constant sobre la superfície exterior d'una peça amb la utilització d'una eina de brunyit amb una bola de contacte d'acer endurit.

La pressió que exerceix la bola d'acer endurit sobre la superfície acompanyada de la seqüència de moviments en l'eix y i l'eix x aconsegueix enfonsar les crestes més altes generades pel mecanitzat previ i, a la vegada, ficar material a les valls perquè la rugositat sigui menor.

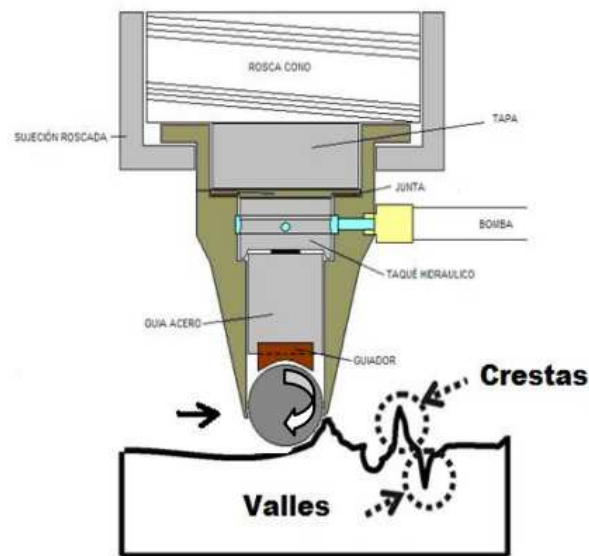


Figura 2.1 Esquema explicatiu del procés de brunyit

En aquest treball s'utilitza un material inoxidable, amb una rugositat inicial molt precària, la seva superfície està constituïda per una part còncava i una convexa.

El brunyir un material amb un acabat tan precari genera uns moviments en la bola de pujada i baixada en cada rugositat. Això significa que s'acumula calor a la bola d'acer endurit i li redueix la vida útil.

## 2.1. Objectius del treball

**Objectiu general** Estudiar els efectes del brunyit assistit per vibracions sobre peces d'acer inoxidable prèviament mecanitzades amb formes geomètriques complexes.

### Objectiu secundaris

1. Dissenyar el procés de fabricació de peces còncaues i convexes amb diferents radis sobre un bloc d'acer inoxidable 316L.
2. Trobar els valors de forces adequades per treballar un inoxidable amb el brunyit amb bola, aconseguint la deformació plàstica necessària per a aquest procés.
3. Fixar uns paràmetres d'amplitud d'ona per poder realitzar els diferents experiments, per tal de verificar la influència que tenen les vibracions en l'acabat obtingut.
4. Dissenyar la ruta del brunyit òptima tenint en compte les limitacions que hi generen els radis convexos i còncaus.
5. Fixar un valor entre passades en l'eix x per tal de poder realitzar els diferents experiments.
6. Buscar el valor en l'eix z, saben que depèn del radi i del valor fixat en la passada.
7. Buscar els valors de les rugositats obtingudes en cada petjada per tal de poder estudiar-les.
8. Buscar els valors de les dureses obtingudes en cada petjada per tal de poder estudiar-les. Verificar com influeix el brunyit en les superfícies convexes o còncaues.



## 2.2. Abast del treball

En aquest treball s'inclou les següents parts.

1. Dissenyar un programa de control numèric, amb llenguatge Fagor, per brunyir nou petjades per superfície, posteriorment estudiar com influencien els paràmetres fixats des d'un principi.
2. Buscar tres valors de forces que ens doni per aconseguir una deformació plàstica en la superfície exterior per començar amb l'estudi.
3. L'estudi del brunyit es realitza sobre superfícies convexes i còncaves per tant s'ha d'analitzar de quina manera influencia que el radi sigui convex o còncau.
4. Analitzar de quina manera influeix el valor del radi a l'hora de brunyir, ja que el projecte consta de diferents valors de radis
5. Estudiar com afecta si hi ha o no amplitud d'ona.
6. Mesurar la rugositat de cada petjada i comparar segons els seus paràmetres les millores que hi ha respecte a les altres, per tal d'obtenir el millor brunyit possible amb els paràmetres estudiats, i veure com afecta cada paràmetre individualment.

## 2.3. Descripció del procés de brunyit amb bola segons la bibliografia

Els efectes sobre el brunyit es van començar a investigar fa molts anys, el brunyit és un procés d'acabament per efecte d'una bola d'acer endurit (Figura 2.1). Segons Adel Mahmood i Sulieman (1999) [1] arriben a la conclusió de què fins al moment s'havia treballat poc per saber els efectes beneficiosos que produïa el brunyit sobre les superfícies, en un treball posterior Adel Mahmood y Sulieman (2000) [2] va investigar els efectes que causava la rugositat de la superfície abans del processat de brunyit, sobre l'acabat després del brunyit, els experiments es van realitzar en peces de bronze, les conclusions obtingudes pels autors conclouen afirmant que com més augmenta la rugositat de la superfície mecanitzada, la rugositat del brunyit tindrà una rugositat també més gran.

Liu Lucas (2002) [3] presenta la seva tesi doctoral, en la que treballa amb peces d'acer dur mecanitzades a torn, a la vegada que obtenen un model que prediu el comportament de la superfície, a través dels mètodes d'elements finits. Fang-Jung Shiou i Chien-Hua Chen (2003) [4] els seus autors sotmeten a estudi quatre paràmetres que consideren especialment significatius: el material de la bola, l'amplada de la passada lateral, la força i l'avanç.

Michael J. Shepard (2003) [5] presenta un article en el qual s'analitza el comportament a fatiga de peces de la indústria aeronàutica de titani, sobre les que s'havia fet tres tractaments el brunyit amb bola, la granallada i l'electropolit. Ainocha Celaya (2009) [6] va desenvolupar un model que prediu els resultats de rugositat superficial i tensions residuals obtingudes en les peces després del procés de brunyit mentre que Feng Lei Li (2010) [7] elabora un model analític per preveure el comportament de les deformacions i la rugositat total de  $R_t$ , utilitzant una ferramenta de brunyit òptima per a torn.

M. Salahshoor i Y. B. Guo (2012) [8] aporta una nova visió a l'estudi de la deformació plàstica generada després del procés de brunyit,

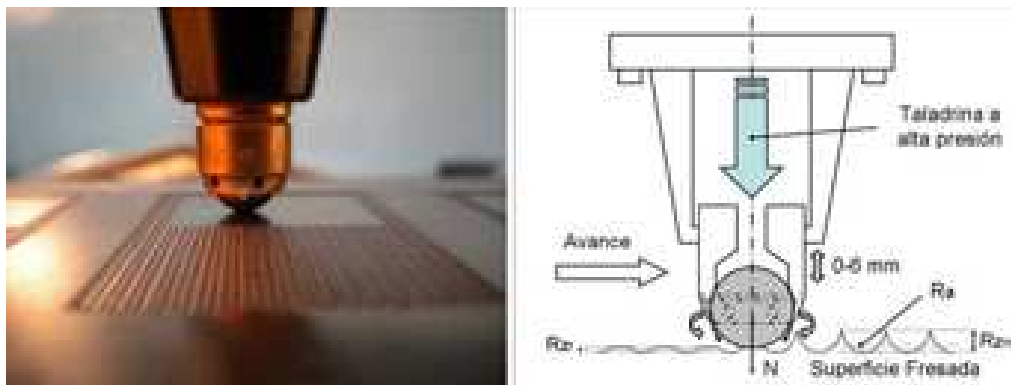


Figura 2. 2 Esquema explicatiu del procés de brunyit

El mecanitzat de superfícies complexes ocupa un paper molt important en el procés d' introduir nous productes al mercat. La gran varietat de productes, des de matrius per a la indústria de l'automòbil, fins els àleps de turbines, presenten superfícies complexes. Aquests tipus de superfícies es solen mecanitzar en màquines multi eix. Entre els diferents tipus de tractaments mecànics superficials existeix, el brunyit en bola, que proporciona un excel·lent acabat superficial i una millora de les propietats físic-mecàniques.

El brunyit és una operació senzilla de baix cost, que genera una superfície final de gran qualitat. En aquest sentit pot arribar a substituir processos d'acabat com el rectificat, el shot peening o el polit a mà. Aquest procés es pot aplicar directament a màquines multitasques.

El procés consisteix a provocar una petita deformació plàstica en la superfície de la peça, d'aquesta forma es genera una capa de metall consolidada que pot arribar a un gruix de 2 fins a 10  $\mu\text{m}$ .



*Figura 2. 3 Representació gràfica d'una superfície amb petjades de brunyit*

La força de brunyit provoca els efectes següents en la superfície:

- Millora de manera significativa l'acabat superficial, és a dir, redueix la rugositat superficial en més d'un orde de magnitud.
- L'acabat del brunyit és de l'ordre del rectificat.
- La deformació plàstica genera tensions residuals de compressió en la superfície de la peça, la qual cosa és beneficiós de cara el comportament a fatiga que suporta la peça en la seva vida útil.
- L'absència de calor en el brunyit evita canvis metal·lúrgics en la peça.
- Augmenta la duresa superficial de la peça entre un 30-60% HBN en acers comuns i entre 180-250 HBN en acers d'elevada duresa.

### 3. Metodologia de treball

#### 3.1. Disseny de l'experiment

De tots els paràmetres del brunyit que influeixen en el resultat, s'ha decidit escollir com a factors d'estudi la força, l'amplitud d'ona i el radi de curvatura. S'han triat 3 forces, 3 amplituds d'ona i 4 radis diferents, a més, per assegurar un nivell de brunyit òptim s'han fet 3 repeticions en cada petjada. Això equival a 9 petjades en cada radi.

Factor	Nivells
Amplitud d'ona (A)	0 – 50% - 100%
Força (F) (N)	100 - 200 – 300
Radi de curvatura (R) (mm)	50 - 100 - -100 - -50

Taula 3. 1 Factors i nivells inclosos al disseny de l'experiment.

L'angle que formen la bola d'acer endurit i el fixament de la bola és de 30°, qualsevol angle superior tocarà el fixament i podria trenca l'eina de brunyir. Per aquest motiu s'ha descartat l'experiment amb un radi de 50 convex.

Ara, aquest disseny es correspon amb un disseny d'experiments factorial complet ( $3^3$ ).

F (N)	Radi 100 còncav	Radi 50 còncav	Radi 100 convex
100	A = 0%	A = 0	A = 0
	A = 50%	A = 50%	A = 50%
	A=100%	A = 100%	A = 100%
200	A = 0	A = 0	A = 0
	A = 50%	A = 50%	A = 50%
	A = 100%	A = 100%	A = 100%
300	A = 0	A = 0	A = 0
	A = 50%	A = 50%	A = 50%
	A = 100%	A = 100%	A = 100%

Taula 3. 2 Ordre seguit en el brunyit de les petjades de l'experiment

#	F (N)	A (%)	R (mm)
1	100	0	Radi 100 convex
2	100	0	Radi 50 còncav
3	100	0	Radi 100 còncav
4	100	50	-100
5	100	50	50
6	100	50	100
7	100	100	-100
8	100	100	50
9	100	100	100
10	200	0	-100
11	200	0	50
12	200	0	100
13	200	50	-100
14	200	50	50
15	200	50	100
16	200	100	-100
17	200	100	50
18	200	100	100
19	300	0	-100
20	300	0	50
21	300	0	100
22	300	50	-100
23	300	50	50
24	300	50	100
25	300	100	-100
26	300	100	50
27	300	100	100

Taula 3. 3 Disseny de l'experiment complet

## 3.2. Mecanitzat de les peces de treball

Partint de dos blocs d'inoxidable de 101 x 75 x 25 mm, pel fet que la longitud de mecanitzat és tant llarga per a reduir costos en la producció, es comprarà una fresa de plaquetes de  $\varnothing$  25, que ens permeti mecanitzar tota la longitud d'una estacada. La màquina utilitzada per aquest tipus de feina és una fresadora de control numèric de tres eixos, o un centre de mecanitzat també de tres eixos.

Per poder desenvolupar aquesta feina es necessitaran les següents màquines i eines:

- Fresadora de control numèric (CNC).
- Una mordassa estacada a la taula de la fresadora.
- Comparador amb suport magnètic.
- Dos regles rectificats a la mateixa mesura.
- Una mordassa petita.
- Una fresa de plaquetes  $\varnothing$  100 de metall dur.
- Una fresa de plaquetes  $\varnothing$  25 de metall dur.
- Plaquetes per mecanitzar l'inoxidable.
- Fresa de metall dur  $\varnothing$ 12.
- Una ballarina.
- Llima per treure les rebaves.

El primer pas per poder mecanitzar les peces és estudiar el plantejament més adient. Aconseguint el millor acabat possible de la manera més eficient, es redueix al màxim el temps improductiu.

Es disposa de les eines nombrades anteriorment. Llavors es pot començar a desenvolupar el programa de CNC per tal de donar forma a les peces. Una vegada escrit tot el programa, per tal de corroborar que no hi hagi cap error, es passa el programa a la fresadora de control numèric i s'executa amb el mode gràfic. Així, es comprova que tots els moviments són correctes i les cotes també.

En cas d'haver-hi errors, es modificarà la part deficient del programa i encara que es pensi que està bé, s'ha de tornar a passar pel gràfic per comprovar que tot és correcte. Aquesta repetició sembla

una pèrdua de temps, però d'aquesta manera es pot prevenir un accident, ja que en aquestes màquines un accident pot esdevenir una reparació molt costosa, o en el pitjor dels casos, pot provocar lesions en l'operari que estigui manipulant la fresadora.

Una vegada verificat el correcte funcionament, és pot executar el programa, és recomanable que a la primera peça o operació es tingui la mà en el potenciòmetre per qualsevol situació inesperada, així es pot reaccionar ràpidament.

El primer que es farà serà fixar la mordassa a la taula i amb un comparador ajustar-la bé als moviments que després farà la fresadora. El comparador és per assegurar que la galtera fixa de la mordassa està posicionada paral·lela al eix x.

Una vegada estacada es posicionen els dos regles entre les galteres de la mordassa i s'estaca el tac per garantir les mides que es necessiten, a través de quatre planejats i dos perfilats per garantir la longitud total.

Es col·loca l'eina de plaquetes  $\varnothing$  100, amb plaquetes per acer inoxidable i es dona una passada just net a la primera cara. Tot seguit, es gira la peça 90 graus i es realitza el mateix procediment. Després, es mecanitzen les dues cares restants deixant-les amb les mides requerides pels plànols, annex 4 s'introdueix una fresa de  $\varnothing$  12 de metall dur, s'estaca la peça a la mordassa de manera que sobresurti uns 5 mm la peça de les galteres de la mordassa i així es pot realitzar el perfilat d'una passada. Es rebaixa la meitat de l'excident que hi ha en la longitud del tall de serra i es garanteix un bon acabat. Després es gira la peça 180 graus i es realitza una passada igual per garantir la longitud requerida.

Una vegada es tenen les mides exteriors de tota la peça, es fiquen els regles entre les galteres de la mordassa i a sobre s'estaca la mordassa petita garantint que la peça quedarà perpendicular a la taula, així s'estaca la peça a la mordassa petita.



Figura 3. 1 Posició de les mordasses

Es busquen els orígens de coordenades amb la ballarina, i s'introdueixen a la fresadora. Com s'ha comprat una fresa especial que permet mecanitzar els 100 mm de longitud, hi ha un estalvi de temps considerable, ja que es fa tot el mecanitzat per donar la forma còncava o convexa en una sola estacada.

A continuació s'explicarà el programa de control numèric en paraules per aquelles persones que els hi pugui interessar, i no tinguin els coneixements requerits per a entendre el llenguatge de CNC. El codi complet s'adjunta a l'annex 2.

En el primer pas se li diu a la fresadora de control numèric que busqui els orígens que se li han introduït a la seva base de dades, per tal de poder mecanitzar respecte als orígens de màquina. Tot seguit s'indica l'eina en la qual ha de treballar, tot això per aconseguir que la fresadora treballi amb els paràmetres introduïts prèviament, així l'eina treballa en les condicions que requereix el procés. Uns exemples serien el radi de l'eina, la longitud i el nombre de llavis entre altres.

En la N30 se li demana que treballi en coordenades absolutes, des de l'origen introduït anteriorment s'afirma la longitud de l'eina, la velocitat d'avanç que li correspon i la velocitat de gir, que en el cas de la fresa de  $\varnothing$  25 per inoxidable la velocitat d'avanç és de 200 mm/min amb una velocitat de gir 1000 rpm en sentit horari.

Es desplaça l'eina a les coordenades indicades, baixa de manera ràpida a una proximitat controlada de la peça, tot seguit torna a baixar de manera lenta a l'altura de la peça, i amb coordenades incrementals profunditza el valor de passada, posteriorment torna a coordenades absolutes i agafa la compensació amb el radi de l'eina. Aquests passos, depenent si la peça és còncava o convexa, el radi de 50 mm el farà en un sentit o un altre, a continuació el radi de 100 mm, després un tros pla i finalment torna a fer el radi de 100 mm i el radi de 50 mm. Després descompensa l'eina i va a la posició inicial de mecanitzat, es repeteix el procediment 74 cops fins a arribar a la profunditat de 100,64 mm. Després tots els moviments són amb G00, és ha dir, la velocitat més ràpida possibles. Per acabar, puja l'eina per tenir la mobilitat total de la taula i posicionar la peça mecanitzada a l'abast del operari per substituir-la.



### 3.3. Brunyit de les peces

S'ha escrit un programa de de control numèric per a un centre de mecanitzat amb llenguatge Fagor, amb la finalitat de programar les trajectòries de l'eina de brunyir.

Quan es disposa a fer la part pràctica, primer s'ha de passar el programa a la fresadora de control numèric, per tal de realitzar una simulació del procés, es visualitza el gràfic i s'analitzen els moviments de la taula en els eixos x i y. Per garantir que són correctes i evitar qualsevol accident, una vegada corregits els possibles errors, s'estaca bé la peça amb la massa de plàstic, per garantir que la peça assenta degudament sobre els regles rectificats. Busquem els orígens amb la ballarina i és galga l'eina en l'eix z sobre la superfície, finalment s'introdueixen les coordenades a brunyir en la base de dades.



Figura 3. 2 Gràfic generat per la fresadora de CNC

És puja l'eina i s'acciona el programa amb l'eina de brunyir, es repeteix el procés 3 vegades per petjada. Una vegada feta la primera petjada amb les 3 repeticions és modifica l'origen en l'eix y 10 mm per poder fer la següent petjada sense tocar l'anterior. Es modifiquen els paràmetres que li pertoquin a la següent petjada, i així fins a fer totes les petjades segons la taula 3.2.



*Figura 3.3 Posicionament de la peça i l'eina per fer el brunyit*

En primer lloc és faran les petjades còncaues en la superfície de radi 100 mm, ja que estan en el punt més elevat de la peça, l'experiment es podrà realitzar sense cap problema ja que l'angle que forma l'eina de brunyir es superior al de la peça. Tot seguit és desenvoluparà el mateix plantejament, per fer les petjades en la superfície de radi 50 mm, però s'haurà de fer amb una mica de cura, ja que no tota la superfície de 50 mm de radi ens permet desenvolupar el procés. La superfície a brunyir esta situada en els punts més elevats, d'aquesta forma l'eina de brunyit treballarà correctament en aquest procés .



*Figura 3.4 Estacada de la peça convexa*

El funcionament de l'eina de brunyit consisteix en que la bola d'acer endurit toqui la peça exercint una força constant durant els seus desplaçaments. El conjunt de la força i el desplaçament deforma plàsticament el material dels pics més elevats i aquest material deformat es posiciona en les valls per tal d'aconseguir una superfície més homogènia. Com es pot apreciar a la figura 2.3, a l'aconseguir aquesta deformació plàstica en fred, el que succeeix és un enduriment en la capa exterior.

Es parteix d'una hipòtesi per fer les petjades de brunyit de la qual els moviments que es faran són:

- es profunditza en l'eix z
- 8 mm en l'eix y
- 0,3 mm en l'eix x
- torna a profunditzar en l'eix z
- torna a la coordenada origen de l'eix y
- 0,3 en l'eix x

Aquest cicle es repetirà fins arribar a la cota de 8 mm en l'eix x. S'ha partit d'aquesta hipòtesi pel simple fet que és la que l'eina tindrà sobre ella menys esforços, i també, per prevenció d'accidents ja que mentre està brunyint no varia la cota en l'eix z.



*Figura 3. 5 Mostra de peça còncava amb 18 petjades brunyides*

Com s'ha indicat anteriorment el codi de control numèric s'ha desenvolupat d'aquesta manera pel motiu de donar-li la màxima vida útil a l'eina de brunyir, perquè tingui menys probabilitats d'accidents, i es deformi per flexió el mínim possible durant el brunyit.

### 3.4. Mesura de la rugositat superficial

Per analitzar les propietats de rugositat de les superfícies brunyides, es va emprar un rugosímetre de contacte Mitutoyo SJ210 (Figura 3.6).



Figura 3. 6 Rugosímetre Mitutoyo SJ210



Figura 3. 7 Rugosímetre Mitutoyo fixat al rosset

Per tal d'estudiar com afecta la rugositat superficial del brunyit segons els paràmetres amb els quals s'han brunyit les petjades, s'ha optat apuntar 10 mesures per petjada, tant de  $R_a$  que és la rugositat superficial mitjana aritmètica com  $R_t$  que és la rugositat màxima total en la longitud avaluada. Quan es tenen les 10 mesures es revisen els valors, i en cas d'haver alguns valors que sobresurtin de la mitja, aquest s'eliminen i és torna a prendre mesures fins tenir 10 mesures correctes.

La mesura de la rugositat s'ha pres amb el rugosímetre, la longitud base "cut-off" ha estat de 0,8 mm però com en realitat ho fa 5 vegades, la mesura d'avaluació total ha estat de 4 mm. La velocitat amb la qual el rugosímetre ha palpejat la rugositat es de 0,5 mm/s.

La direcció en la que és calcula la rugositat és la mateixa en la qual s'ha brunyit, al haver un radi el palpador no pot fer-se una mesura correcta de cap altra manera. Després, amb aquests conjunts de mesures es va calcular la mitjana aritmètica per obtenir un valor mig de la rugositat, que representa l'estat superficial després de brunyir.

### 3.4.1. Avaluació dels resultats

Per poder avaluar els resultats, primer s'han d'analitzar les 9 petjades de cada superfície individualment, comprovant com afecten els paràmetres de força i amplitud d'ona. Una vegada analitzades les tres superfícies es passa a comparar-les per veure com afectat el valor del radi i si es convex o còncav.

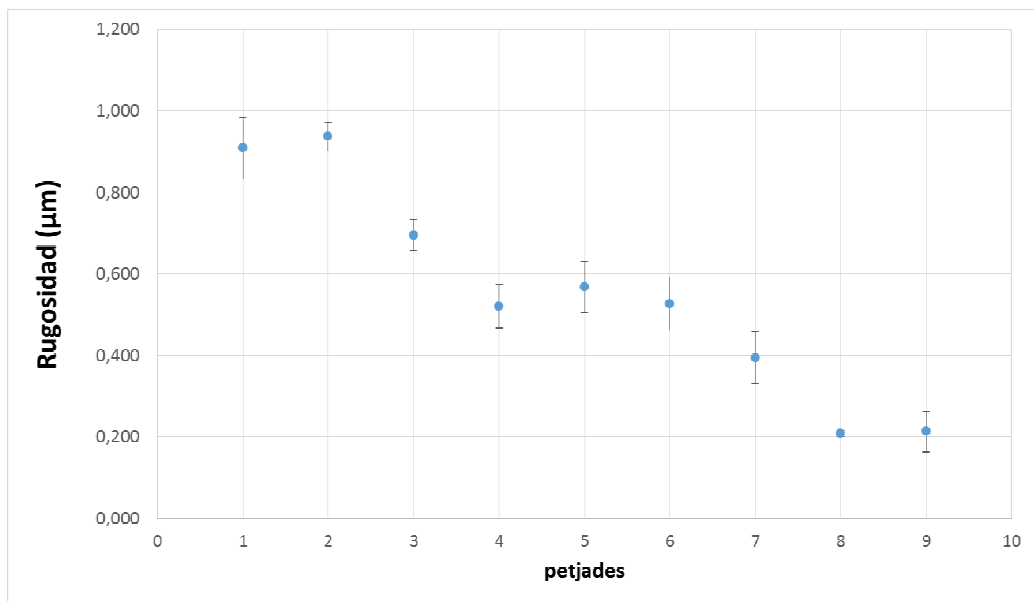


Figura 3. 8 Rugositat mitjana  $R_a$  per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 50 mm

Es pot veure com en les tres primeres petjades, que corresponen a la força de 100 N, la rugositat es de 0,9  $\mu\text{m}$  en el procés sense vibracions o amb el 50% de l'amplitud gairebé no hi ha variació, en canvi, es redueix significativament al aplicar el 100% d'amplitud d'ona fins a un valor de 0,7  $\mu\text{m}$ .

En passar a una força de 200 N hi ha una variació més gran ja que passa a tenir un valor aproximat de rugositat de 0,5  $\mu\text{m}$ , però en aquest cas la rugositat no varia gaire en canviar-li l'amplitud d'ona.

Al aplicar una força de 300 N hi ha una millora en la rugositat ja que s'aconsegueix una rugositat de  $0,4 \mu\text{m}$ , en un procés de brunyit sense vibracions però al aplicar les vibracions hi ha una millora molt significativa ja que la rugositat arriba fins un valor mig de  $0,2 \mu\text{m}$ , aquest valor és la millor rugositat obtinguda en tota la superfície còncava de radi 50 mm.

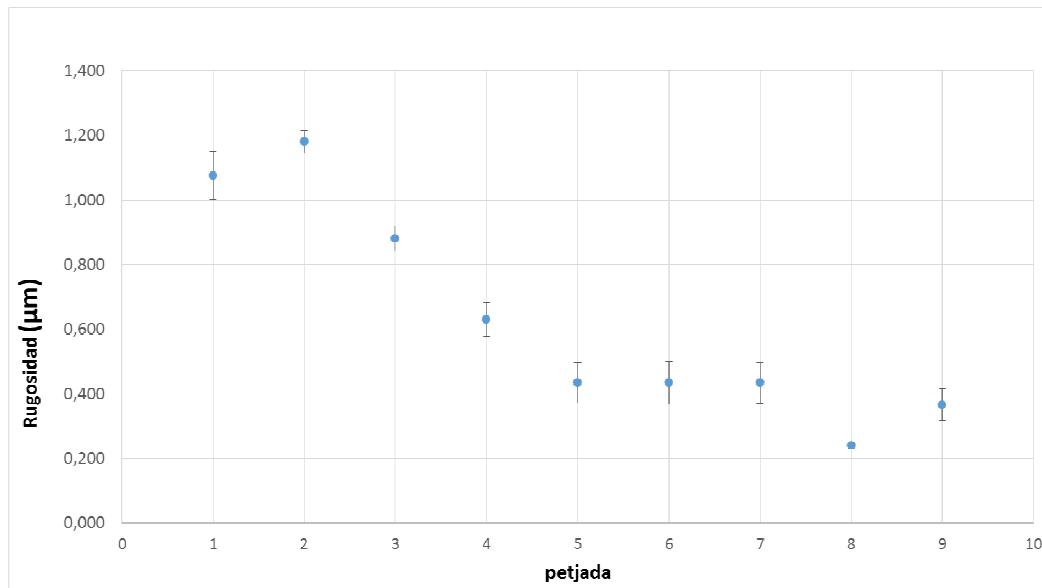


Figura 3. 9 Rugositat mitjana per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 100 mm

En les tres primeres petjades s'observa com amb la força de 100 N la rugositat es de  $1,1 \mu\text{m}$  en el procés sense vibració, però amb el 50% de l'amplitud la rugositat empitjora fins al valor  $1,2 \mu\text{m}$ , en canvi es redueix significativament al aplicar el 100% d'amplitud d'ona fins a un valor de  $0,9 \mu\text{m}$ .

Per la força de 200 N hi ha una variació més gran ja que passa a tenir un valor de rugositat de  $0,65 \mu\text{m}$  amb el procés de brunyit sense vibracions, en aquest cas en aplicar una amplitud d'ona el valor es redueix fins al valor de  $0,45 \mu\text{m}$ , amb els dos valors d'amplitud d'ona.

Al aplicat una força de 300 N sense amplitud d'ona la rugositat es manté al mateix valor que les dues petjades anterior amb menys força però amb amplituds d'ona, la millora significativa a aquesta força és pot veure amb una amplitud d'ona del 50%, ja que aconseguim una rugositat de valor  $0,23 \mu\text{m}$ , ja que l'aplicar una amplitud d'ona del 100% el valor de la rugositat empitjora fins al valor de  $0,35 \mu\text{m}$ .

Per a la superfície còncava de radi 100 mm el valor de rugositat més petita és amb una força de 300 N i una amplitud d'ona del 50% amb una rugositat de  $0,23 \mu\text{m}$ .

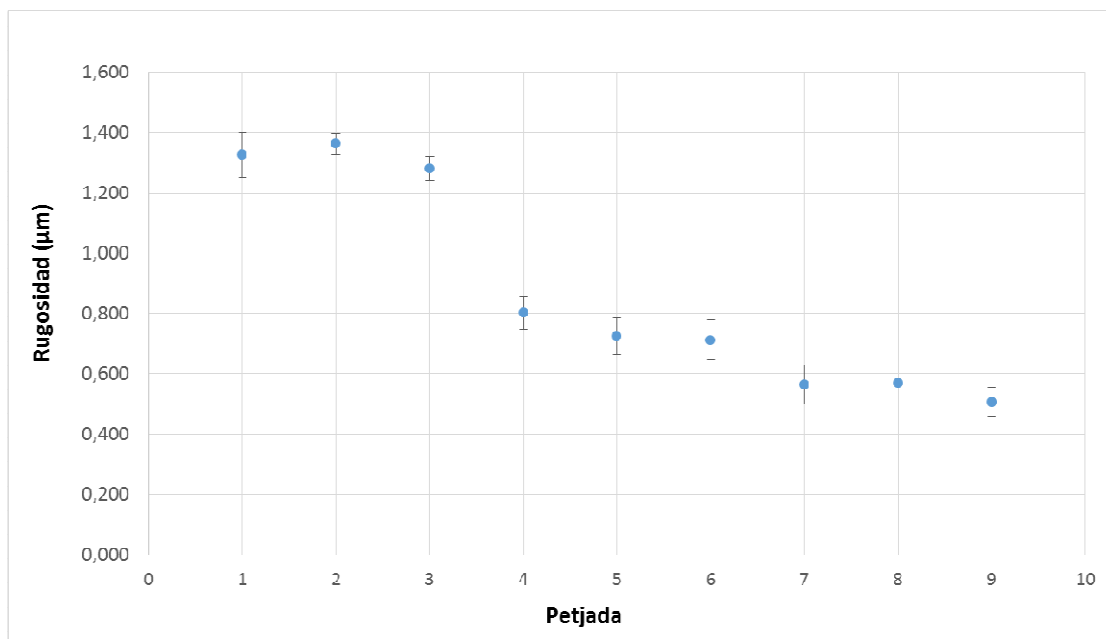


Figura 3. 10 Rugositat mitjana per a la peça convexa, per petjades en superfície radi 100 mm

A primera vista es pot veure com en aquest cas el valor de l'amplitud d'ona no és gaire rellevant. En les tres primeres petjades corresponents a la força de 100 N la rugositat està al voltant de 1,3 µm. En aplicar una força sobre el brunyit de 200 N la rugositat es redueix fins a una valor de 0,8 µm sense vibracions, a l'aplicar vibracions la rugositat obté un valor de 0,7 µm. Utilitzant 300 N la rugositat obté un valor de 0,58 µm en aplicar les vibracions la rugositat sol es redueix fins a 0,50 µm.

En aquest últim cas amb la peça convexa de radi 100 mm la millor rugositat superficial s'obté a una força de 300 N i una amplitud d'ona del 100% amb un valor de rugositat de 0,5 µm

### 3.5. Mesura de la duresa superficial

L'última part del laboratori consisteix en calcular les dureses de les petjades brunyides i analitzar de quina manera ha influenciat els paràmetres del brunyit, la força, el radi del material i l'amplitud d'ona.

Per tal de poder mesurar les dureses amb el duròmetre hi ha uns passos previs molt importants per tal de poder afinar les mesures, que després es faran a les petjades del brunyit. El primer pas per poder començar en la mediació es graduar l'ull de la persona que es disposa a fer la mesura de les petjades. Per poder galgar l'ull hi ha una regla especial (figura 3.11) en la qual es comprova i s'apunten els diferents valors que et dona en la pantalla del duròmetre i repetir-ho 5 cops, per tal de fer una mitja i d'aquesta manera reduir l'error de les mesures.

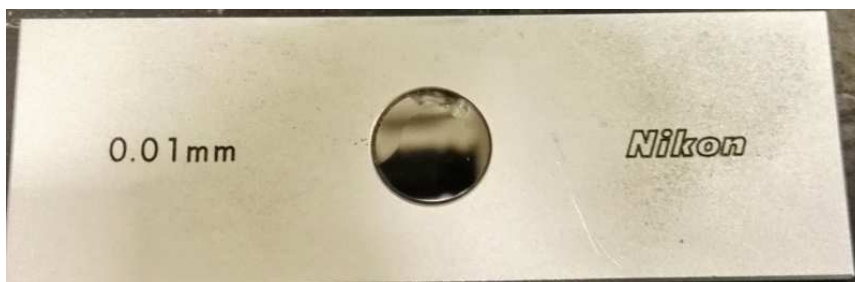


Figura 3. 11 regla per graduar l'ull.

El segon pas consisteix en ficar en la taula un patró de 700 HV i fer diferents indentacions amb el mateix pes i anar reduint el pes, per veure si els valors que proporciona l'Excel, al ficar les seves diagonals s'aproxima als 700 HV, per tal de veure quins errors hi dóna. Una vegada vist que l'error es considerablement petit es pot disposar a mesurar els experiments obtinguts. També es podria calcular la duresa HV amb la fórmula següent:

$$HV = \frac{1,8544 \cdot p}{D_1 \cdot D_2}$$

On p es la carga aplicada en kgf i  $D_1$  i  $D_2$  son els valors de les diagonals de la indentació en  $\mu\text{m}$ .

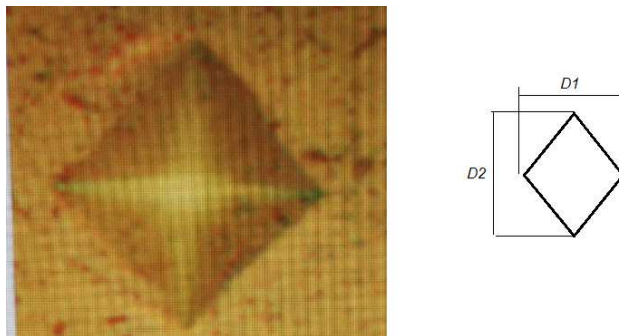


Figura 3. 12 representació d'una indentació



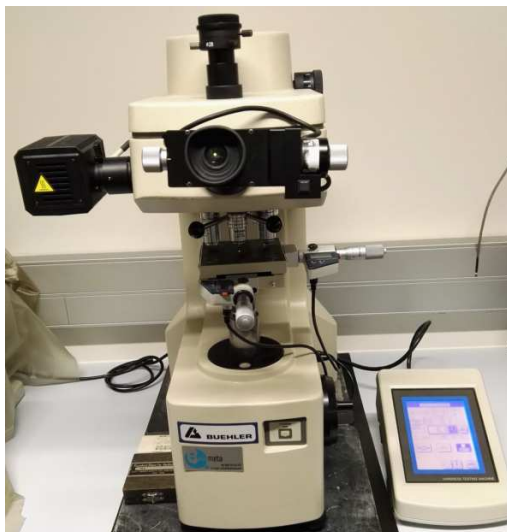


Figura 3. 13 duròmetre buehler 5114 utilitzat per l'experiment.

El procés per mesurar la duresa consisteix en aplicar un pes en l'indentador, format per una punta de diamant (Figura 3.14). Després a través dels objectius i els micròmetres mesurar les diagonals de les picades. Es calculen els valors de duresa de cada petjada. Per a això, s'utilitza un duròmetre de la marca Buehler 5114. L'anàlisi consta de 15 picades en cada petjada, en el primer cas, les picades seran de 500 g de pes. En els resultats obtinguts no s'aprecia la duresa aportada pel brunyit, ja que es supera la capa que ha sofert la deformació plàstica en fred.

Si es disminueix a 25 g la indentació, la capa endurida no es perfora. D'aquesta manera els resultats que s'obtenen són correctes. Totes les observacions és fan amb l'objectiu de 100X.



Figura 3. 14 indentador piramidal vickers amb un angle base 136°

### 3.5.1. Avaluació de resultats per a petjades de 500 g de pes en l'indentació

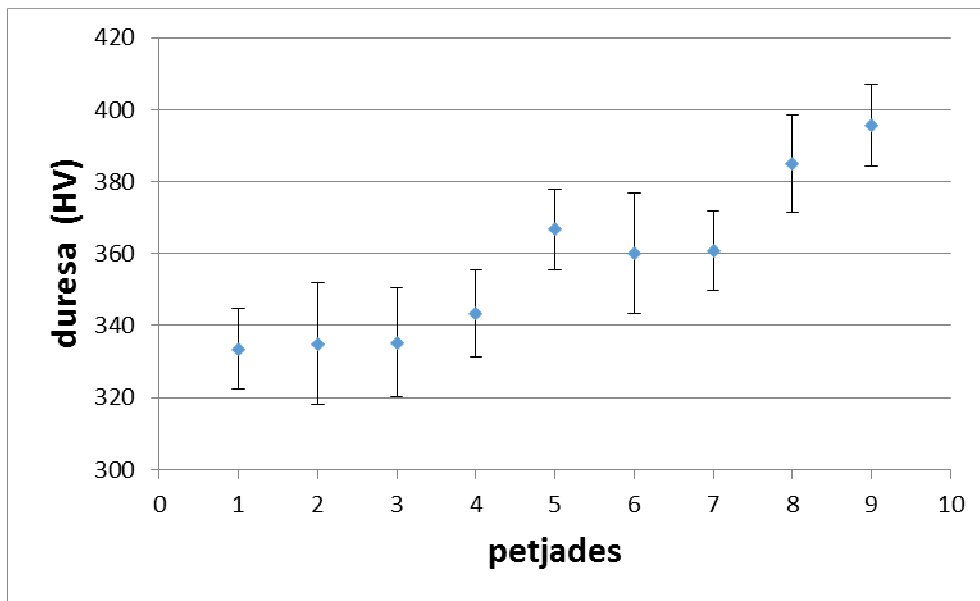


Figura 3. 15 Duresa mitja per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 50 mm

S'observa que en les tres primeres petjades corresponents al brunyit fet amb una força de 100 N la duresa superficial mesurada augmenta amb les vibracions, el valor de l'augment és molt reduït. En usar 200 N incrementa en aproximadament 10 HV, i a l'aplicar-li vibracions pel valor del 50%, aquest augmenta d'una manera considerable en 33 HV, en canvi a l'aplicar-li el 100% del valor de les vibracions es redueix en uns 7 HV. El mateix valor es obtingut usant 300 N, en aquest cas al aplicar-li vibracions augmenta fins a uns 385 HV amb el 50% de les vibracions i el millor valor sobre en aquesta força i el 100% de vibracions aconseguint en arribar a una duresa d'uns 395 HV.

En aquest primer experiment segons la figura 3.15 que mostra la duresa superficial del brunyit per indentacions de 500 g es podria dir que per tal d'aconseguir la duresa més elevada en la peça els passos a seguir serien fer un brunyit amb una força el més gran possible dins dels paràmetres del experiment i amb el nombre de vibracions també al tant per cent més elevat.

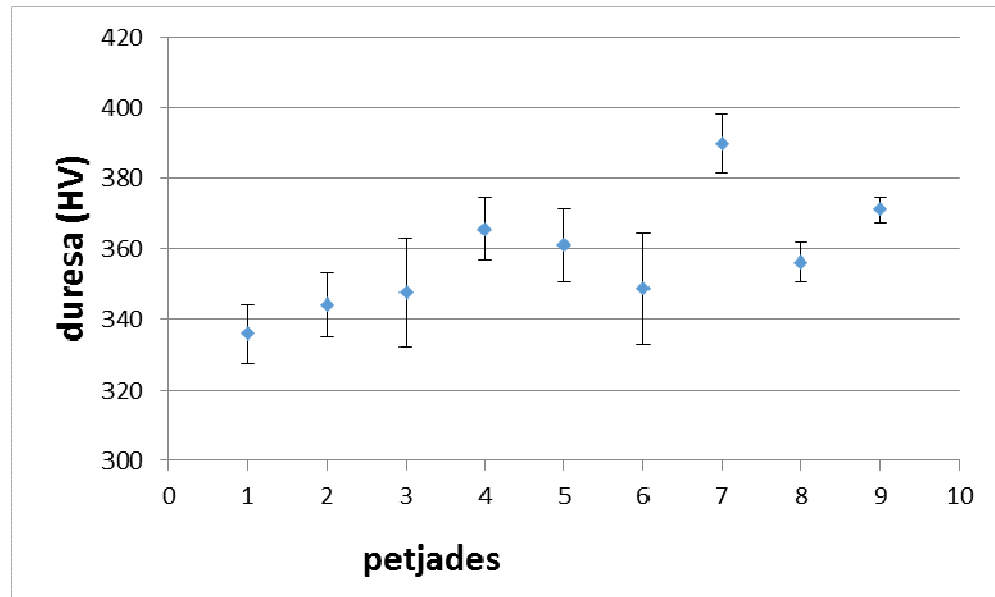


Figura 3. 16 Duresa mitja per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 100 mm

S'observa que en les tres primeres petjades corresponents al brunyit fet amb una força de 100 N la duresa superficial dona un valor de 333 HV aproximadament i el valor incrementa fins a 348 HV augmentant-li les vibracions. En la força de 200 N el valor que obté més duresa és quan actua sense vibracions amb un valor aproximat de 366 HV, finalment amb el cas de 300 N hi ha un cas similar, ja que el valor amb més duresa s'obté sense vibracions amb un valor aproximat de 390 HV.

En aquest segon experiment s'aprecia que el benefici de les vibracions tant sols afecta de manera positiva en una força de brunyit de 100 N, després amb les altres forces afecta de manera negativa. En canvi el valor de la força dins dels paràmetres de l'experiment afecta positivament, com més força s'aplica, més duresa s'aconsegueix.

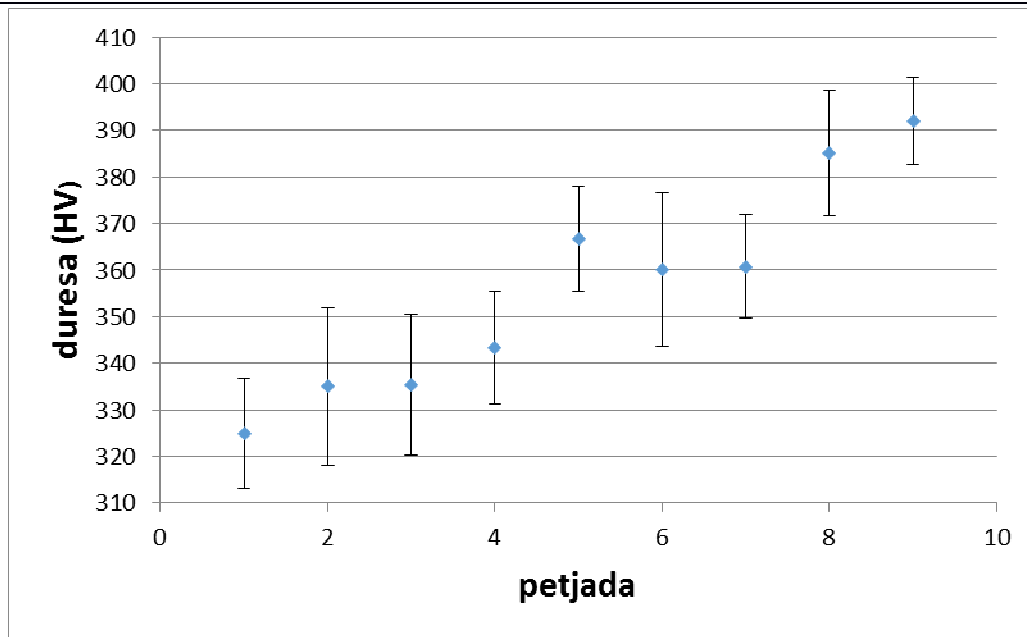


Figura 3. 17 Duresa mitja per a la peça convexa, per petjades en superfície radi 100mm

S'observa que en les tres primeres petjades corresponents al brunyit fet amb una força de 100 N la duresa augmenta amb les vibracions ja que sense vibracions té un valor aproximat de 325 HV i amb les vibracions arriba a obtenir un valor de 335 HV. Amb 200 N la duresa també augmenta fins a un valor aproximat de 343 HV, en aquest cas el valor més elevat s'obté amb el 50% de vibracions d'ona. Si s'incrementa la força a 300 N el valor s'eleva fins a aproximadament 362 HV, però a l'aplicar les vibracions el valor augmenta considerablement fins al valor de 392 HV.

En aquest tercer experiment amb una indentació de 500 g es pot dir que la força del brunyit afecta de manera directa, ja que amb més força s'aconsegueix més duresa. El benefici de les vibracions també afecta a les tres forces de manera positiva, així podem afirmar segons l'experiment que el valor de duresa superficial més elevat l'obtenim amb una força de 300 N i unes vibracions del 100%.

Com hi ha valors en què la duresa s'ha reduït de manera considerable fem un altra mesura amb unes indentacions de 25 g, ja que es creu que l'ocorregut en aquests casos és degut a què la indentació ha superat la capa endurida pel brunyit.

### 3.5.2. Avaluació de resultats per a petjades de 25 g de pes en l'indentació

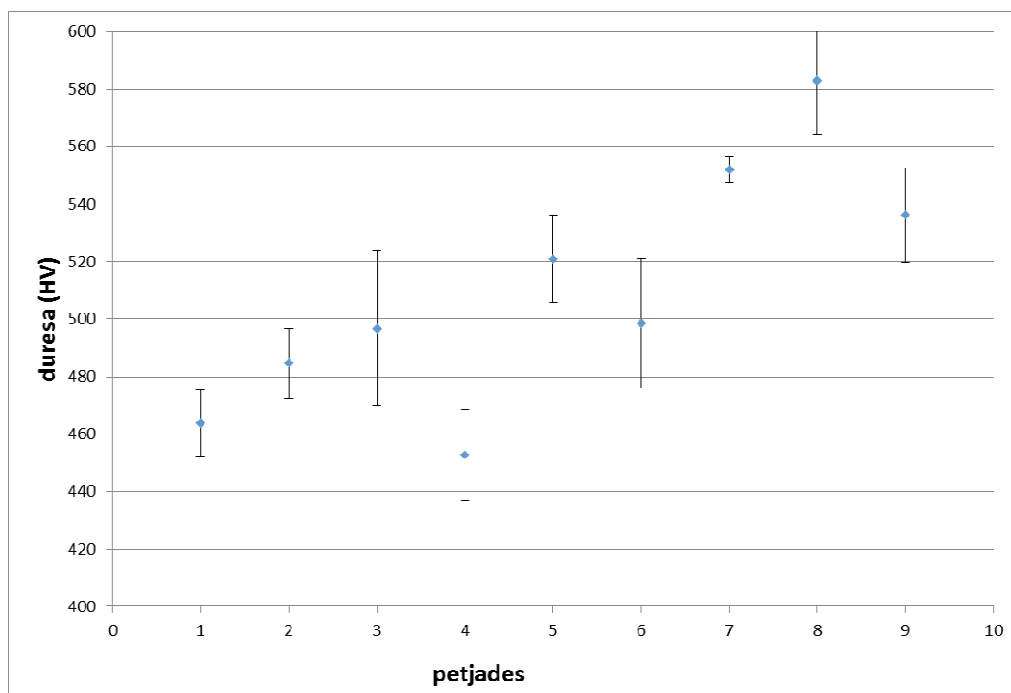


Figura 3. 18 Duresa mitja per a la peça còncava, per petjades en superfície radi 50 mm

S'observa que la força del brunyit afecta positivament a excepció de la força de 200 N que la duresa superficial s'ha reduït. Pel que fa les vibracions afecten positivament en la força de 100 N, en canvi en els altres valors de força el valor òptim de les vibracions per tenir la duresa més elevada està en el valor del 50% ja que al 100% aquesta es redueix. El valor més elevat de duresa s'obté en el valor de 300 N aconseguint un valor aproximat de 583 HV.

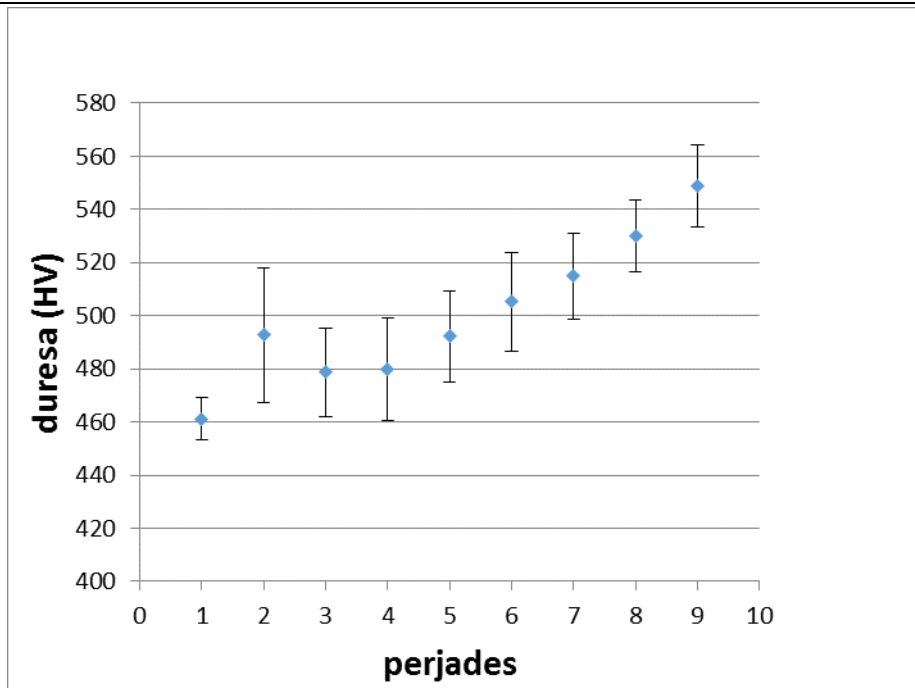


Figura 3. 19 Duresa mitjana per a la peça còncava, per perjudes en superfície radi 100 mm

S'observa que la força del brunyit afecta positivament, ja que a l'augmentar-la en tots els seus paràmetres estudiats la duresa superficial ha incrementat. El paràmetre de les vibracions també afecta positivament en tots els casos a excepció del 100% de vibracions per una força de 100 N que s'ha reduït considerablement, en els altres casos es veu com a mesura que augmenta la força i les vibracions s'aconsegueix una duresa superficial més elevada. En aquest segon experiment el valor de més elevat s'obté amb 300 N i el 100% de vibracions arribant fins a 548 HV.

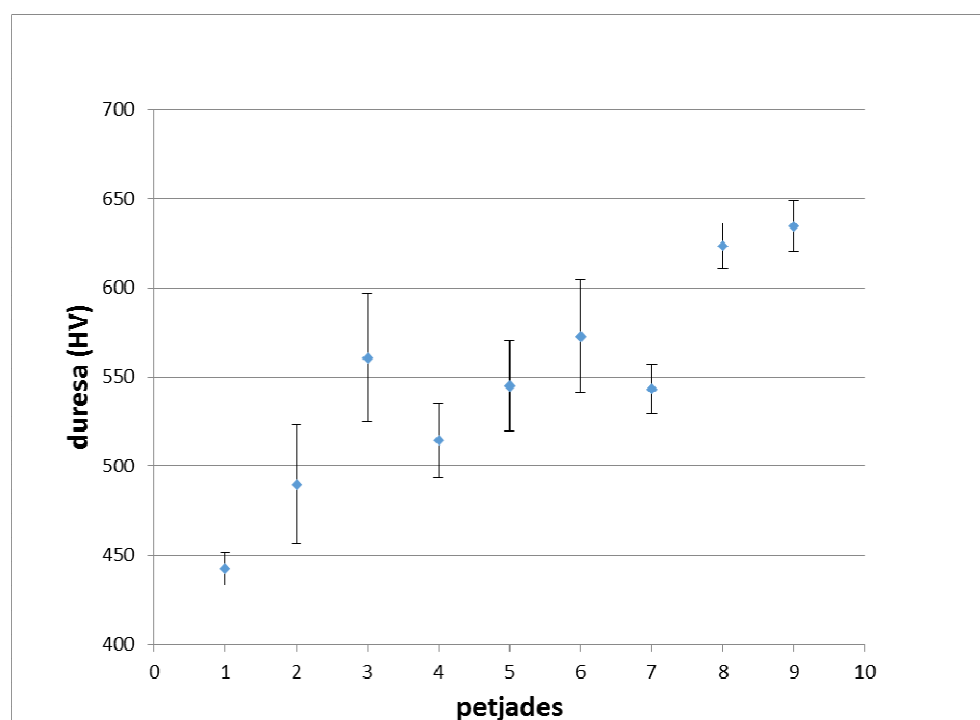


Figura 3. 20 Duresa mitja per a la peça convexa, per petjades en superfície radi 100 mm

S'observa que la força del brunyit afecta positivament en tots els seus casos ja que al comparar els tres casos en que la força s'augmenta sense vibracions el valor de duresa augmenta. S'aprecia que en aplicar un valor de vibracions més elevat, augmenta la duresa. S'afirma que en aquest experiment, a més força i mes vibracions s'aconsegueix una duresa superficial superior. La duresa més elevada es troba als 300 N i al 100% de les vibracions amb un valor de 640 HV.

## 4. Anàlisi de resultats

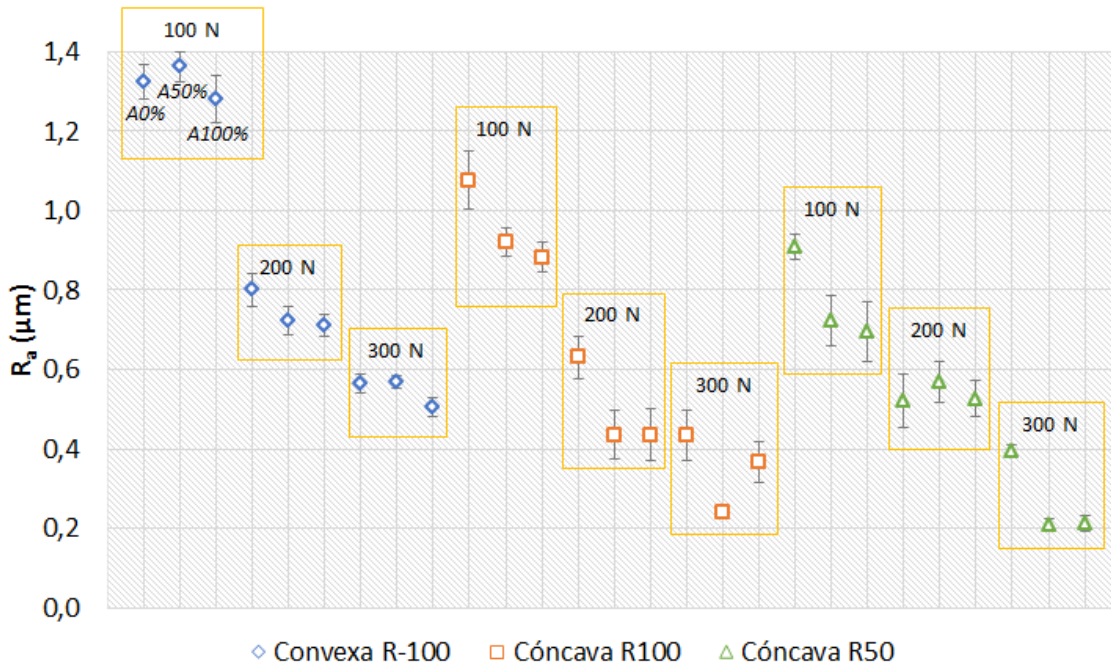


Figura 4. 1 Comparació de la rugositat superficial  $R_a$

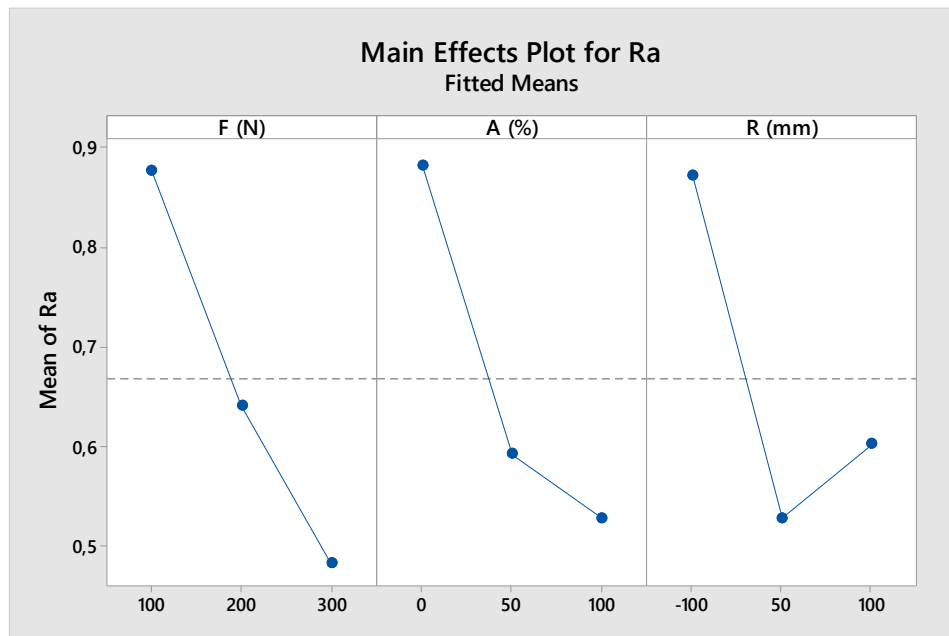


Figura 4. 2 Gràfica d'efectes mitjans dels paràmetres dels DOE sobre la  $R_a$

En les dos gràfiques anteriors s'observa els valors de rugositat superficial mitjana aritmètica ( $R_a$ ). S'observa que a mesura que augmenta la força, es disminueix la rugositat. A més, aquesta també es



redueix en aplicar-li vibracions. Com menor sigui el seu radi s'obté una  $R_a$  millor. El ser una superfície còncava afecta positivament en reduir-la, s'aprecia que la  $R_a$  està per sota de la mitjana.

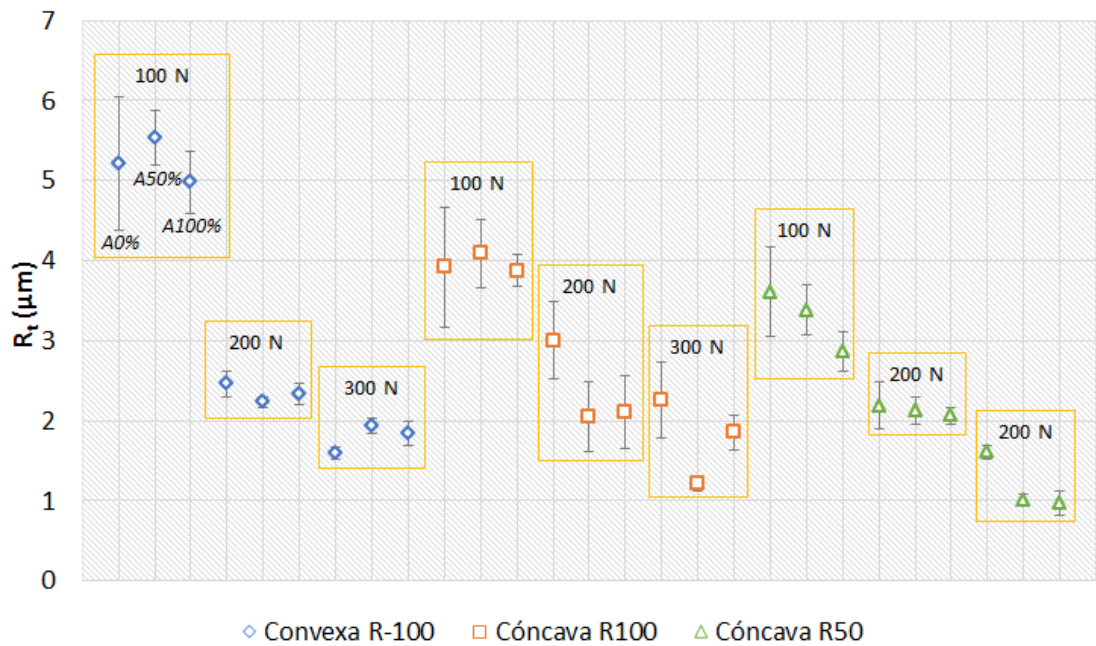


Figura 4.3 Comparació de la rugositat superficial  $R_t$

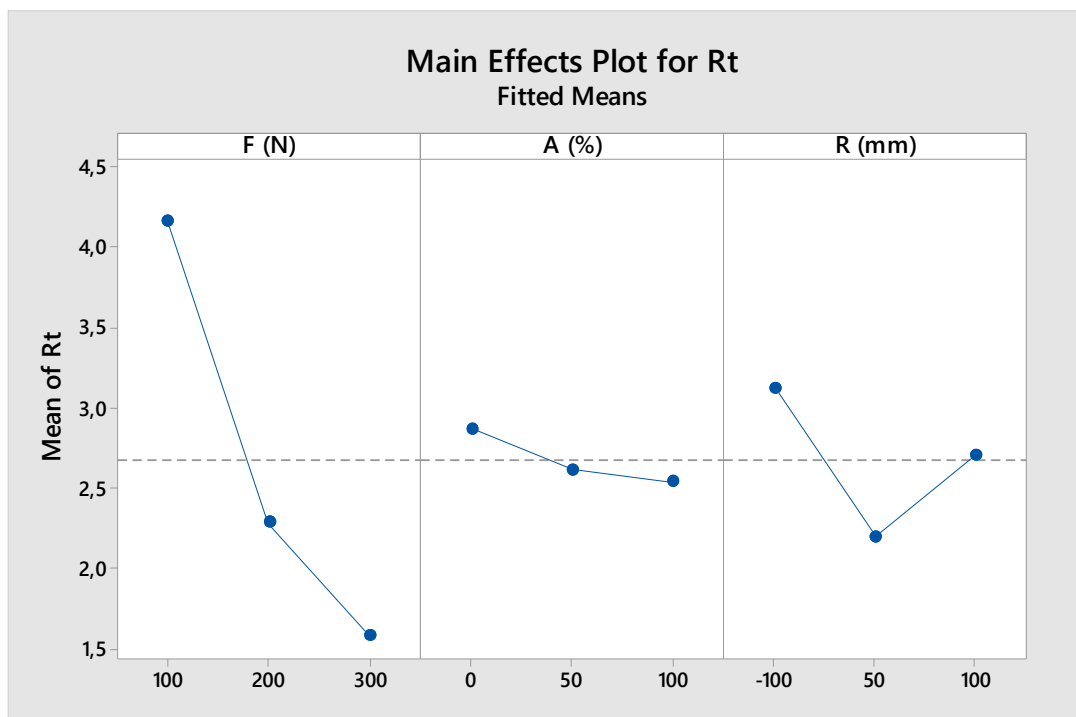


Figura 4.4 Gràfica d'efectes mitjans dels paràmetres dels DOE sobre la  $R_t$

Al estudiar la rugositat màxima total  $R_t$  s'hi extrauen conclusions similars a les anteriors. En la força s'observa una gran millora a mesura que s'augmenta dins els paràmetres d'estudi. Amb les vibracions també s'aprecia com la rugositat disminueix, però de forma més tènue, tan sols varia en  $0,5 \mu\text{m}$ . En aquest cas es torna a tenir el millor escenari amb el radi petit i la superfície de radi 100 mm té un comportament favorable si és còncaua.

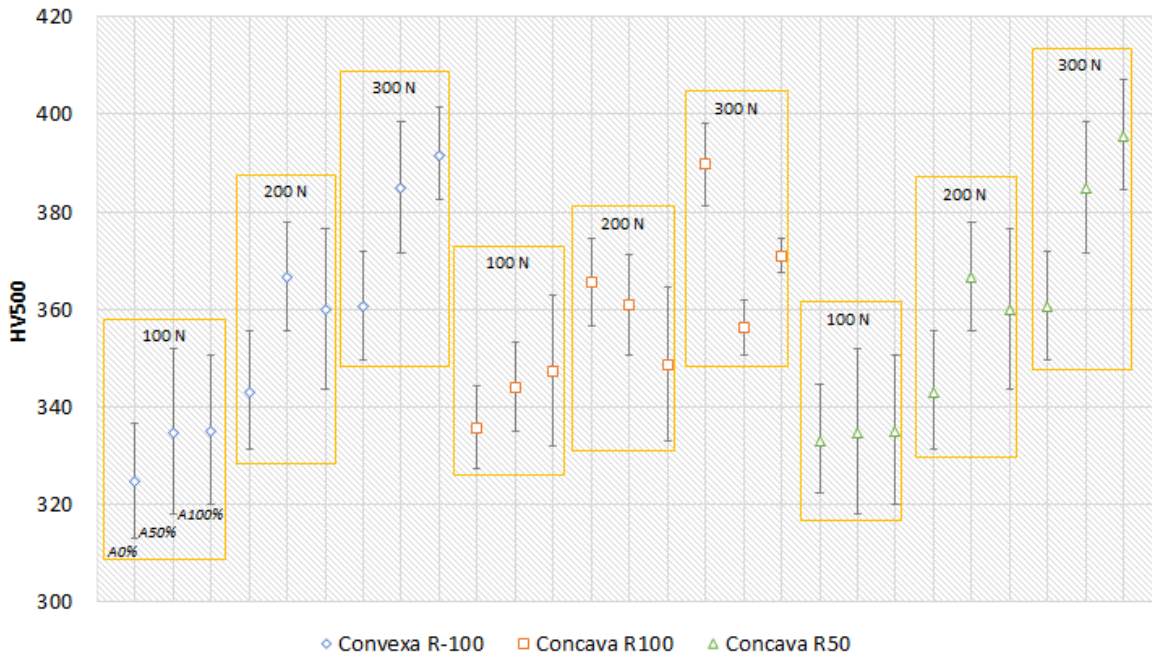


Figura 4. 5 Comparació de duresa per indetacions de 500 g

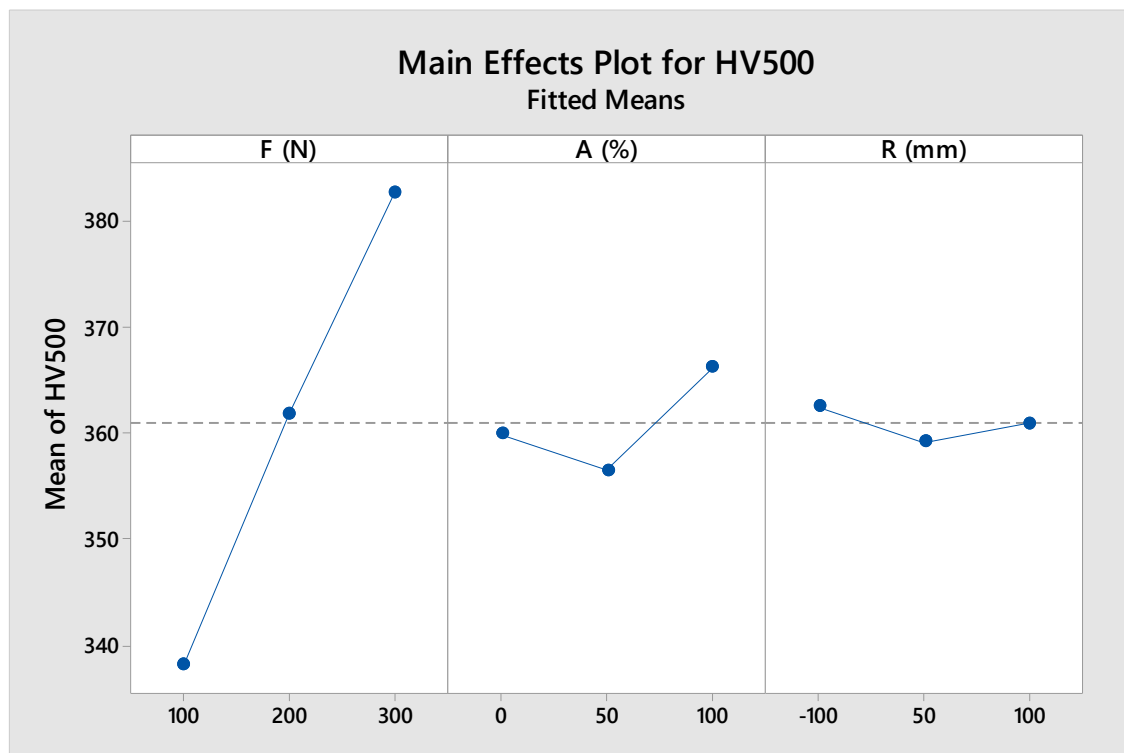


Figura 4. 6 Gràfica d'efectes mitjans dels paràmetres dels DOE sobre la HV 500 g

Si estudiem la duresa superficial en funció de les variables d'estudi s'observa que la força està directament relacionada, a més força més duresa s'obté. Amb les vibracions no s'hi arriba a cap conclusió clara, ja que en els tres casos els valors es troben propers a la mitjana. Finalment amb el radi es dóna una situació similar, però s'observa que la figura convexa té una duresa superior a les dos altres figures.

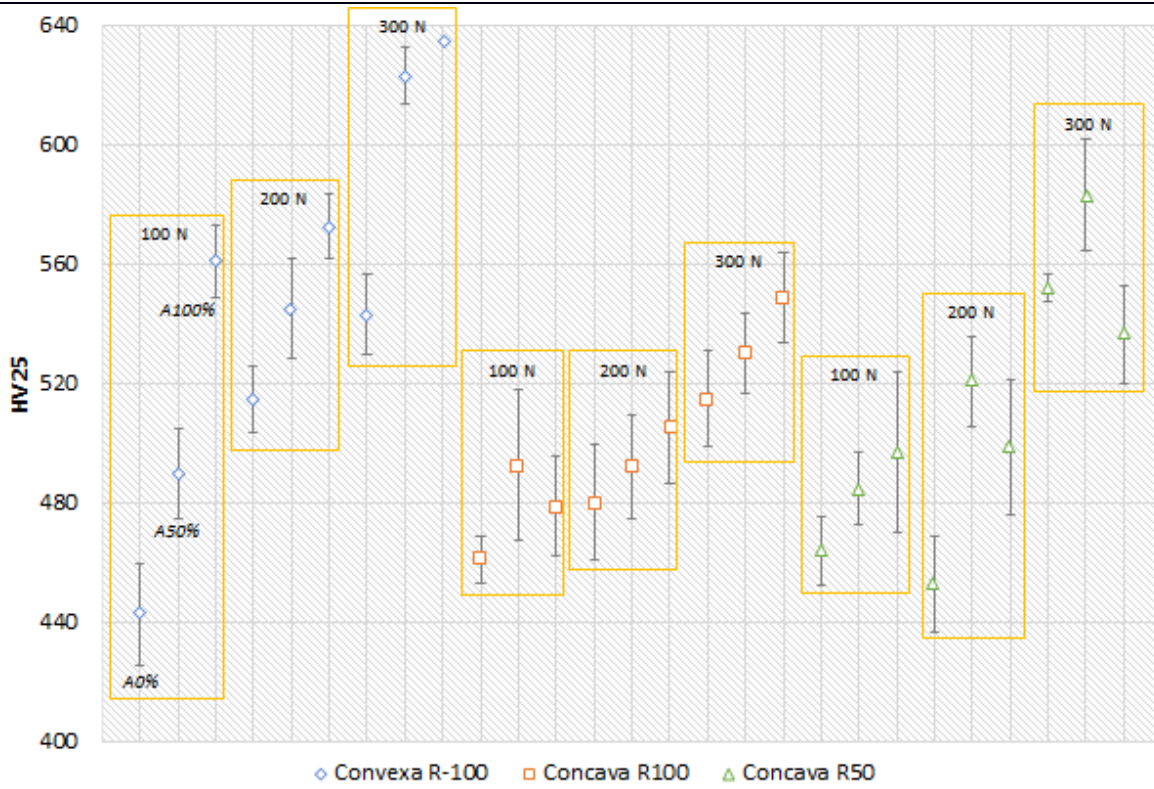


Figura 4. 7 Comparació de duresa per indetacions de 25 g

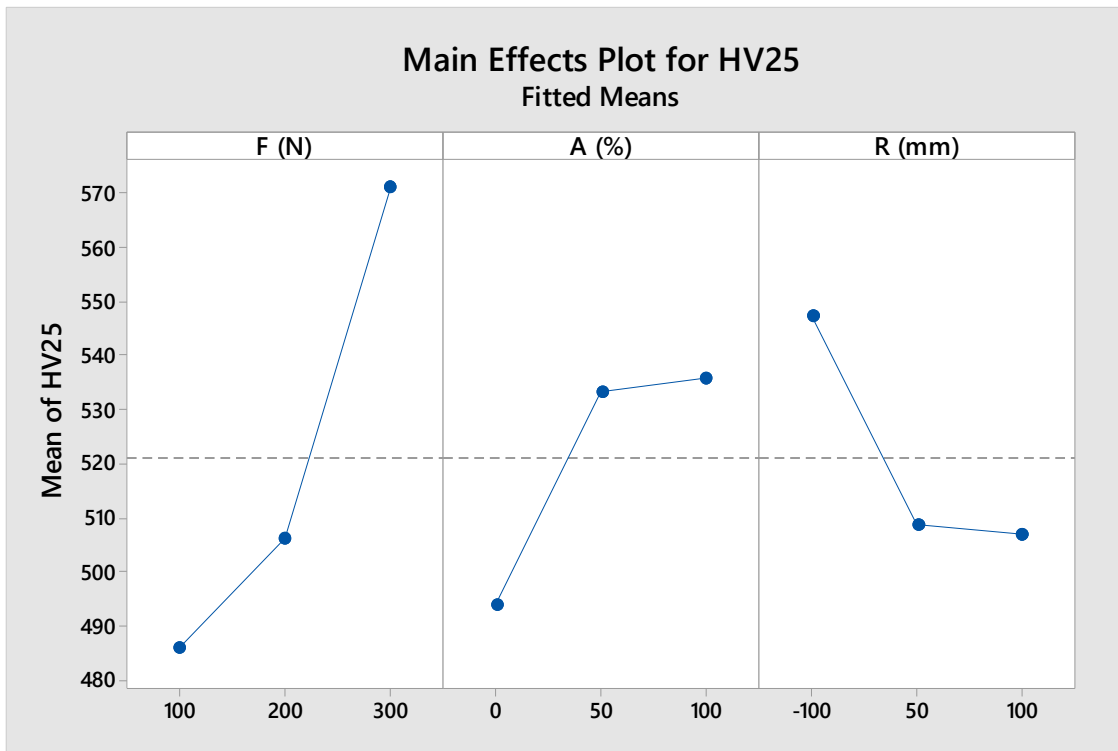


Figura 4. 8 Gràfica d'efectes mitjans dels paràmetres dels DOE sobre la HV 25 g

Finalment al estudiar la duresa en HV per a indentacions de 25 g s'observa una millora amb l'increment de força i també en aplicar-li vibracions. Pel que fa al radi, es veu una diferència de 40 HV de millora en la superfície convexa respecte a les còncaves.

A continuació s'hi troba la taula amb els resultats dels 27 escenaris possibles:

#	F (N)	A (%)	R (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	HV <sub>500g</sub>	HV <sub>25g</sub>
1	100	0	-100	1,325	5,205	335	443
2	100	0	50	0,908	3,608	333	464
3	100	0	100	1,077	3,922	336	461
4	100	50	-100	0,801	5,536	335	490
5	100	50	50	0,724	3,369	335	485
6	100	50	100	0,921	4,086	344	493
7	100	100	-100	0,564	4,975	343	561
8	100	100	50	0,695	2,863	335	497
9	100	100	100	0,882	3,870	347	479
10	200	0	-100	1,363	2,457	367	514
11	200	0	50	0,521	2,184	343	453
12	200	0	100	0,631	3,003	366	480
13	200	50	-100	0,724	2,229	360	545
14	200	50	50	0,568	2,122	360	521
15	200	50	100	0,436	2,051	349	477
16	200	100	-100	0,569	2,336	361	573
17	200	100	50	0,527	2,061	361	488
18	200	100	100	0,434	2,107	390	505
19	300	0	-100	1,280	1,596	385	543
20	300	0	50	0,394	1,610	385	552
21	300	0	100	0,435	2,252	390	535
22	300	50	-100	0,712	1,937	385	623
23	300	50	50	0,208	1,013	385	583
24	300	50	100	0,240	1,214	356	583
25	300	100	-100	0,506	1,838	392	635
26	300	100	50	0,213	0,967	396	536
27	300	100	100	0,367	1,858	371	549

Taula 4. 1 Taula de l'experiment dissenyat i resultats obtinguts de la rugositat i duresa

L'estudi obtingut per les indentacions de 25 g ens dona un resultats més adients ja que la indentació no supera la superfície endurida pel brunyit, per aquest motiu els resultats donen una duresa superficial més elevada i realista.

De tot l'experiment complet el millor valor obtingut de rugositat  $R_a$  s'obté en la peça còncava amb un radi de 50 mm i un 50% de la vibracions ultrasòniques d'ona amb una força de 300 N amb aquestes condicions en l'experiment s'ha obtingut un valor mig de 0,240  $\mu\text{m}$ .

Pel que fa al valor  $R_t$  més petit s'obté en la peça còncava amb un radi de 50 mm i un 100% de la vibracions ultrasòniques d'ona amb una força de 300 N amb aquestes condicions en l'experiment s'ha obtingut un valor mig de 0,967  $\mu\text{m}$ .

Pel que fa a la duresa mesura per les indentacions de 500 g el valor més elevat s'ha obtingut en les condicions de treball en la peça còncava de radi 50 mm amb una força de brunyit de 300 N i el 100% d'amplitud d'ona, obtenint un valor de duresa de 396 HV, en l'estudi d'aquestes indentacions hi ha resultats molt pròxims a la duresa màxima obtinguda, en altres paràmetres de treball, com per exemple la peça formada per un radi de 100 mm convexa amb un brunyit de 300 N i una amplitud d'ona de l 100% obtenint una duresa de 390 HV.

Estudiant la duresa superficial obtinguda amb indentacions de 25 g el valor més elevat s'ha obtingut en les condicions de treball en la peça convexa de radi 100 mm amb una força de brunyit de 300 N i el 100% d'amplitud d'ona, aconseguint un valor de 635 HV, en l'estudi d'aquestes indentacions hi ha un resultat molt pròxim a la duresa màxima obtinguda, i correspon a la peça formada per un radi de 100 mm convexa amb un brunyit de 300 N i una amplitud d'ona de l 50% obtenint un valor de duresa de 623 HV. En els altres casos la duresa superficial obtinguda es redueix considerablement.

Es conclou que el brunyit, amb els paràmetres estudiats, s'obté uns resultats millors utilitzant la màxima força possible i amb l'ajuda de vibracions. Si es prioritza la rugositat per sobre la duresa, preferiblement s'usaran peces còncaves, en l'altre cas s'usaran peces convexes, això només es pot afirmar amb les peces estudiades per poder extrapolar a unes conclusions més generals es tindria que analitzar moltes més superfícies.

## Conclusions

En aquest treball s'han analitzat dos paràmetres referents a la integritat superficial de la peça AISI316L, aquest dos paràmetres són la rugositat i la duresa. Per tal de poder estudiar la rugositat després del brunyit s'ha necessitat fer ús d'un rugosímetre, per poder estudiar la duresa s'ha utilitzar un duròmetre a través de l'estudi de les indentacions provocades per l'indentador vicker. Tots aquests processos s'han desenvolupat sobre les superfícies còncaues i convexes prèviament brunyides en diferents paràmetres, com són tres forces de valors diferents, i tres processos de brunyit diferents, ja que depenien de l'amplitud d'ona que se li donava a l'eina de brunyir.

- El brunyit assistit per vibracions ultrasòniques aporta uns acabats més adients que el brunyit convencional, ja que s'aconsegueix reduir rugositat superficial i augmentar la duresa superficial, en la taula 1 és pot apreciar les millores relatives sobre els resultats obtinguts.
- Els increments obtinguts en les peces brunyides de forma còncaua corresponen a unes millores del 35% en la  $R_a$  un 40% en la  $R_t$  i un augment en la duresa superficial del 8%. En canvi a la peça convexa suposen una millora en la  $R_a$  de un 64%, un 14% en  $R_t$  i un augment en la duresa superficial del 15%.
- La superfície còncaua mostra més facilitat a la reducció de la rugositat superficial en el brunyit, en canvi s'observa que la peça convexa obté un enduriment superficial més elevat. Aquestes diferències que succeeixen entre una peça convexa i còncaua es pot donar per la diferència de desplaçament del material deformat sobre la superfície de la peça, conseqüència de la forma en què es desplaça el material. En la superfície convexa, el material confinat entre la bola de brunyit i el material continuu és més elevat, cosa que provoca que no hi hagi tanta pressió per tal de millorar la rugositat. En canvi la deforma en fred d'una quantitat més gran de material fa que la superfície adquireixi una duresa superior.
- La rugositat mitjana dona més informació sobre els efectes dels paràmetres de brunyit i sobre l'estat de la topologia superficial de les peces.
- la rugositat total no mostra afectacions per les vibracions, per tal de veure-ho millor seria convenient fer un estudi mitjançant elements finits. Així es podria entendre la fenomenologia del darrere del seu comportament.

- El càlcul de la duresa superficial sobre AISI 316L mitjançant l'indentador Vickers' ha de porta a càrrec amb cargues inferiors a 500 g ja que com s'ha vist en l'experiment els resultat eren confusos. L'indentador superava la capa endurida de la qual es volia calcular la seva duresa i per aquest motiu en aquest treball s'ha reduït a 25 g. Amb els resultats que ha donat, s'observa que és una càrrega adient per mesurar la duresa després del brunyit en una superfície de material AISI316L, ja que l'indentador no supera la capa de material deformat.



## Pressupost i/o Anàlisi Econòmic

En aquest apartat s'ha fet un càlcul aproximat del cost de tota la maquinaria per tal de poder realitzar totes les operacions que s'han dut a terme en aquest projecte.

	Quantitat (u)	Preu/unitat (€/u)	Cost (€)
<b>FRESADORA DE CNC</b>	1	26000 €	26000 €
<b>MORDASSA</b>	1	1200 €	1200 €
<b>MORDASSA PETITA</b>	1	220,39 €	220,39 €
<b>PLAT Ø100</b>	1	696,96 €	696,96 €
<b>PLAQUETES PER INOXIDABLE PER AL PLAT Ø100</b>	8	22,08 €	176,64 €
<b>FRESA DE PLAQUETES Ø25</b>	1	220,37 €	220,37 €
<b>PLAQUETES PER INOXIDABLE PER AL PLAT Ø25</b>	4	22,08 €	88,32 €
<b>FRESA DE METALL DUR Ø12</b>	2	116 €	232 €
<b>TRONSADORA</b>	1	4685,75 €	4685,75 €
<b>BALLARINA</b>	1	23,94 €	23,94 €
<b>REGLES RECTIFICATS</b>	2	67 €	134 €
<b>RUGOSIMETRE</b>	1	2680,15 €	2680,15 €

<b>ROSSET</b>	1	46 €	46 €
<b>DURÒMETRE</b>	1	12500 €	12500 €
<b>COMPARADOR AMB SUPORT MAGNÈTIC</b>	1	100,67 €	100,67 €
<b>COMPRESOR</b>	1	2096,93 €	2096,93 €
<b>TOTAL</b>			51102,12 €

## Bibliografia

scholar.google.es per no haver d'escriure manualment les referències.

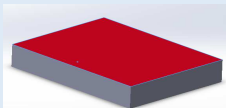
- [1] HASSAN, Adel Mahmood; AL-DHIFI, Sulieman ZS. Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 96, no 1, p. 73-80..
- [2] HASSAN, Adel Mahmood; AL-DHIFI, Sulieman ZS. Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 96, no 1, p. 73-80.
- [3] LUCA, Liviu. *Investigation into the use of ball burnishing of hardened steel components as a finishing process*. 2002. Tesis Doctoral. Ph. D. dissertation, University of Toledo.
- [4] SHIOU, Fang-Jung; CHEN, Chien-Hua. Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process. *Journal of materials processing technology*, 2003, vol. 140, no 1, p. 248-254.
- [5] MICHAEL, Mr, et al. Effects of Surface Treatment on Fretting Fatigue Performance of Ti-6Al-4V. 2003.
- [6] CELAYA, Ainhoa, et al. Ultrasonic Assisted Turning of mild steels. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2009, vol. 37, no 1-2, p. 60-70.
- [7] AAD, Georges, et al. Performance of the ATLAS Trigger System in 2010. *The European Physical Journal C*, 2012, vol. 72, no 1, p. 1849.
- [8] SALAHSHOOR, M.; GUO, Y. B. Process mechanics in ball burnishing biomedical magnesium–calcium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, p. 1-12.
- [9] EL-KHABEERY, M. M.; EL-AXIR, M. H. Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, vol. 41, no 12, p. 1705-1719.
- [10] TRAVIESO, J. A.; GONZÁLEZ, H. A.; DOMÍNGUEZ, A. Estudio del proceso de bruñido con bola para la mejora de acabado superficial en superficies convexas. En XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica CNIM. 2010. p. 167.

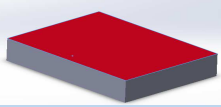
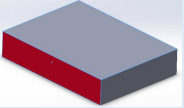
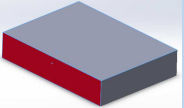
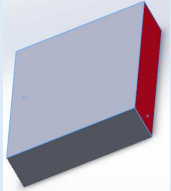
- [11] TRAVIESO-RODRÍGUEZ, Jose Antonio; DESSEIN, Gilles; GONZÁLEZ-ROJAS, Hernan Alberto. Improving the surface finish of concave and convex surfaces using a ball burnishing process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2011, vol. 26, no 12, p. 1494-1502.
- [12] TRAVIESO RODRIGUEZ, Jose Antonio. *Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola)*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [13] RODRÍGUEZ, A., et al. Aplicación del bruñido con bola para el acabado de superficies complejas en máquinas multieje. En *XVIII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA*, ed. 2010.
- [14] GÓMEZ GRAS, Giovanni. Estudio del proceso de bruñido con bola asistido por una vibración. 2015.
- [15] <https://www.milanuncios.com/otras-vehiculos-industriales/centro-de-mecanizado-haas-vce-500-229418503.htm>
- [16] <http://es.rs-online.com/web/c/herramientas/herramientas-de-corte-para-fresado/fresado-frontal/#sort-by=Diámetro&sort-order=desc&esid=4294875189>
- [17] <http://www.instrumentacion-metrologia.es/Rugosimetro-178-560-01-Mitutoyo-SurfTest-SJ-210>
- [18] <http://www.solostocks.com/venta-productos/otras-herramientas-productos-ferreteria/tronzadora-bf350ds-tf-belflex-9483181><http://indaltool.com/imanex-y-mordazas/31-mordaza-fresadora.html>
- [19] <http://www.primeraoportunidad.com/es/soporte-magnetico-con-reloj-comparador-limit>
- [20] <https://www.phantom.eu/es-es/fresas-hss-co/fresas-para-acero-inoxidable/>
- [21] <https://www.equipotaller.es/es/p/Compresor-de-aire-500-litros-75-kW/639/>

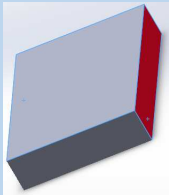
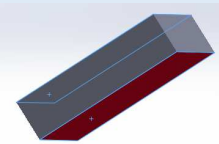
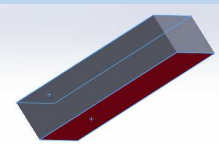
## A1. FULLES DE RUTA TECNOLÒGICA

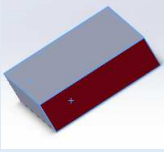
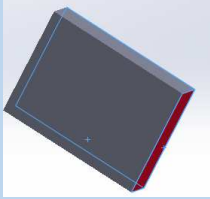
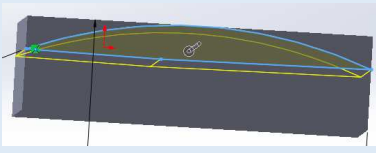
Denominació peça CÒNCAVA Elaborat per JORDI ESCODA

Nº plànol	1	Data	06/01/2017
Material	AISI 316L	fulla/total	1
Semi producte	Bloc rectangular		

Nº fase	Croquis	Màquina/descripció de la fase	Descripció eina	Paràmetres detall						
				Vc (m/min)	a (mm/volta)	p (mm)	N (min <sup>-1</sup> )	Va (mm/min)	L mec (mm)	Tc (s)
1		Fresadora <i>Planejat desbast</i>	Fresa de Ø 100 mm Z=8	94,2	1,6	1	300	400	203	31

2		Fresadora <i>Planejat acabat</i>	Fresa de Ø100mm  Z=8	94,2	0.8	0.1	300	200	203	61
3		Fresadora <i>Planejat desbast</i>	Fresa de Ø25mm  Z=4	78,5	0.8	1	1000	200	127	39
4		Fresadora <i>Planejat acabat</i>	Fresa de Ø25mm  Z=4	78,5	0.4	0,1	1000	100	127	77
5		Fresadora <i>Planejat desbast</i>	Fresa de Ø25mm  Z=4	78,5	0.8	1	1000	200	127	39

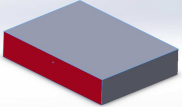
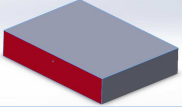
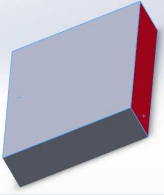
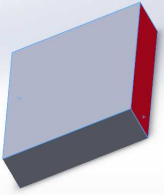
6		Fresadora <i>Planejat acabat</i>	Fresa de Ø25mm  Z=4	78,5	0.4	0,1	1000	100	127	77
7		Fresadora <i>Planejat desbast</i>	Fresa de Ø100mm  Z=8	94,2	1,6	1	300	400	203	31
8		Fresadora <i>Planejat acabat</i>	Fresa de Ø100mm  Z=8	94,2	0.8	0.1	300	200	203	61

9		Fresadora <i>perfilat</i>	Fresa de Ø12mm  Z=4	52	0.08	0.5	1400	100	86	52
10		Fresadora <i>perfilat</i>	Fresa de Ø12mm  Z=4	52	0.08	0.5	1400	100	86	52
11		Fresadora <i>perfilat</i>	Fresa de Ø25mm  Z=4	78,5	0.8	1,36 passades (74)	1000	200	2738	822

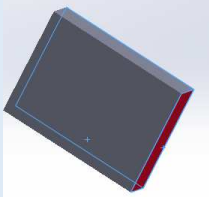
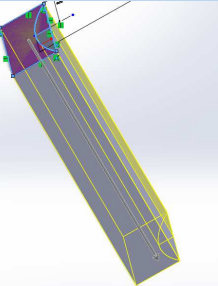


Denominació peça	CONVEXA	Elaborat per	JORDI ESCODA
Nº plànol	1	Data	06/01/2017
Material	AISI 316L	fulla/total	1
Semi producte	Bloc rectangular		

Nº fase	Croquis	Màquina/descripció de la fase	Descripció eina	Paràmetres detall						
				Vc (m/min)	a (mm/volta)	p (mm)	n (min <sup>-1</sup> )	Va (mm/min)	L mec (mm)	Tc (s)
1		Fresadora <i>Planejat desbast</i>	Fresa de Ø100mm  Z=8	94,2	1,6	1	300	400	203	31
2		Fresadora <i>Planejat acabat</i>	Fresa de Ø100mm Z=8	94,2	0.8	0.1	300	200	203	61

3		Fresadora <i>Planejat desbast</i>	Fresa de Ø25mm Z=4	78,5	0.8	1	1000	<u>200</u>	127	39
4		Fresadora <i>Planejat acabat</i>	Fresa de Ø25mm Z=4	78,5	0.4	0,1	1000	<u>100</u>	127	77
5		Fresadora <i>Planejat desbast</i>	Fresa de Ø25mm Z=4	78,5	0.8	1	1000	<u>200</u>	127	39
6		Fresadora <i>Planejat acabat</i>	Fresa de Ø25mm Z=4	78,5	0.4	0,1	1000	<u>100</u>	127	77

7		Fresadora <i>Planejat desbast</i>	Fresa de Ø100mm  Z=8	94,2	1,6	1	300	400	203	31
8		Fresadora <i>Planejat acabat</i>	Fresa de Ø100mm  Z=8	94,2	0.8	0.1	300	200	203	61
9		Fresadora <i>perfilat</i>	Fresa de Ø12mm  Z=4	52	0.08	0.5	1400	100	86	52

10		Fresadora <i>perfilat</i>	Fresa a Ø12mm Z=4	52	0.08	0.5	1400	100	86	52
11		Fresadora <i>perfilat</i>	Fresa a Ø25mm Z=4	78,5	0.8	1,36 Passades (74)	1000	200	2738	822

**A2. MECANITZAT DE LES PECES DE TREBALL**

PROGRAMA PER MECANITZAR PEÇA CÒNCAVA.	PROGRAMA PER MECANITZAR PEÇA CONVEXA
N10 G54	N10 G54
N20 T0.0	N20 T0.0
N30 G90 G0 G5 G43 Z10 F200 S1000 M3	N30 G90 G0 G5 G43 Z10 F200 S1000 M3
N40 G0 X15 Y-15 M8	N40 G0 X0 Y15 M8
N50 G0 Z1	N50 G0 Z1
N60 G1 Z0	N60 G1 Z0
N70 G91 G1 Z-1.36	N70 G91 G1 Z-1.36
N80 G90 G1 G41 X0 Y0	N80 G90 G1 G41 X-14.17 Y0
N90 G3 X-12.2 Y-17 R50	N90 G2 X-1.97 Y-17 R50
N100 G3 X-14.17 Y-34 R100	N100 G2 X0 Y-34 R100
N110 G1 Y-40	N110 G1 Y-40
N120 G3 X-12.2 Y-57 R100	N120 G2 X-1.97 Y-57 R100
N130 G3 X0 Y-74 R50	N130 G2 X-14.17 Y-74 R50
N140 G1 G40 X15 Y-59	N140 G1 G40 X15 Y-89
N150 G0 X15 Y-15	N150 G0 X15 Y15
N160 G25N70.150.36	N160 G25N70.150.36
N170 G0 Z10 M5 M9	N170 G0 Z10 M5 M9
N180 G0 X100 Y100	N180 G0 X100 Y100
N190 M30	N190 M30

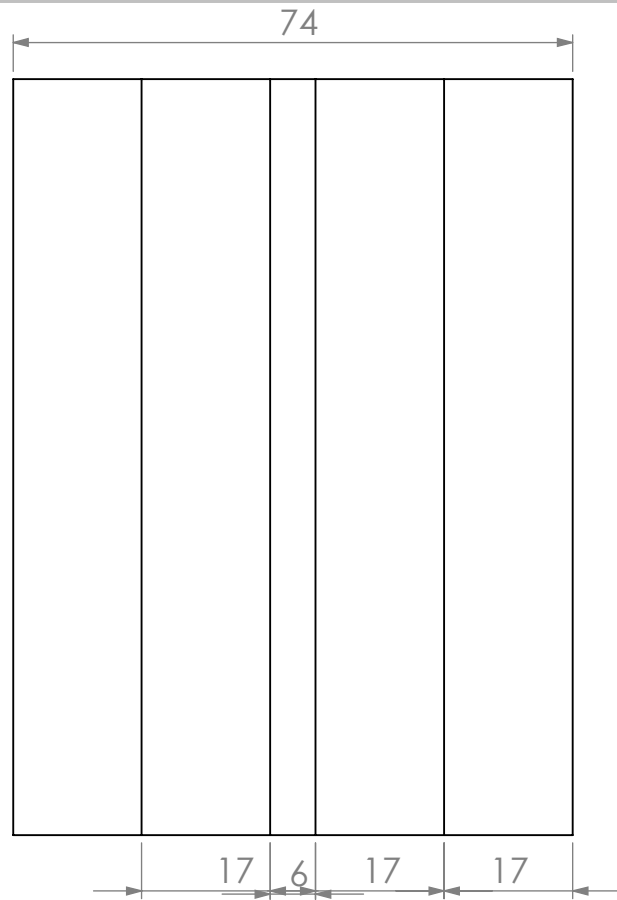
### A3. PROGRAMA DE LES PECES A BRUNYIR

<p>PARAMETRES PER BRUNYIR PEÇA CÒNCAVA, R50</p> <p>P0 = 15; coordenada X petjada local</p> <p>P1 = 2; coordenada y petjada local</p> <p>P2 = 1.053 ; valor coordenada z</p> <p>P3 = 0.3; valor absolut pas lateral</p> <p>P5 = 1; multiplicador pas lateral</p> <p>P4 = 8; amplada de petjada</p> <p>P6 = 0.05; cordenada z petjada local</p> <p>P15 = 0; comptador de passades</p>	<p>PARAMETRES PER BRUNYIR PEÇA CÒNCAVA, R100</p> <p>P0 = 15; coordenada X petjada local</p> <p>P1 = 2; coordenada y petjada local</p> <p>P2 = 1.053 ; valor coordenada z</p> <p>P3 = 0.3; valor absolut pas lateral</p> <p>P5 = 1; multiplicador pas lateral</p> <p>P4 = 8; amplada de petjada</p> <p>P6 = 0.04; cordenada z petjada local</p> <p>P15 = 0; comptador de passades</p>
<p>PROGRAMA PEÇA CÒNCAVA, R50</p> <p>G54</p> <p>G00 G90 X0 Y0 Z10</p> <p>;PRIMERA PASADA</p> <p>G01 XP0 YP1 Z1 F300</p> <p>G01 Z-P2 F100</p> <p>\$WHILE P3*P15 &lt; P4</p> <p>G91 G1 Z-P6 F100</p> <p>YP4 F300</p> <p>X-P3</p> <p>Z-P6 F100</p> <p>Y-P4 F300</p> <p>X-P3</p> <p>P15 = P15 + 2</p> <p>\$ENDWHILE</p> <p>G0 Z50</p> <p>M30</p>	<p>PROGRAMA PEÇA CÒNCAVA, R100</p> <p>G54</p> <p>G00 G90 X0 Y0 Z10</p> <p>;PRIMERA PASADA</p> <p>G01 XP0 YP1 Z1 F300</p> <p>G01 Z-P2 F100</p> <p>\$WHILE P3*P15 &lt; P4</p> <p>G91 G1 Z-P6 F100</p> <p>YP4 F300</p> <p>X-P3</p> <p>Z-P6 F100</p> <p>Y-P4 F300</p> <p>X-P3</p> <p>P15 = P15 + 2</p> <p>\$ENDWHILE</p> <p>G0 Z50</p> <p>M30</p>

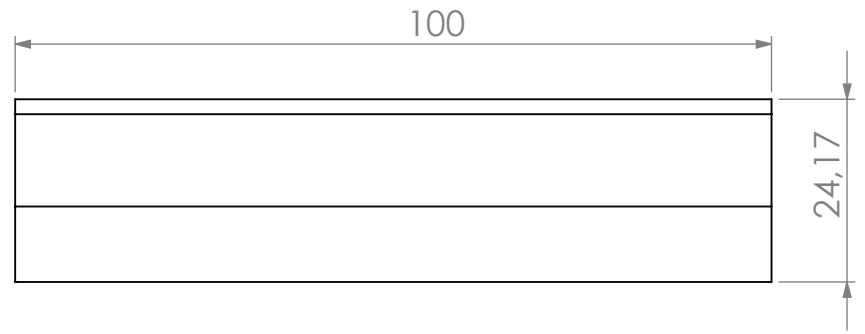
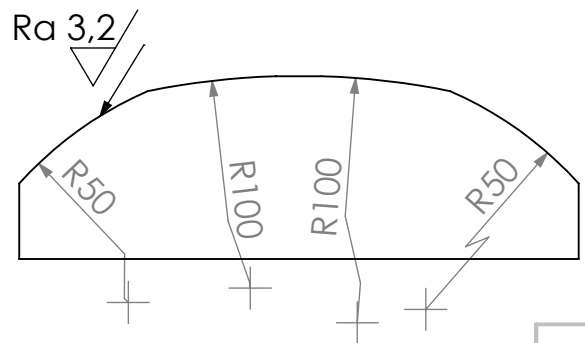
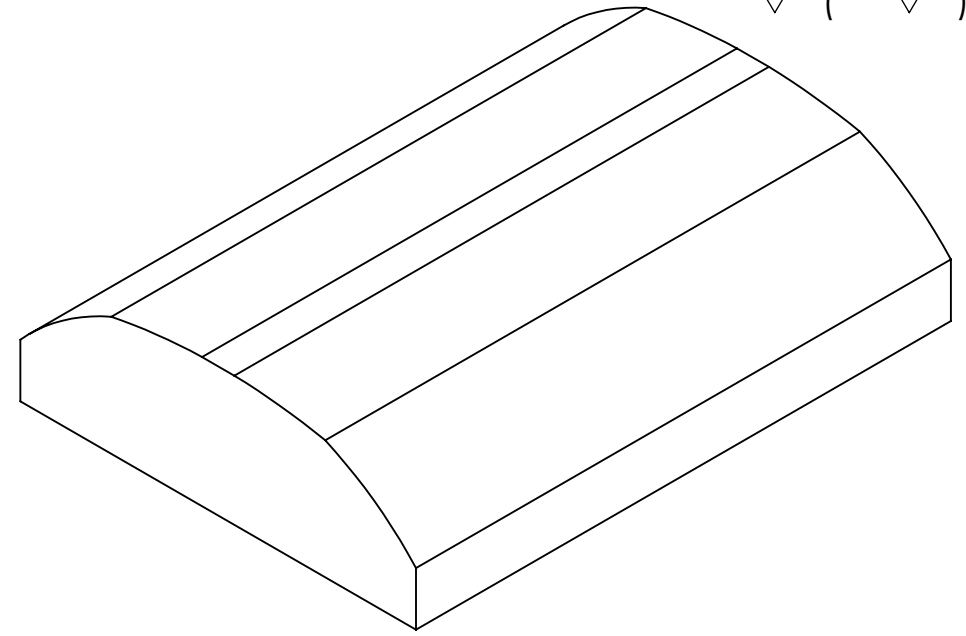
<p>PARAMETRES PER BRUNYIR PEÇA CONVEXA, R50</p> <p>P0 = 15; coordenada X petjada local</p> <p>P1 = 2; coordenada y petjada local</p> <p>P2 = 1.053 ; valor coordenada z</p> <p>P3 = 0.3; valor absolut pas lateral</p> <p>P5 = 1; multiplicador pas lateral</p> <p>P4 = 8; amplada de petjada</p> <p>P6 = 0.05; cordenada z petjada local</p> <p>P15 = 0; comptador de passades</p>	<p>PARAMETRES PER BRUNYIR PEÇA CONVEXA, R100</p> <p>P0 = 15; coordenada X petjada local</p> <p>P1 = 2; coordenada y petjada local</p> <p>P2 = 1.053 ; valor coordenada z</p> <p>P3 = 0.3; valor absolut pas lateral</p> <p>P5 = 1; multiplicador pas lateral</p> <p>P4 = 8; amplada de petjada</p> <p>P6 = 0.04; cordenada z petjada local</p> <p>P15 = 0; comptador de passades</p>
<p>PROGRAMA PEÇA CÒNCAVA, R50</p> <p>G54</p> <p>G00 G90 X0 Y0 Z10</p> <p>;PRIMERA PASADA</p> <p>G01 XP0 YP1 Z1 F300</p> <p>G01 Z-P2 F100</p> <p>\$WHILE P3*P15 &lt; P4</p> <p>G91 G1 Z-P6 F100</p> <p>YP4 F300</p> <p>XP3</p> <p>Z-P6 F100</p> <p>Y-P4 F300</p> <p>XP3</p> <p>P15 = P15 + 2</p> <p>\$ENDWHILE</p> <p>G0 Z50</p> <p>M30</p>	<p>PROGRAMA PEÇA CÒNCAVA, R100</p> <p>G54</p> <p>G00 G90 X0 Y0 Z10</p> <p>;PRIMERA PASADA</p> <p>G01 XP0 YP1 Z1 F300</p> <p>G01 Z-P2 F100</p> <p>\$WHILE P3*P15 &lt; P4</p> <p>G91 G1 Z-P6 F100</p> <p>YP4 F300</p> <p>XP3</p> <p>Z-P6 F100</p> <p>Y-P4 F300</p> <p>XP3</p> <p>P15 = P15 + 2</p> <p>\$ENDWHILE</p> <p>G0 Z50</p> <p>M30</p>


## A4. PLÀNOLS PECES

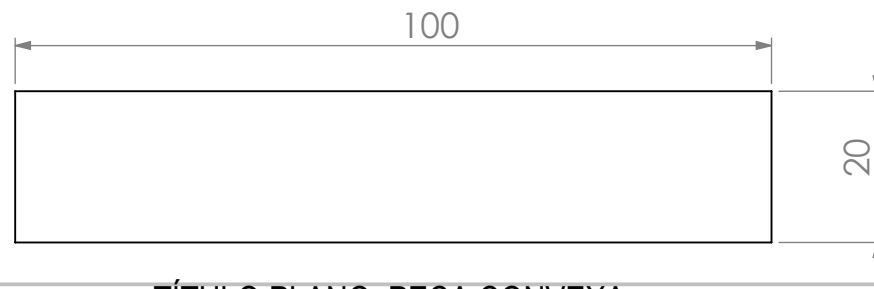
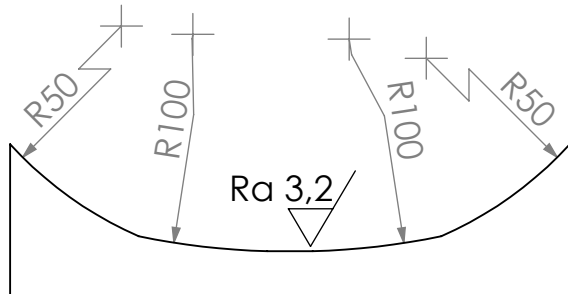
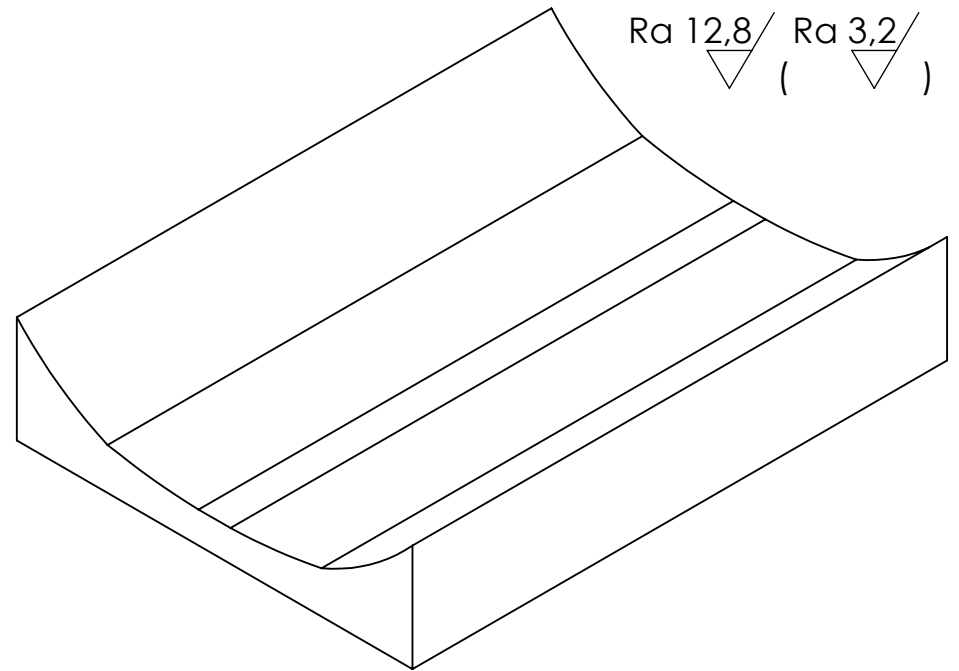
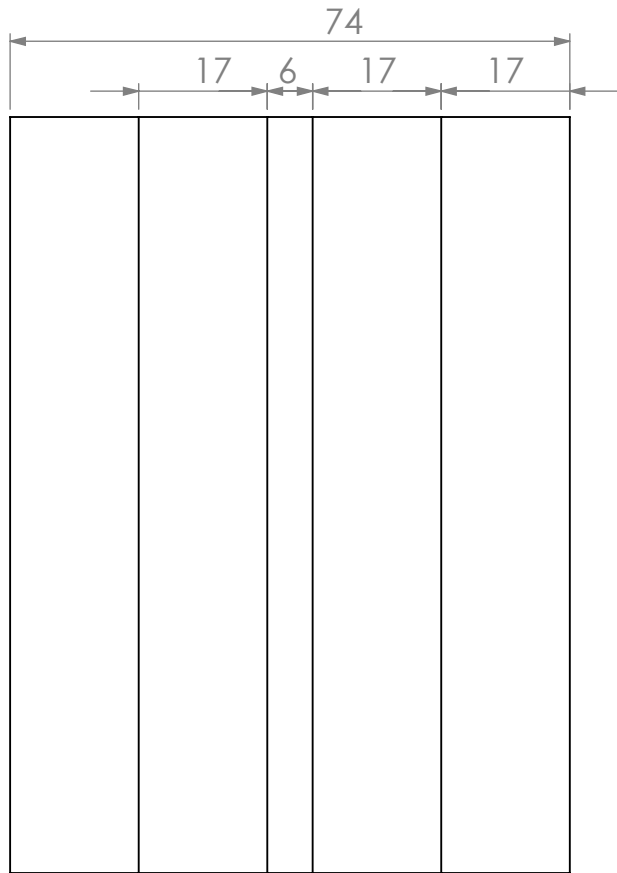





Ra 12,8 / Ra3,2 /  
 ( )



<b>TÍTULO PLANO: PEÇA CÒNCAVA</b>				N.º DE DIBUJO: 1	
PROYECTO: BRUNYIT ULTRASÒNIC DE PECES CÒNVEGES D'ACER INOXIDABLE AISI 316L					
DIBUJADO : JORDI ESCODA		FECHA CREACIÓN : 01/02/2017		ACABADO:	
REVISADO: RAMÓN JEREZ		FECHA REVISIÓN : 15/02/2017		ESCALA: 1:1 HOJA 1 DE 1 A4	
MATERIAL: AISI 316L		PESO: 675 g			



TÍTULO PLANO: PEÇA CONVEXA			N.º DE DIBUJO: 2	
PROYECTO: BRUNYIT ULTRASÒNIC DE PECES CÒNVEGES D'ACER INOXIDABLE AISI 316L				
DIBUJADO : JORDI ESCODA	FECHA CREACIÓN : 01/02/2017	ACABADO:	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1
REVISADO: RAMÓN JEREZ	FECHA REVISIÓN : 15/02/2017		A4	
MATERIAL: AISI 316L	PESO: 541 g	 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		