



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

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**ESTUDI DE LA INFLUÈNCIA DEL BRUNYIT AMB BOLA
ASSISTIT PER VIBRACIONS SOBRE LA INTEGRITAT
SUPERFICIAL DE L'ALUMINI AW 2017**



Memòria i Annexos

Autor: Souliman Annouhi Amar
Director: Ramon Jerez Mesa
Convocatòria: Octubre 2017

Resum

L'objectiu del procés de brunyit amb bola es millorar l'acabat superficial (rugositat superficial) de peces prèviament mecanitzades produint una deformació plàstica de la superfície per efecte d'una bola que rutlla sobre la superfície objectiu.

En aquest document es mostra els resultats obtinguts amb una proveta plana d'alumini EN AW 2017 brunyida en una fresadora de control numèric Lagun MC 600, utilitzant una eina de brunyir amb bola i assistida per vibracions ultrasòniques .

S'ha dissenyat un experiment amb l'objectiu d'obtenir les rugositats superficials i la determinació de la duresa superficial amb la finalitat de poder comparar, extreure les conclusions sobre les millores del procés de brunyit respecte la mateixa proveta inicial en una zona no brunyida i definir la influència de diversos paràmetres durant la operació de brunyit.

Les variables utilitzades en el procés son les considerades mes importants: força compressiva, pas lateral, assistència del procés amb vibració i la estratègia de passada. Els efectes de cadascuna d'aquestes variables s'han processat amb el software estadístic Minitab.

Es recullen els valors de rugositat obtingudes en cadascun dels experiments abans i després de dur a terme el procés de brunyit, així com el valor de duresa superficial, després de l'operació, amb la finalitat d'analitzar l'eficàcia d'aquesta eina, de l'ús d'ultrasons i dels paràmetres estudiants en el procés.

Resumen

El objetivo del proceso de bruñido con bola es mejorar el acabado superficial (rugosidad superficial) de piezas previamente mecanizadas produciendo una deformación plástica de la superficie por el efecto de una bola que rueda sobre la superficie objetivo.

En este documento se muestra el resultado obtenido con una probeta plana de aluminio EN AW 2017 bruñida en una fresadora de control numérico Lagun MC 600, utilizando una herramienta de bruñir con bola y asistida por vibraciones ultrasónicas.

Se ha diseñado un experimento con el objetivo de obtener las rugosidades superficiales y la determinación de la dureza superficial con la finalidad de poder comparar, extraer conclusiones sobre las mejoras del proceso de bruñido respecto a la misma probeta inicial en una zona no bruñida y definir la influencia de diversos parámetros durante la operación de bruñido

Las variables utilizadas en el proceso son las consideradas más importantes: fuerza compresiva, paso lateral, asistencia del proceso con vibración y la estrategia de pasada. Los efectos de cada una de estas variables son analizados con el software estadístico Minitab.

Se registran los valores de rugosidad obtenidos en cada uno de los experimentos antes y después de realizar el proceso de bruñido, así como el valor de dureza superficial, después de la operación de bruñido, con la finalidad de analizar la eficacia de esta herramienta, del uso de ultrasonidos y de los parámetros estudiados en el proceso.

Abstract

The objective of the ball burnishing process is to improve the surface roughness of previously machined piece producing a plastic deformation of the surface by the effect of a ball rolling on the target surface.

This document shows the result obtained with a flat aluminum piece EN AW 2017 burnished in a numerical control milling machine Lagun MC 600, using a ball burnishing tool and assisted by ultrasonic vibrations.

An experiment was designed with the objective of obtaining the surface roughness and the determination of the surface hardness in order to be able to compare, to make conclusions about the improvements of the burnishing process with respect to the same initial piece in a non-burnished area and to define the influence of various parameters during the burnishing operation.

The variables used in the process are the most important ones: compressive force, lateral pass width, vibrations-assisted ball burnishing and the pass strategy. The effects of each of these variables are analyzed with the Minitab statistical software.

Roughness values are obtained in each of the experiments before and after the burnishing process, as well as the surface hardness value, in order to analyze the effectiveness of this tool, use of ultrasound and the parameters studied in the process.

Agraïments

Agraït a tots als professors ja siguin de l'especialitat de la Enginyeria Mecànica o d'altres, especialment al meu tutor del projecte Ramón Jerez, per la seva dedicació i paciència. També m'agradaria nombrar a Pedro Ortiz, professor de disseny de màquines, per la seva ajuda durant tot el curs i l'empresa F-87 per poder permetre'm poder créixer en l'empresa i facilitar-me temps per poder dedicar a la realització del projecte.

Agraït a la meva família, sempre amb el màxim suport possible cap a mi i els meus estudis, i totes aquelles persones que en algun moment difícil m'han donat ajut moral per tirar endavant i no deixar d'estudiar.

Glossari

A continuació es presenta la nomenclatura utilitzada pel desenvolupament del projecte.

R_a	Rugositat superficial mitjana aritmètica.
R_t	Rugositat màxima total en la longitud de avaluació.
$R_a //$	Rugositat superficial mitjana, mesurada en el sentit paral·lel al avanç del fresat.
$R_a \perp$	Rugositat superficial mitjana, mesurada en el sentit perpendicular al avanç del fresat.
$R_t //$	Rugositat màxima pic - vall, mesurada en el sentit paral·lel al avanç del fresat.
$R_t \perp$	Rugositat màxima pic - vall, mesurada en el sentit perpendicular al avanç del fresat.
F	Força brunyit.
b	Amplada pas lateral entre dos passades.
$NVABB$	<i>Non-vibration-assisted ball burnishing.</i>
$VABB$	<i>Vibration-assisted ball burnishing.</i>
T	Trajectòria: estratègia de passada.
N	Número de passades.
HV	Duresa en escala Vickers.



Índex

Resum	i
Resumen	ii
Abstract.....	iii
Agraïments.....	iv
Glossari	v
1. INTRODUCCIÓ	9
1.2. CONCEPTES PREVIS.....	10
1.2.1. RUGOSITAT SUPERFICIAL	10
1.2.2. DURESA.....	15
1.2.3. BRUNYIT.....	16
1.2.4. ESTAT DE L'ART SOBRE BRUNYIT	19
1.3. OBJECTE PRINCIPAL DEL PROJECTE.....	24
1.4. OBJECTIUS SECUNDARIS DEL PROJECTE	24
1.5. NORMATIVA.....	25
2. PART EXPERIMENTAL	26
2.2. SELECCIÓ DEL MATERIAL	26
2.3. PREPARACIÓ DE LA PROVETA.....	26
2.4. MÀQUINES I EQUIPAMENT	27
2.4.1. FRESADORA DE CONTROL NUMÈRIC.....	27
2.4.2. GENERADOR ULTRASONIDOS	28
2.4.3. EINA DE BRUNYIR AMB BOLA	28
2.4.4. RUGOSÍMETRE.....	30
2.4.5. MICRODURÒMETRE	32
2.5. PROCEDIMENT DEL BRUNYIT	35
2.5.1. PARÀMETRES DEL PROCÈS.....	35
2.5.2. DISSENY DEL L'EXPERIMENT	35
2.5.3. MESURA RUGOSITAT SUPERFICIAL.....	38
2.5.4. DETERMINACIÓ DEL PERFIL DE DURESA.....	38
3. RESULTATS I DISCUSSIÓ	40
3.2.1. RESULTATS DE LA RUGOSITAT SUPERFICIAL DESPRÉS DEL BRUNYIT AMB BOLA.....	40
3.2.2. RESUM ANÀLISIS RUGOSITAT	48
3.2.3. RESULTATS DE LA MESURA DE LA DURESA APLICANT UNA CÀRREGA DE 50g.....	49
3.2.4. RESULTATS DE LA MESURA DE LA DURESA APLICANT UNA CÀRREGA DE 5g.....	55

4.	ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	57
5.	CONCLUSIONS	59
6.	PRESSUPOST	61
7.	BIBLIOGRAFIA	65
8.	ANNEX A	67
A1.	Càlculs del procés de mecanitzat previ	67
A2.	Resultats mesura rugositat.....	71
A3.	Resultats Protocol correcció mesura longitud	73
A4.	Resultats mesura duresa	74
A5.	Codi CNC	113

1. INTRODUCCIÓ

Actualment a la indústria, els processos de deformació plàstica superficial (DPS) permeten obtenir millors acabats, incrementar les propietats físic-mecàniques, la duresa superficial per reduir el desgast, disminuir la rugositat i per tant disminuir la fricció entre els components entre d'altres millores.

Dins dels processos de DPS, el brunyit amb bola millora l'acabat superficial i en conseqüència un augment d'algunes propietats físic - mecàniques. El present document pretén fer un estudi d'aquest procés atenent a diferents factors que intervenen en el procés de brunyit.

L'acabat superficial que es pot aconseguir amb el brunyit amb bola depèn d'una sèrie de factors, amb els quals s'aconsegueixen diferents acabats i tensions residuals acumulades. El brunyit és un procés que permet aconseguir una rugositat menor, millorant la duresa superficial i obtenint millors prestacions respectant les toleràncies geomètriques de fabricació obtingudes anteriorment amb un procés previ. Aquest procés té la peculiaritat que no hi ha pèrdua de material, ja que aquest es deforma el material provocant apilaments de la superfície mitjançant una bola que deforma plàsticament les irregularitats per la acció d'una força exercida amb bola de duresa suficient com per deformar la superfície (Figura 1).

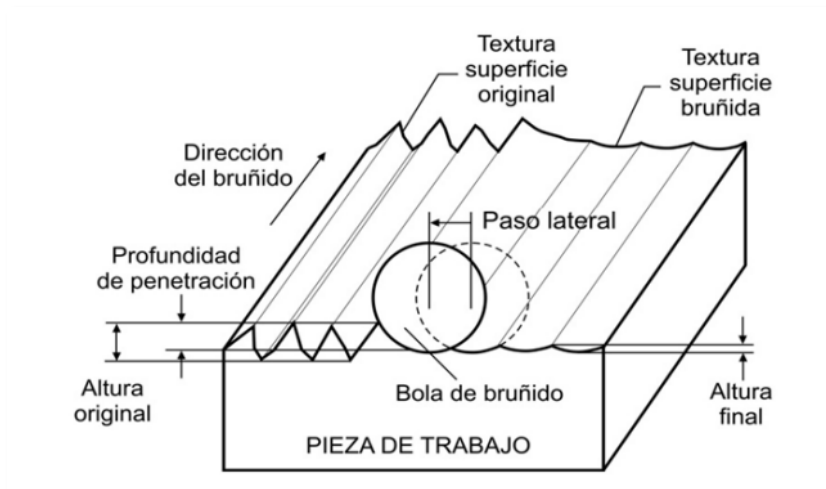


Figura 1 Diagrama esquemàtic del procés de brunyit amb bola.
(Fang-Jung Shiou & Chen, 2003).

L'aixafament del material provoca els següents efectes sobre la superfície:

- Reducció de la rugositat superficial en més d'un ordre de magnitud. L'acabat final és de l'ordre del rectificat.
- Generació de tensions residuals de compressió en la superfície de la peça, la qual cosa és beneficiós de cara al comportament a fatiga del component.
- Augment de la duresa superficial. A més, l'absència de calor evita canvis metal·lúrgics en la superfície.

1.2. CONCEPTES PREVIS

1.2.1. RUGOSITAT SUPERFICIAL

La rugositat superficial es defineix com les irregularitats produïdes sobre la superfície d'aquesta, per l'acció d'haver estat transformada mitjançant qualsevol procés de fabricació (Figura 2).

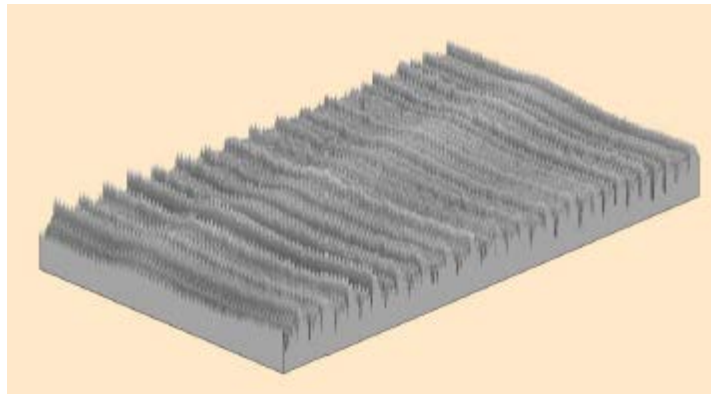


Figura 2 Irregularitats superficials representades amb un equip d'adquisició 3D.

La rugositat superficial desitjada per a una peça d'enginyeria dependrà en gran part a la finalitat d'aquesta en un procés. Per exemple, superfícies més rugoses experimenten més desgast durant el temps d'utilització. És un factor important a controlar durant el disseny del procés de fabricació de les mateixes. La rugositat obtinguda durant un procés de mecanitzat, dependrà de la geometria de la eina de tall, a més d'altres paràmetres que defineixen el procés de fabricació, com ara l'avanç o la rigidesa del sistema de tall.

Per caracteritzar la qualitat superficial d'una peça en 2 dimensions es poden calcular els paràmetres en el perfil brut (P) o, després del filtre, en el perfil de rugositat (R) o en el perfil d'ondulació (W). Per cada paràmetre, es defineix el tipus de filtre i el *cut-off* a utilitzar. El *cut-off* és una llargada d'ona que s'estableix com a freqüència d'un filtre passa baixos, que ens permet diferenciar entre aquells punts del perfil que pertanyen a l'ondulació, i aquells que pertanyen a la rugositat. El perfil P seria el brut sense filtrar (Figura 3).

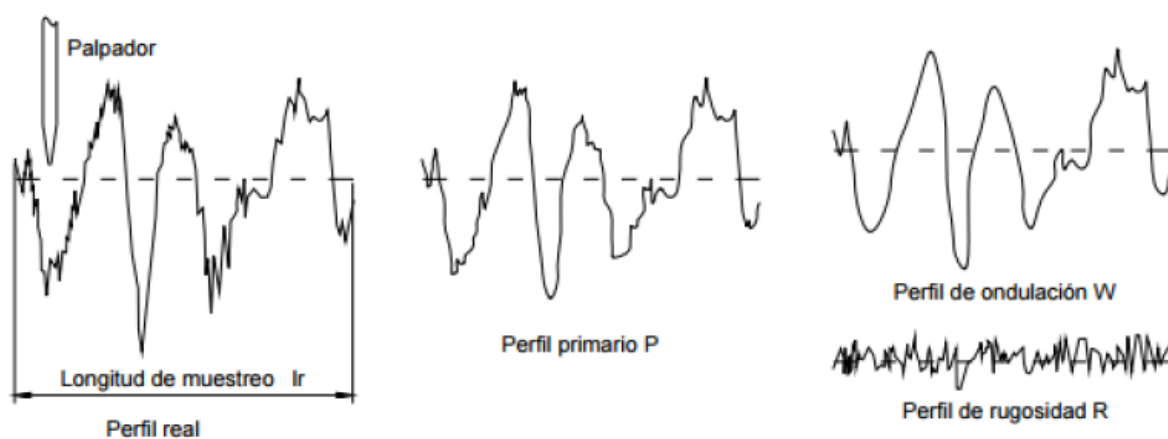


Figura 3 Perfils que s'obtenen mitjançant la mesura de la textura d'una superfície amb un rugosímetre de contacte. (ocw.unican.es)

El perfil de rugositat s'obté a partir del perfil efectiu per un instrument d'avaluació amb sistema de filtratge (filtrat d'ones) per excloure les irregularitats degudes a imperfeccions alienes al procés de fabricació, i lligades a irregularitats del material de partida (ondulació). El perfil de rugositat es troba superposat al perfil d'ondulació, d'aquí la necessitat de disposar d'un sistema que permeti excloure aquest últim per una mesura d'influències no desitjades (Figura 4)[12].

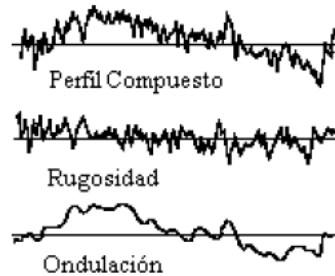


Figura 4 Perfils de rugositat [12].

Els paràmetres de rugositat en un perfil de superfície es defineix amb una *R* majúscula seguit d'un caràcter com a subíndex. Aquest subíndex marca la metodologia de càlcul per quantificar la rugositat.

Els paràmetres més estesos per descriure les irregularitats superficials són: R_a i R_t . Tots aquests paràmetres es defineixen previ càlcul de la línia mitjana en el perfil, que actua com una línia de referència transversal, i que es calcula per regressió de mínims quadrats, de forma que l'àrea continguda sobre la línia és iguala la continguda sota la mateixa,

R_a : rugositat superficial mitjana aritmètica. Es tracta de la suma de les àrees superiors i inferiors respecte de la línia de referència. S'utilitza per valorar la qualitat superficial d'una peça mecanitzada (Figura 5), i es calcula com la suma dels valors absoluts de les àrees dividides per la longitud de mostreig (Eq. 1).

$$R_a = \frac{1}{l_n} \int_0^{l_n} |y(x)| dx \quad (\text{Eq. 1})$$

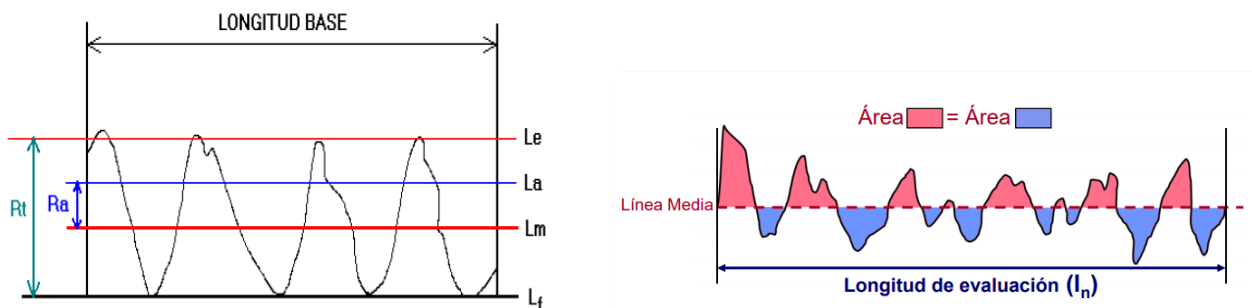


Figura 5 Rugositat superficial mitjana aritmètica R_a .

R_a es el paràmetre més utilitzat per estandarditzar la rugositat d'una peça i la norma ISO el prescriu per indicar les toleràncies superficials en plànols de fabricació, i es quantifica en micròmetres. Aquest paràmetre indica irregularitats verticals de la superfície a mesurar de en termes de mitjana, i no considera la irregularitats horitzontals (si existeixen) i per tant es possible que superfícies amb diferents acabats superficials tinguin el mateix valor de R_a (Figura 6).

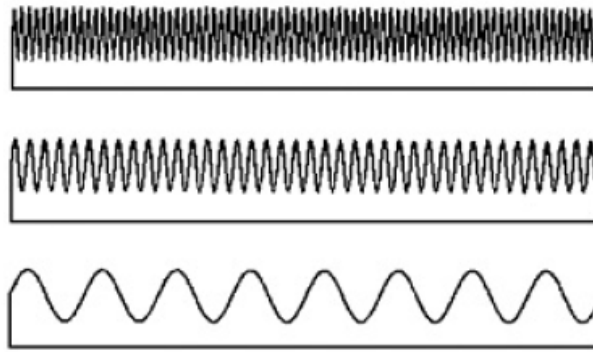


Figura 6 Superfície igual valor de R_a i diferents acabats.

Avantatges del paràmetre R_a :

- Aplicable a la majoria dels processos de fabricació
- Per la seva aplicació, tots els aparells presenten aquest paràmetre.
- Les marques inherents del procés de mecanitzat no alteren substancialment el seu valor.

Desavantatges del paràmetre R_a :

- El valor de R_a no defineix la forma de la irregularitat d'un perfil, podem tenir un valor de R_a pràcticament igual per a una superfície amb procés d'acabat diferent.
- No existeix distinció entre pics i valls i per tant, en alguns processos amb molta diferència entre pics i valls, el paràmetre R_a no es adequat [12].

R_t : rugositat total del perfil en la longitud de avaluació. Representa l'alçada entre el pic més alt i la vall més profunda, independentment de les longituds bàsiques, és a dir, en tota la longitud de avaluació (Figura 7).

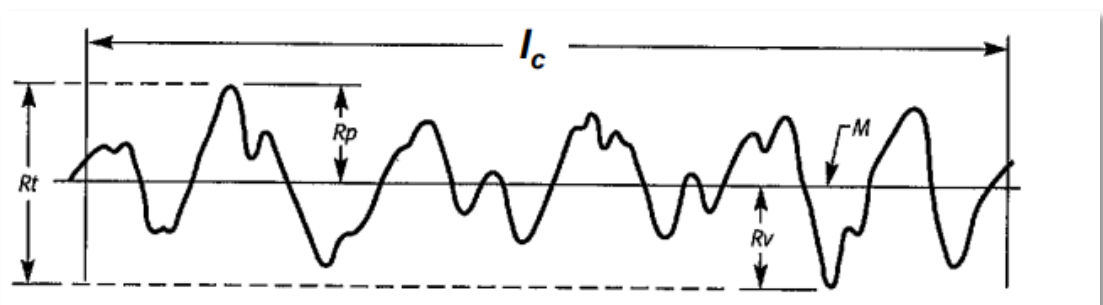


Figura 7 Rugositat total del perfil en la longitud de avaluació.

El paràmetre R_t considera la longitud de mesura igual a la longitud del palpador del equip (Figura 8).

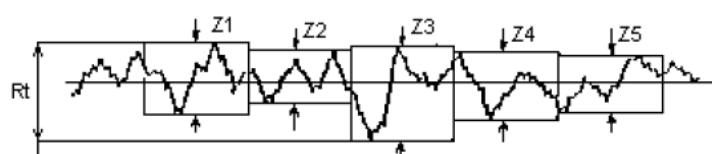


Figura 8 Longitud d'avaluació [12].

Avantatges del paràmetre R_t :

- Considera tota la longitud d'avaluació (carrera del palpador).

Desavantatges del paràmetre R_t :

- En alguns casos la rigidesa d'avaluació comporta falsejament de resultats.
- Poc utilitzat.
- No tots els equips incorporen aquest paràmetre.
- Per tal de valorar els gràfics, cal que el perfil registrat sigui el perfil de rugositat.
- Individualment no presenta informació suficient.

En els plànols de fabricació, per caracteritzar les propietats superficials, s'utilitza al següent símbol (Figura 9):

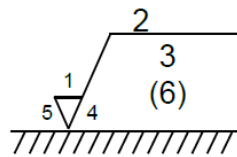


Figura 9 Propietats superficials.

- 1: Valor de la rugositat R_a en μm o número de la classe de rugositat de N1 a N12 (Figura 10).
- 2: Procés de fabricació, tractament o recobriment.
- 3: Longitud base.
- 4: Direcció de les estries de mecanitzat.
- 5: Mesures de mecanitzat.
- 6: Altres valors de rugositat (entre parèntesis).

Valor de la rugosidad R_a (μm)	Clase de rugosidad	Símbolo Equivalente	
50	N 12	▼	Operacions de desbast
25	N 11	▼	
12,5	N 10	▼	
6,3	N 9	▼▼	Operacions d'acabat
3,2	N 8	▼▼	
1,6	N 7	▼▼▼	Super acabat o rectificat
0,8	N 6	▼▼▼	
0,4	N 5	▼▼▼	Pulit
0,2	N 4	▼▼▼	
0,1	N 3	▼▼▼▼	
0,05	N 2	▼▼▼▼	
0,025	N 1	▼▼▼▼	

Figura 10 Valors de rugositat i classe de rugositat.

Per avaluar aquestes irregularitats, en l'actualitat existeixen eines per mesurar els diferents paràmetres de la rugositat segons el seu principi de funcionament, com ara el rugosímetre de contacte.

Aquest instrument es compon de [10]:

- Agulla: s'introdueix entre els pics i les valls. Normalment de diamant.
- Captador: Registra els moviments verticals de l'agulla.

- Patí: es recolza sobre la superfície i serveix de filtre mecànic.
- Motorització: empeny l'agulla sobre la superfície.
- Electrònica: registra les dades del captador, les processa i obté els paràmetres desitjats:

La norma ISO 4288:1998, defineix la longitud de mostreig equivalent, longitud base, de tall o *cut-off*. Qualsevol d'aquest termes es refereix al mateix concepte. El *cut-off*, és la longitud necessària a partir de la qual s'integren les senyals i es calculen els paràmetres de rugositat. La norma defineix uns valors típics 0,08, 0,25, 0,8 i 2,5 mm. Un cop calibrat el rugosímetre, es realitza una primera mesura de rugositat i posteriorment s'ajusta el *cut-off* segons el resultat obtingut.

Per a un valor de R_a de $0,1 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$ s'utilitza un *cut off* de 0,8 mm. Per a una R_a entre 2 i $10 \mu\text{m}$ s'utilitza una longitud base de 2,5 mm. En general, la longitud *cut-off*, ha de ser suficient per avaluar la rugositat i ha de contenir tots els detalls representatius excloent la ondulació per tal de no variar la inclinació de la forma del perfil de rugositats de cadascuna de les mostres.

Per tant, es important que la longitud de *cut-off* no sigui ni massa petit ni massa gran per una rugositat donada, que inclouria valors de perfil ondulació que afectarien al resultat de la mesura de la rugositat. Podem dir, que el *cut-off*, es un element de filtratge per evitar la ondulació.

El palpador realitza un mostreig de la longitud de avaluació que es la longitud de *cut-off* per un número, entre 1 i 5. La senyal es mostreja, es filtra segons una llargada de tall i que s'estableix una línia mitjana per mínims quadrats que marca la meitat del perfil.

La línia mitjana per mínims quadrats, de la què ja s'ha parlat abans, és la línia de referència la forma de la qual és la del perfil geomètric i que divideix el perfil de forma que dins de la longitud bàsica, la suma dels quadrats de les desviacions (diferències) a partir d'aquesta línia sigui mínima (Figura 11).

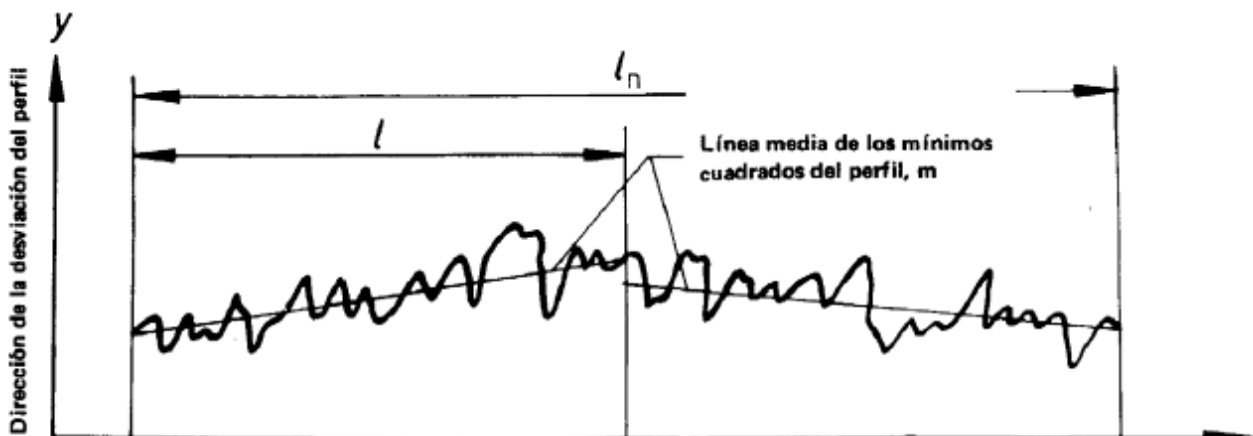


Figura 11 Línia de mínims quadrats del perfil [12].

1.2.2. DURESA

La prova de duresa és una mesura de la resistència del material a una deformació plàstica localitzada, és a dir, quan resisteix un material a ser ratllat o penetrat per un altre. Existeixen diferents escales per quantificar la duresa d'un material, aquestes depenen del instrument utilitzat per realitzar l'assaig de duresa. L'assaig Brinell es realitza mitjançant una bola esfèrica, mentre que l'assaig Vickers utilitza com a penetrador un diamant en forma de piràmide regular de base quadrada. Es mesura la dimensió de la petjada resultant i es relaciona amb un valor de duresa. Quan més tou es un material major i més es la petjada i menor el valor de duresa i viceversa.

L'aparell utilitzat per fer assajos per penetració per mesura la duresa de un material se'ls denomina duròmetre. Consisteix en una premsa que realitza una força normalitzada mitjançant un penetrador normalitzat sobre la superfície del material. La petjada del penetrador es mesura amb un microscopi instal·lat al propi duròmetre i amb una expressió matemàtica (Eq. 2) es calcula el valor de la duresa.

$$HV = \frac{2P \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d} = \frac{0.18909 \cdot P}{d} \quad (\text{Eq. 2})$$

On:

HV: Dureza Vickers

P: carga aplicada en N

d: Diagonal mitja de la petjada en mm.

α : Angle format per les cares del penetrador de diamant = 136°

En els assajos de duresa Vickers, un penetrador de diamant molt petit amb forma piramidal s'indenta en la superfície de la mostrada aplicant una càrrega compresa entre 1 i 1000 g (Figura 12). La petjada resultant s'observa pel microscopi amb l'augment corresponent i es mesuren les diagonals per tal de convertir dades en duresa.

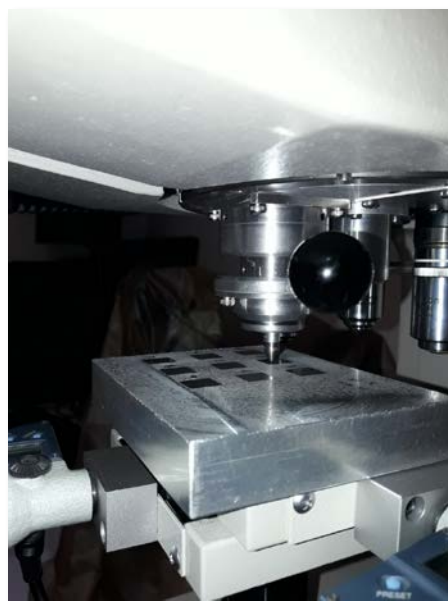


Figura 12 Penetrador del microduròmetre.

Es pretén realitzar un experiment amb l'alumini EN AW2017 per tal de verificar la influència del brunyit amb bola assistit per vibracions en l'acabat superficial tot controlant una sèrie de factors com la força compressiva, el pas lateral, assistència per vibracions ultrasòniques i variant la estratègia de passada.

1.2.3. BRUNYIT

El brunyit és un procés d'acabat que consisteix en la deformació plàstica de les irregularitats d'una superfície per millorar el seu acabat superficial. La deformació plàstica ve donada per l'acció d'una força exercida per la bola o corró de la eina utilitzada o brunyidor, fabricades amb materials d'elevada duresa, resistència i límit elàstic. El procés consisteix en pressionar la eina de brunyir sobre les microirregularitats de la superfície i generar un lliscament o rodament sobre la superfície tot deformant les crestes de la superfície i aplanant la superfície buida de les valls.

Quan es presenten geometries complexes, ja siguin superfícies cilíndriques, còniques, canvis de secció, radis i diàmetres interiors, en les quals es requereix una qualitat superficial elevada (diàmetres interiors d'engrenatges, bieles dels motors...), amb els processos de rectificat convencional no és suficient i per tant, d'aquí la necessitat d'un procés capaç de millorar l'acabat superficial de peces prèviament mecanitzades.

El procés de brunyit s'utilitza per incrementar la duresa superficial i reduir la rugositat. Permet millorar la resistència a la fatiga, preveu la corrosió (disminució de la porositat) i crea tensions residuals compressives de la superfície.

Les tècniques del brunyit es caracteritzen per ser processos que no requereixen grans inversions i que generen un acabat de gran qualitat, tant en aspectes d'acabat superficial com en la millora de les característiques mecàniques del component.

- **Cost de la operació relativament baix:** el cost d'un equip de brunyit pot oscil·lar des de 500 € quan es tracta d'una eina de brunyit mecànic fins els 8.000 € quan es tracta de equips de brunyit hidrostàtic, on és necessari adquirir un equipo de bombeig a alta pressió. El brunyit té l'avantatge de poder utilitzar-se en la mateixa màquina on es realitza el mecanitzat previ, evitant grans Inversions en maquinària i el trasllat de peces entre màquines. Disminueix el temps d'operació i millora la productivitat.
- **Acabat superficial i toleràncies geomètriques:** obtenció de bons acabats superficials. El brunyit genera rugositats superficials petites, del ordre del rectificat, amb valors entre 0,05 μm i 0,5 μm de rugositat mitja. El procés de brunyit permet mantenir o millorar les toleràncies dimensionals prèvies del mecanitzat. Es pot realitzar a velocitats elevades, minimitzant el temps de procés.
- **Efecte integral sobre les propietats mecàniques:** respecte a altres tècniques d'acabat superficial, el brunyit millora les propietats mecàniques dels components. El procés introdueix tensions residuals, augmenta la duresa superficial i en general millora la integritat superficial del component (augment de la vida a fatiga i augment a la resistència al desgast i corrosió). A diferència d'altres tractaments mecànics que milloren la propietats dels components, el brunyit no empitjora la qualitat superficial i no genera elevades temperatures durant la seva aplicació.

- **Vida de la eina:** el material de les eines de brunyir poden ser de metall dur, ceràmic o diamant. Són materials d'elevada duresa i que degut a la naturalesa del procés no tendeixen a sofrir desgast excessius.
- **Facilitat de programació i ús:** el procés necessita poca intervenció del operari, minimitzant així possibles errors humans. No necessària de personal especialment qualificat.
- **Baixos requisits de parell i potència:** les forces generades durant el procés són normalment inferiors a les forces generades en el procés de mecanitzat. Per aquest motiu es pot aplicar el procés en la mateixa màquina on es mecanitza, ja que la precisió la dona la eina i no la màquina-eina.
- **Absència de ferritja:** es un procés ecològicament més net comparat amb altres acabats, ja que no es generen malbaratament al no haver eliminació de ferritja. També permet prescindir de determinats tractaments tèrmics i una disminució de la contaminació del medi ambient.

Com tot procés, el brunyit també té els seus inconvenients i limitacions. La major limitació és geomètrica. La geometria de la eina limita la geometria final de la peça a fabricar. En el cas del brunyit, la restricció la marca principalment el radi de la bola o corró de la eina. Es recomana treballar amb l'eix de la eina en direcció normal a la superfície.

Un problema greu que es pot donar en l'aplicació d'aquesta tècnica, és la existència de porus i fractures just sota de la superfície mecanitzada, com el cas d'algunes fundicions. Aplicant una pressió elevada en la zona danyada, internament es poden produir una ruptura o esquerda de la superfície acabada. Donat que es tracta d'una peça acabada, aquest problema és el més greu que es pot presentar.

Procés	Avantatges	desavantatges
Brunyit amb bola	Millora la rugositat superficial, duresa, resistència a la fatiga, desgast i corrosió.	Requereix d'una eina de brunyit mecànica o hidrostàtica.
	No genera ferritja. Procés ambientalment més net.	Requereix de refrigerant.
	Incrementa vida útil de la peça.	
	Alta precisió dimensional.	
	Procés d'acabat ràpid.	

	Millora la rugositat superficial.	Indueix esforços residuals de tensió.
Arrencament de ferritja	S'utilitza una eina d'adquisició fàcil i econòmica (fresa...).	Genera sobrants (ferritja)
	No incrementa la duresa de forma considerable.	Procés d'acabat lent.
		Requereix de refrigerant.
Tractaments tèrmics i termoquímics	Millora la duresa i resistència a la corrosió i al desgast.	Genera sobrants del procés.
	Allibera esforços residuals de tensió.	Consumeix gran quantitat d'energia.
	Incrementa vida útil de la peça.	Procés de tractament lent.

Taula 1 Comparativa de processos de millora de les propietats físic-mecàniques [5].

En la figura 13, es mostra un exemple de la topografia d'una superfície mecanitzada on la part esquerra se l'hi aplicat una operació de brunyit i s'aprecia la deformació produïda així com la diferència en el perfil de rugositat en la frontera entre la zona brunyida i mecanitzada.

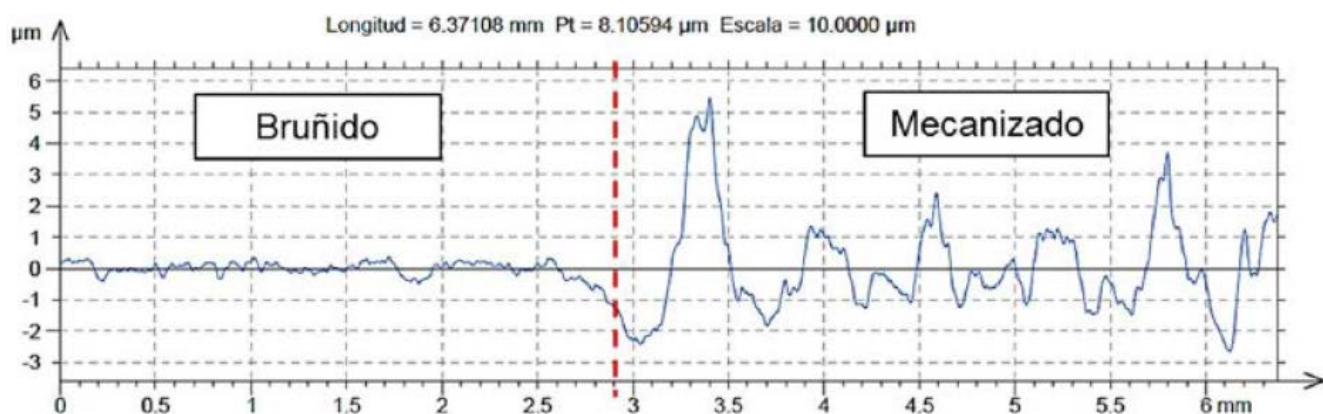


Figura 13 Perfil de rugositat d'una superfície mecanitzada i brunyida.

Per tant, per realitzar un operació de brunyit, es necessari tenir en compte alguns factors que són els següents:

- Material: característiques.
- Geometria de la peça.
- Tipus d'eina i la seva geometria.
- Paràmetres a controlar: avanç, força, vibració, número de passades, pas lateral, etc.

1.2.4. ESTAT DE L'ART SOBRE BRUNYIT

En aquest apartat es mostren uns articles referents al brunyit amb bola i es resumeixen els coneixements sobre aquest procés i finalment es mostren els valors dels paràmetres sobre els quals realitzarem el nostre assaig.

1.2.4.1. Article 1

Títol: *Experimental study of lateral pass width in conventional and vibrations-assisted ball burnishing.*

Autors: *G. Gomez-Gras · J. A. Travieso-Rodriguez · R. Jerez-Mesa · J. Lluma-Fuentes · B. Gomis de la Calle.*

En aquest article, es realitza un brunyit amb bola assistit per vibració variant l'amplada de pas lateral en dos materials diferents: alumini 2017 i acer AISI 1038. Defineixen el brunyit com una operació mecànica i acabat sense arrencada de ferritja provocant un desplaçament de material (Figura 14B, apilaments i aixafaments) per la força aplicada. Els paràmetres seleccionats per l'assaig són: amplada pas lateral (b , distància entre dos passades successives), número de passades (N , repetició de la passada anterior sense variar la b), la força aplicada (F , calibrada i executada pel eina de brunyir) i l'assistència al procés amb vibració (2,5kHz) i sense vibració.

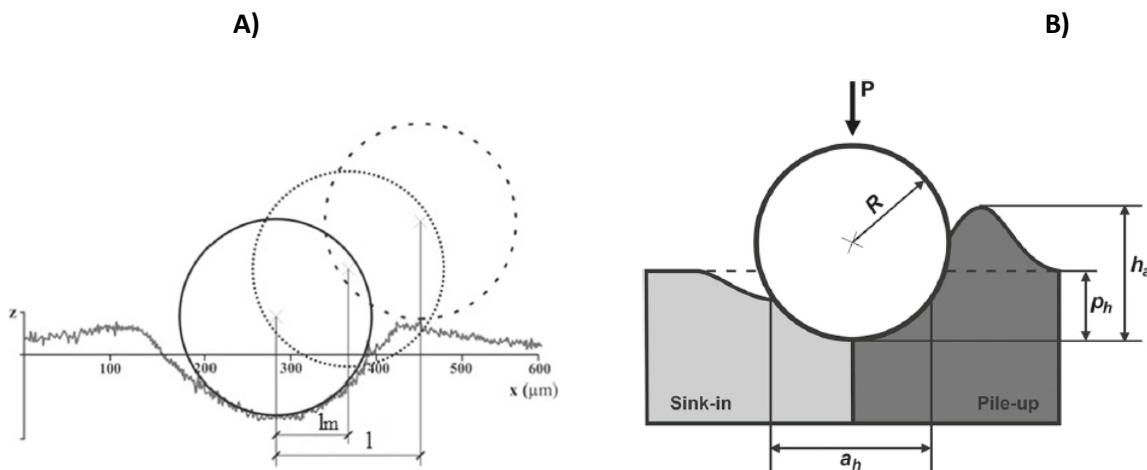


Figura 14 A. Perfil de l'amplada del pas lateral. **B.** Diagrama de contacte entre la bola de la eina de brunyir i la superfície de la peça. [1]

Abans de l'operació de brunyit, es realitza un fresat previ als dos materials: R_a (alumini): 1,591 μm i R_a (acer): 2,239 μm . L'experiment es realitza en dos fases, ambdues amb una eina de brunyir de 10 mm de diàmetre i una velocitat d'avanç de 600 mm/min. En la primera fase és una caracterització de la petjada brunyida variant la força (F) i el número de passades (N). En la segona fase, es realitza dos passades consecutives separades a una amplada de pas lateral (b). En aquesta fase, la segona passada es realitza variant el pas lateral (b) (Figura 14.A) i obtenen rugositats baixes quan $b = l$ (distància entre la vall més profunda i el pic més alt), això permet acotar b [$l - l_m$], sent l_m la meitat de la distància l [1].

En la Figura 15, ens presenten els resultats de de les petjades amb les tres variants per a un procés de VABB. En color negre, un brunyit amb una sola passada, color vermell amb 2 passades i $b = l_m$, en blau 2 passades i $b = l$. Per l'alumini 2017(a), la força aplicada va ser de 90 N, i per l'acer AISI 1038 (b), 110 N. La primera passada provoca desplaçament, i que, per tant, genera apilament de material i que aquest en la segona passada, es torna a xafar els apilaments provocats en la primera passada. En termes de rugositat, els autors, conclouen que els resultats mostren una millora de la rugositat superficial si la segona passada es realitza amb un pas lateral de l . La vibració (VABB) és un element

influent en la rugositat mitja de la superfície degut a que aquest indueix més energia i que per tant, genera major deformació plàstica en la superfície del material.

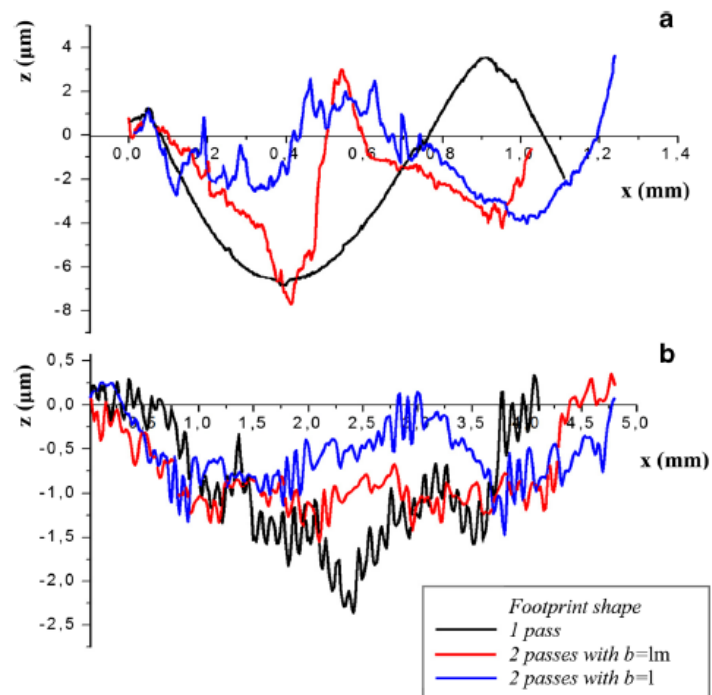


Figura 15 Comparació brunyit amb les tres variants [1].

1.2.4.2. Article 2

Títol: *Effects of ball burnishing parameters on surface finish – A literatura survey and discussion.*

Autors: *N. H. Loh and S. C. Tam*

La força i la velocitat d'avanç són els paràmetres més importants i que una adequada selecció dels paràmetres permet obtenir un millor acabat superficial augmentant les propietats mecàniques. Defineixen la rugositat com les irregularitats produïdes per una eina durant un procés de mecanitzat que es poden eliminar amb un procés per deformació plàstica (Brunyit) desplaçant els pics cap a les valls (apilament de material) reduint així les irregularitats segons Figura 16A [3].

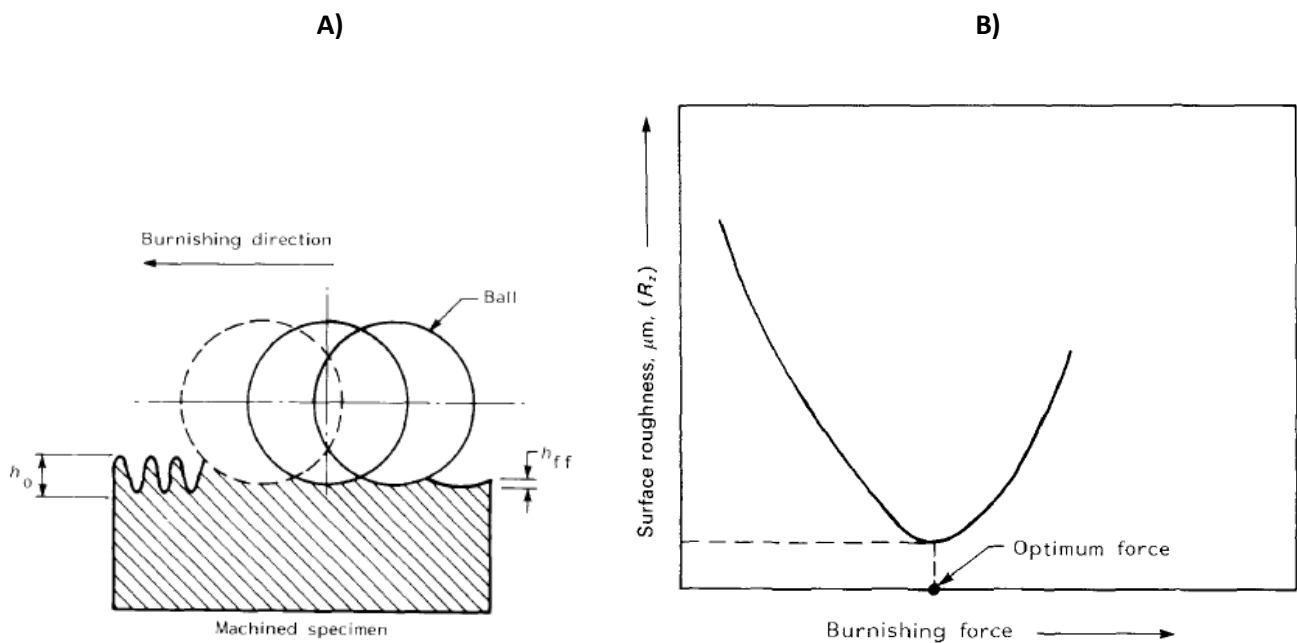


Figura 16 A. Deformació de les irregularitats. **B.** Relació entre la força i la rugositat [3].

La rugositat mesurada en la direcció perpendicular a la direcció del brunyit és major que la rugositat mesurada en el sentit del brunyit degut al fet que els factors que determinen la rugositat transversal (diàmetre de la bola i velocitat alimentació) no afecten a la rugositat longitudinal.

Es diferencia entre brunyit normal, amb vibració i ultrasònic. Al brunyit amb vibració i ultrasònic, s'incrementa el número de paràmetres però s'obtenen millors resultats que en el brunyit normal. Hi ha una millora la R_z de 3,2 – 6,4 μm a 0,4 – 0,8 μm (Ferro) amb una freqüència de vibració de 20-50 Hz. Mentre la força del brunyit augmenta, la rugositat baixa fins a un punt (força òptima) en que comença a créixer de nou (Figura 16B) i que a aliatges de titani, la força òptima es troba entre 500 - 1000 N amb una millora de la rugositat respecte al mecanitzat del 82%. Per acers i fosa de ferro, la càrrega òptima és de 200 N i 500 – 700 N.

A velocitats d'avanç baixes, el material presenta irregularitats característiques d'un metall excessivament estressat superficialment i el grau d'enduriment és major a una velocitat d'avanç baixa. Una velocitat alta provoca enduriment excessiu, un desprendiment de la capa superficial i augment de la rugositat. L'ús del paràmetre *feed-rate*, depèn d'altres factors com el diàmetre de la bola, la velocitat i la força. En brunyit normal en aliatges de titani, recomanen un diàmetre de bola de 5-10 mm i una passada a una velocitat d'alimentació de 0,06 – 0,15 m/rev^{-1} . El número de

passades recomanat és entre 2 i 3. Realitzant passades addicionals o aplicant més força no comporta un increment de la duresa superficial màxima sinó que pot succeir l'efecte contrari (Figura 16B).

Existeix una relació de proporcionalitat (inversa) entre el diàmetre de la bola i l'alçada de les irregularitats (Figura 17). L'acabat superficial millora a mesura que el diàmetre de la bola augmenta de un valor de 6,35 mm a 12,7 mm, valor on la duresa superficial torna a empitjorar fins a un diàmetre de bola de 19,05 mm. Un altre paràmetre representatiu en la Figura 17, és la velocitat de brunyit i la seva influència en la rugositat final. S'observa un augment de la rugositat a mesura que augmenta la velocitat, sent $19 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ el valor crític.

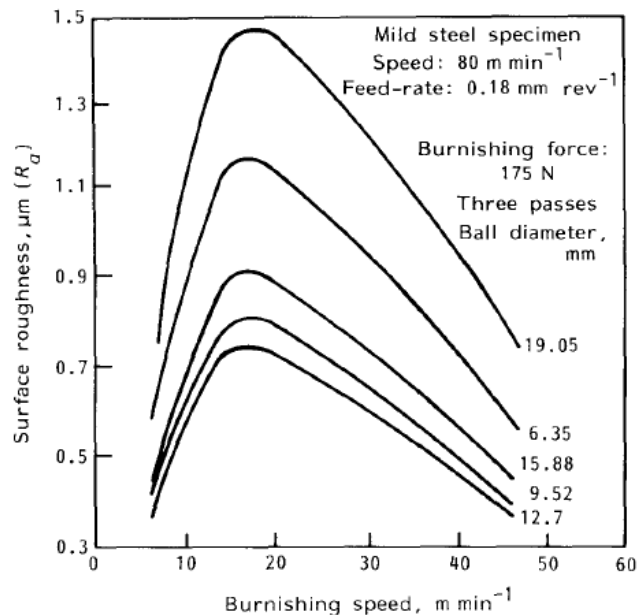


Figura 17 Relació entre Rugositat superficial, Velocitat de brunyit i diàmetre de la bola [3].

1.2.4.3. Conclusions de l'estat de l'art sobre el brunyit

La bibliografia consultada determina que la força i el nombre de passades són els paràmetres que més influeixen sobre el resultat del brunyit amb bola i que aquest afecta de forma diferent a cada material, per exemple en l'alumini s'observa apilaments provocats per la deformació plàstica. La força aplicada depèn de diversos factors, com poden ser el material a brunyir, velocitat d'avanç i diàmetre de la bola entre d'altres. Destaquen que per obtenir els millors resultats, el nombre de passades necessàries és 2 o 3 i que realitzar passades addicionals no incrementa la duresa superficial màxima i que pot succeir l'efecte contrari, tornar a disminuir.

Un altre factor important del brunyit és la bola amb la qual es realitza aquest procés d'acabat, sent 12,7 mm el diàmetre de la bola per obtenir millors resultats en termes de rugositat segons l'article de 2 de *N. H. Loh i S. C. Tam* [3], assajat a una força de 175 N, 3 passades i una velocitat d'avanç de 80 m/min. També determinen que la rugositat mesurada en la direcció perpendicular a la direcció de gir de la bola del brunyit és major que la rugositat en el sentit del brunyit.

Respecte a la vibració i el pas lateral, troben una influència destacable de la vibració en el valor òptim del pas lateral b . En general, en els processos assistits amb vibració s'obtenen millores en la rugositat i duresa superficial, encara que la vibració requereix de valors més amplis de b degut al desplaçament de material deformat. Un pas lateral de $b = l$, (sent " l " la distància entre la vall més profunda i el pic més alt) millora la rugositat, encara que el valor de b es un paràmetre tecnològic dependent del material i de la força aplicada.

Per acabar, la bibliografia consultada, recomana l'ús de valors de pas lateral (b) (Taula 2) a una força determinada que aplicarem en el projecte i compararem per verificar si els resultats obtinguts concorden amb els valors recomanats.

2017 aluminum	NVABB	$b = 0.29 \text{ mm } (F = 90 \text{ N})$
	VABB	$b = 0.33 \text{ mm } (F = 90 \text{ N})$
AISI 1038 steel	NVABB	$b = 0.36 \text{ mm } (F = 110 \text{ N})$
	VABB	$b = 0.39 \text{ mm } (F = 110 \text{ N})$

Taula 2. Valors recomanats de pas lateral b que utilitzarem en l'experiment. [1]

Segons aquestes observacions extretes de la bibliografia, es plantegen els següents objectius.

1.3. OBJECTE PRINCIPAL DEL PROJECTE

L'objectiu general del treball consisteix en realitzar l'estudi del procés de brunyit amb bola per tal de determinar la influència dels diferents paràmetres en la rugositat i duresa superficial analitzant les gràfiques d'efectes mitjans i recomanar els valors dels paràmetres tecnològics a utilitzar.

1.4. OBJECTIUS SECUNDARIS DEL PROJECTE

L'abast dels treballs d'aquest projecte, es formula en termes dels següents objectius secundaris:

- Calcular el procés de mecanitzat previ a realitzar a la proveta pel posterior assaig.
- Desenvolupar el codi CNC a implantar a la fresadora Lagun MC 600.
- Brunyir amb bola de 10 mm de diàmetre la superfície definida segons els paràmetres en cada cas, utilitzant la eina de brunyir instal·lada a la fresadora tot connectant a l'eina un generador de ultrasons per tal variar l'assistència durant al procés de brunyit.
- Determinar la rugositat superficial. Obtindrem la rugositat superficial després de brunyir amb bola la superfície tractada i la compararem amb la rugositat inicial de la superfície abans de ser brunyida.
- Determinar la duresa final del material brunyit amb microduròmetre Buehler 5114 i comparar amb la duresa previ al brunyit.
- Analitzar mitjançant software estadístic Minitab. Determinar la influència de cadascun dels factors que intervenen en el experiment.
- Elaborar l'anàlisi econòmica. Descripció de les partides per tal d'elaborar el projecte.
- Treure conclusions respecte quina estratègia de brunyit és més adequada pel material escollit i proposar millores de la nova estratègia segons les variables d'entrada.

1.5. NORMATIVA

La normativa de referència per la elaboració del projecte ha estat la següent:

Normativa que fa referència a la rugositat superficial:

- ISO 3274:1997: Estados de superficie: método del perfil, características nominales de los aparatos de contacto.
- ISO 4287:1997: Estados de superficie: método del perfil, términos, definiciones y parámetros de estados de superficie.
- ISO 4288:1996: Estados de superficie: método del perfil, reglas y procedimientos para la evaluación del estado de superficie.
- ISO 11562:1997: Caracterización metrológica de los filtros con fase correcta y bandas de transmisión a utilizar en los perfiló metros de contacto.
- ISO 4288:1998. En aquesta es defineix la denominada longitud de mostreig equivalent, longitud base o *cut-off*.

Designació alumini:

- UNE-EN 515:1994

Normativa que fa referencia a l'assaig de duresa:

- Norma UNE-EN ISO 6507-1 Assaig de duresa Vickers.

Normativa Control Numèric:

- Norma ISO 2382/1 1974

2. PART EXPERIMENTAL

2.2. SELECCIÓ DEL MATERIAL

El material escollit per realitzar l'experiment es l'Alumini EN AW 2017. S'ha escollit primer per les seves aplicacions industrials i per ser un material amb el què el grup de recerca on s'ha desenvolupat aquest projecte ha treballat.

Els resultats del brunyit amb bola dependrà dels paràmetres del procés i també de les condicions inicials dels material.

Per tant, per garantir que les condicions inicials de la peça amb la que es realitza l'experiment siguin iguals en tota la seva superfície, es realitza un planejat (fresat de cara) per tal de assegurar que la rugositat inicial sigui igual en tota la seva superfície i així poder comprar els resultats obtinguts en la superfície brunyida respecte l'estat inicial.

2.3. PREPARACIÓ DE LA PROVETA

Es tracta d'una peça de geometria plana el mecanitzat de la qual es duu a terme amb una fresadora de control numèric *LAGUN MC 600 AMB CONTROL NUMÈRIC FAGOR 8065 M*, mitjançant una operació de planejat amb una fresa frontal per garantir un determinat grau de rugositat de la superfície posteriorment a brunyir.

Per garantir l'acabat superficial previ al tractament, la proveta (Figura 18) se li a practicat un planejat amb una fresa frontal en una fresadora CNC amb les següents dades:

Concepte	Valor
Velocitat de gir n	3000 rpm
Diàmetre fresa frontal \varnothing	80 mm
Velocitat Perifèrica fresa V_c	754 m/min

Taula 3 Paràmetres del mecanitzat previ de la proveta.

Per determinar la velocitat perifèrica de la fresa, s'ha utilitzat la següent equació:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (\text{Eq. 3})$$

V_c : velocitat perifèrica fresa (mm/min)

n : gir de la eina (min^{-1})

D : diàmetre de la fresa (mm)



Figura 18. Proveta en brut abans de mecanitzar.

2.4. MÀQUINES I EQUIPAMENT

La eina de brunyir s'instal·la en la fresadora tal com es mostra en la Figura 19. Es pot observar que l'eina es troba connectada a un equip generador de ultrasònics.



Figura 19 Procés de brunyit amb bola en una fresadora CNC.

2.4.1. FRESADORA DE CONTROL NUMÈRIC

Es tracta d'una fresadora del fabricant Lagun, model MC 600 que garanteix una potència de motor de 11 kW i una gamma contínua de velocitats (fins 3500 rpm) i d'avanç, integrada amb control numèric CNC de Fagor 8065 M (Figura 20).

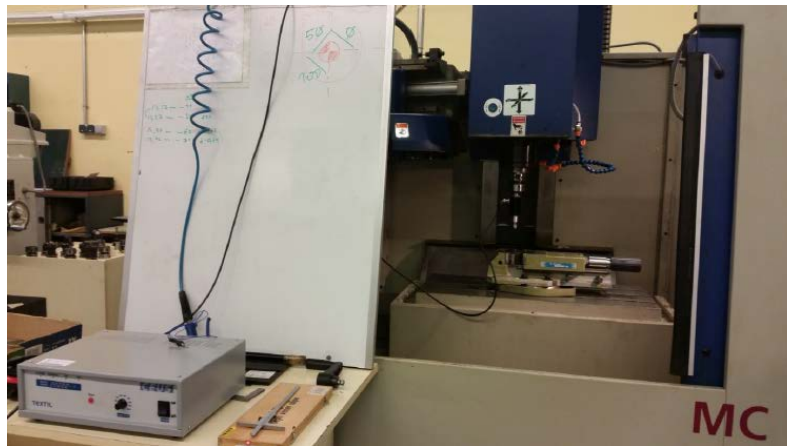


Figura 20. Centre de mecanitzat Lagun MC 600

2.4.2. GENERADOR ULTRASONIDOS

Per tal de realitzar els assajos amb vibració assistida, disposem d'un generador de freqüència de la casa Ceus. El piezoelèctric que conté la eina de brunyir genera la vibracions ultrasòniques (Figura 21). Durant l'assaig es varia la assistència per vibració del 0, 50 i 100 %. La primera es correspon amb el procés no assistit.



Figura 21 Generador ultrasons.

2.4.3. EINA DE BRUNYIR AMB BOLA

La eina de brunyit és un prototip (**B10PZ40k83**) desenvolupat pel grup d'investigació del departament de enginyeria Mecànica de la EEBE. La eina és un brunyidor amb bola assistida per vibracions ultrasòniques. Les vibracions són incorporades al sistema mitjançant un conjunt de materials ceràmics piezoelèctrics que, excitats mitjançant un generador extern (Figura 22), ressonen a 40 kHz de freqüència nominal.

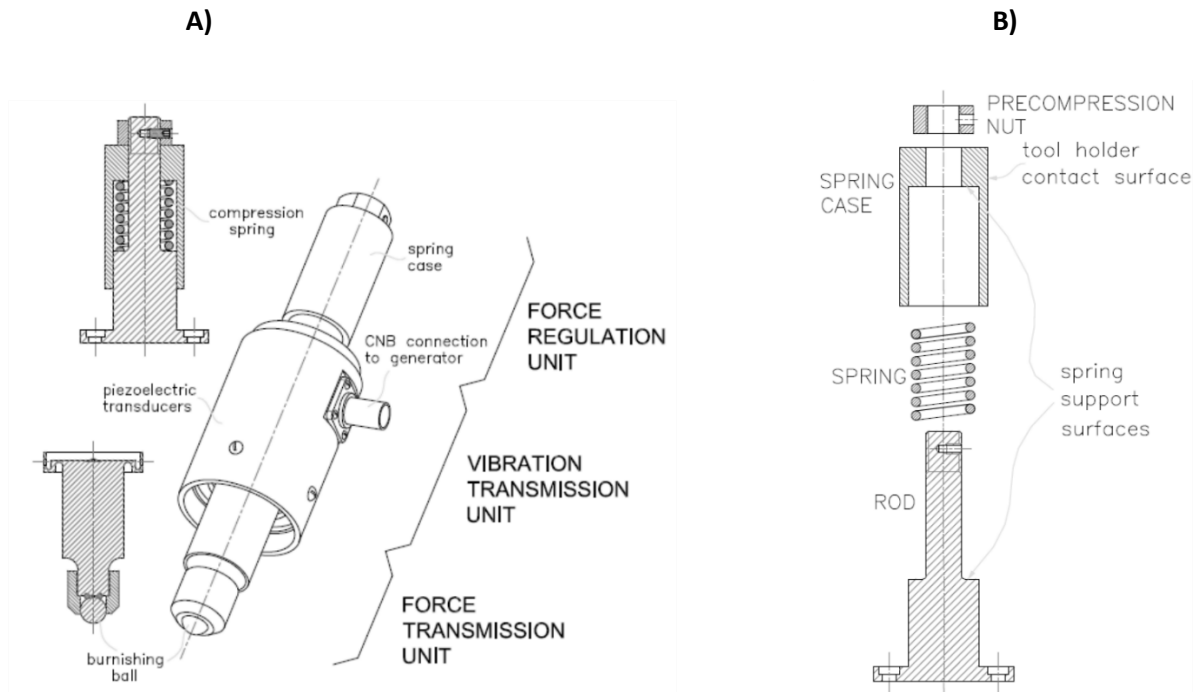


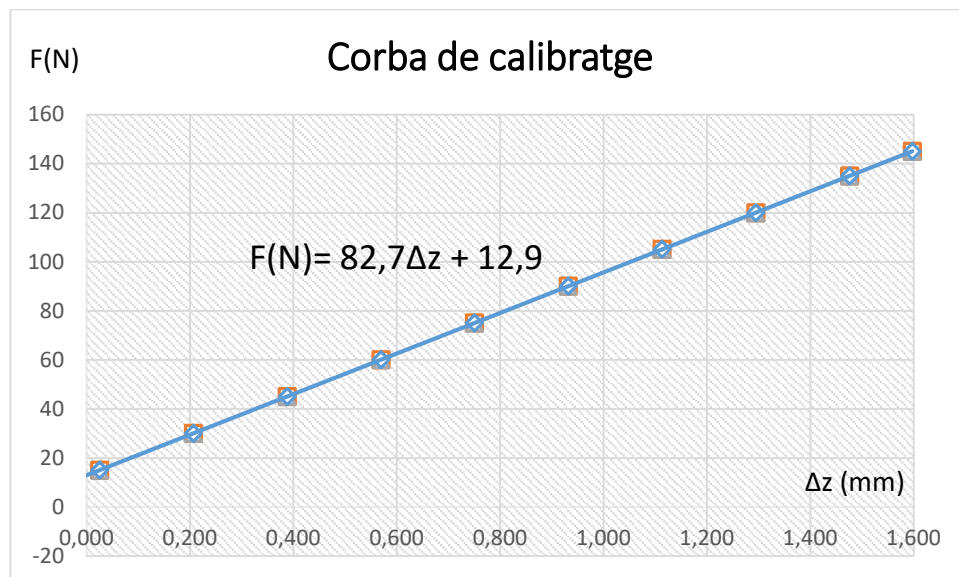
Figura 22 A. Visió general de la eina de brunyir. **B.** Detall del sistema de regulació de la força.

La eina de brunyir s'acobra en la fresadora CNC Lagun 600 (Figura 23). En el sistema d'ancoratge inclou un motlle en l'interior de la eina, la compressió de la qual calibrada permet regular la força nominal exercida durant el procés. La bobina de la eina es excita per un generador extern, que permet vibrar unes làmines ceràmiques piezoelèctriques, assistint al procés. La bola és de 10 mm de diàmetre i actua sota la acció d'una força normal lo suficientment alta per tal de deformar els pics del perfil de la superfície a tractar.



Figura 23 Muntatge i operació de brunyit.

El fet que la força del brunyit es reguli mitjançant la compressió d'una molla, s'ha de realitzar una corba de calibratge prèvia. La corba de calibratge (Gràfica 1) permet establir una relació entre la força exercida durant el brunyit en funció del desplaçament de la eina en Z respecte l'origen preestablert amb la superfície a tractar. Es pot controlar la força de treball des de el control de la màquina de CNC.



Gràfica 1 Corba de calibratge del prototip B10PZ40K83.

2.4.4. RUGOSÍMETRE

Un cop realitzat el brunyit amb bola segons el disseny del experiment elaborat prèviament, per cada experiment s'ha d'avaluar la rugositat superficial obtinguda tant en la direcció d'avanç de l'eina de brunyit com en la direcció perpendicular a aquesta.

En aquest projecte s'ha utilitzat un rugosímetre de la casa MITUTOYO model SurfTest SJ-210 Series (*Surface Roughness Tester*). És un equip que realitza un seguiment del perfil, en línia recta, mitjançant una fina punta denominada palpador i que tradueix les variacions d'alçada de superfície en senyals elèctriques que es registren i processen en un equip de control. A partir d'aquestes senyals es calculen els diferents paràmetres de rugositat (Figura 24 i 25).



Figura 24 Mesura de la rugositat amb MITUTOYO SJ210.

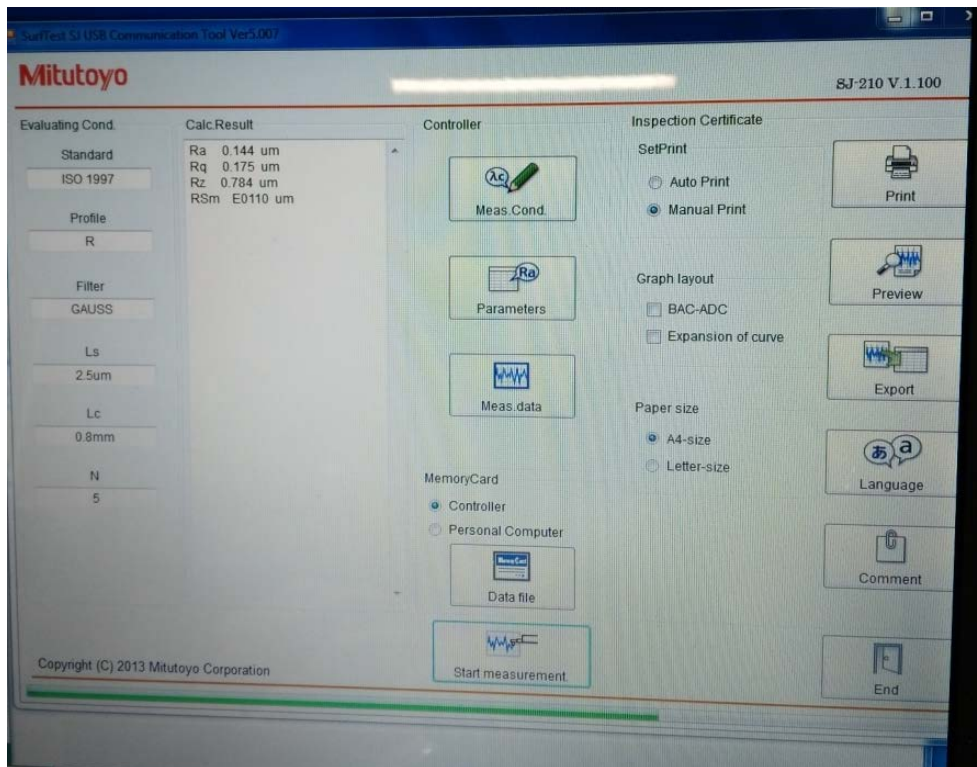


Figura 25 Unitat de control del rugosímetre.

2.4.4.1. CONFIGURACIÓ DELS PARÀMETRES

Les mesures de rugositat s'han obtingut amb les següents configuracions:

- *Cut off* = 0,08. S'han realitzat mesures amb *cut off* 0,8, 0,25 i finalment amb 0,08 que són les dades amb les que es treballarà a la vista de les rugositats resultants del procés.
- Longitud de avaluació: $N = 5$. El palpador realitza un mostreig de la longitud de avaluació que és la longitud de *cut off* per un número, entre 1 i 5.

El rugosímetre s'ha configurat amb un *cut-off* de 0,08 i $N = 5$ ja que totes les rugositats obtingudes tenen un valor de $R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$ seguint la norma ISO 4288:1998. A la pantalla es mostra com a resultat la mitjana dels resultats obtinguts en cada *cut off* o el màxim per tota la longitud de avaluació, en funció de cada paràmetre.

2.4.5. MICRODURÒMETRE

El projecte contempla mesurar la duresa superficial abans i després de la operació de brunyit per tal d'avaluar l'efecte del brunyit. Per tant, és necessari comparar la duresa abans i després del brunyit amb càrregues petites en la superfície brunyida.

Abans de començar l'assaig, és necessari tres protocols abans d'iniciar l'assaig de microduresa. El primer protocol és el de la " *Corrección de la medida de longitud que un usuario*", la segona " *Determinación de durezas con un microdurómetro Buehler 5114*" i finalment, " *Protocol de verificació de la càrrega del microdurómetro Buehler 5114*", tots tres protocols són del departament de ciència de materials de l'EEBE.

Per tal de mesurar la duresa superficial, s'ha utilitzat un microduròmetre del fabricant Buehler, model 5114. Al microduròmetre és un aparell que servei per mesurar la duresa d'un material mitjançant l'aplicació d'una força de compressió generada per una massa que actua sobre un punxó de forma i dimensions normalitzades. El microduròmetre disposa d'un indentador Vickers i per tant les petjades tenen forma de rombe. La carga pot variar entre 1g fins a 2 kg.

2.4.5.1. PROCEDIMENT INDENTACIÓ

L'objectiu principal és perforar superficialment el material a examinar, amb un penetrador de diamant.

- 1) Situar la mostra a indentar sobre la taula portaobjectes (Figura 26).



Figura 26 Proveta a indentar.

- 2) Definirem la càrrega a treballar, en aquest cas son 50g. No es modifica la velocitat d'assaig. Temps d'aplicació de la càrrega 10 segons (Figura 27).



Figura 27 Pantalla de comandament -Temps d'aplicació de la càrrega.

- 3) Col·loquem l'objectiu de x100 per enfocar la superfície de la nostra mostra on aplicarem la indentació.
- 4) Una vegada el microduròmetre ha acabat de fer la indentació (ens avisa mitjançant un avis sonor "pi"), tornem a posar l'augment de 100 i mesurem la picada amb les línies de mesura del microduròmetre. Fem el següent pas per mesura les diagonals i així determina la duresa (Figura 28).

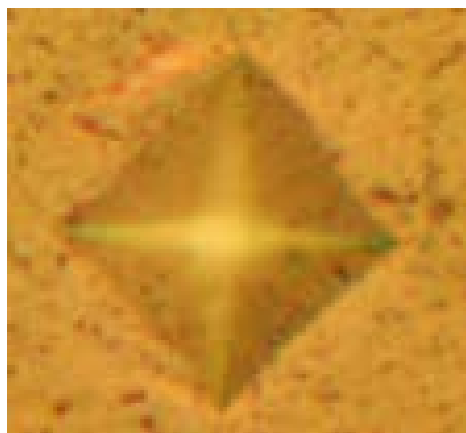


Figura 28 Forma de la indentació.

- 5) Mesurem las dos diagonals amb ajuda de les línies de mesura, primer la D1 i després la D2 (Figura 29).

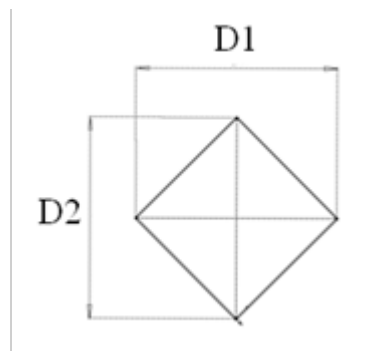


Figura 29 Mesura de les diagonals de la indentació.

6) Anotem el valor de les dos diagonals i amb la següent equació es determina la duresa HV.

$$HV = \frac{2P \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d} = \frac{0.18909 \cdot P}{d} \quad (\text{Eq. 4})$$

On:

HV: Dureza Vickers

P: carga aplicada en N

d: Diagonal mitja de la petjada en mm.

α : Angle format per les cares del penetrador de diamant = 136°

2.5. PROCEDIMENT DEL BRUNYIT

2.5.1. PARÀMETRES DEL PROCÈS

L'acabat superficial que es pot aconseguir amb el brunyit amb bola depèn d'una sèrie de factors, amb els quals s'aconsegueixen diferents acabats i tensions residuals acumulades. Per aquest projecte, s'ha plantejat un disseny d'experiments parcial de tipus Taguchi, el que permet assajar amb poques condicions de testeig una certa varietat de paràmetres i nivells dels mateixos.

Les variables independents considerades en el model experimental són:

- La longitud del pas lateral (**b**): la distància entre dos passos successius.
- Força aplicada (**F**): calibrada i executada per la eina de brunyit.
- Procés assistit (**V**): amb vibració assistida (**VABB**) o sense vibració assistida (**NVABB**). En aquest cas, el procés NVABB es codifica amb el 0 % d'amplituds de vibracions.
- Trajectòria (**T**): estratègia escollida per realitzar la segona passada del brunyit amb bola (la primera passada sempre es realitza en la mateixa direcció), i que pren els valors següents:
 - Paral·lela
 - Perpendicular
 - 45°

A la Taula 4 es mostren els paràmetres y les seus nivells de variació: els valors de força i pas lateral s'han obtingut de l'article 1 de l'apartat 1.2.4.

Els valors de la força i del pas lateral s'han obtingut de la bibliografia consultada.

Paràmetres	Símbol	Nivells		
		Mínim.	Mitjà.	Màxim.
Pas lateral	b (mm)	0,29	0,35	0,41
Força	F (N)	45	90	135
Procés assistit	V (%)	0	50	100
Trajectòria	T	PAR	PERP	45DEG

Taula 4 Paràmetres de entrada dels experiments.

Es mantenen constants altres paràmetres com poden ser la velocitat d'alimentació, el número de passades ($N=2$) i el diàmetre de la bola de 10 mm.

2.5.2. DISSENY DEL L'EXPERIMENT

S'ha utilitzat un disseny experimental del tipus Taguchi amb un disseny de 4 factors de 3 nivells cadascun.

Per tal de aleatoritzar els experiments s'utilitza un disseny experimental basat en tècniques experimentals resultant un experiment tipus Taguchi 3^4 (L9). Consistent en combinar totes les variables amb els seus nivells entre sí, així poder avaluar la influència entre si.

Mitjançant el software Minitab, podem crear un disseny d'un experiment i posteriorment realitzar un anàlisi del disseny per poder generar gràfiques i poder interpretar i a la vegada presentar els resultats.

A continuació es descriu el procediment per crear l'experiment amb el software Minitab:

- 1) Seleccionar crear diseño de Taguchi (Figura 30).

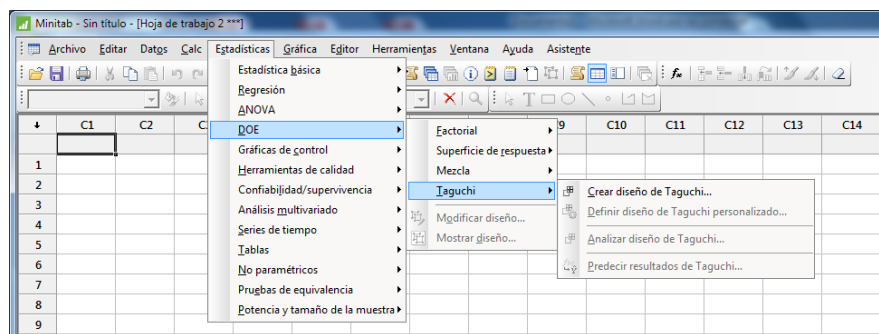


Figura 30 Minitab, disseny Taguchi. Creació del experiment.

- 2) Disseny amb 3 nivells i 4 factors. S'opta per un disseny L9 (3^4 vol dir 4 factors amb 3 nivells cadascun) amb 9 "corridos" (Figura 31).

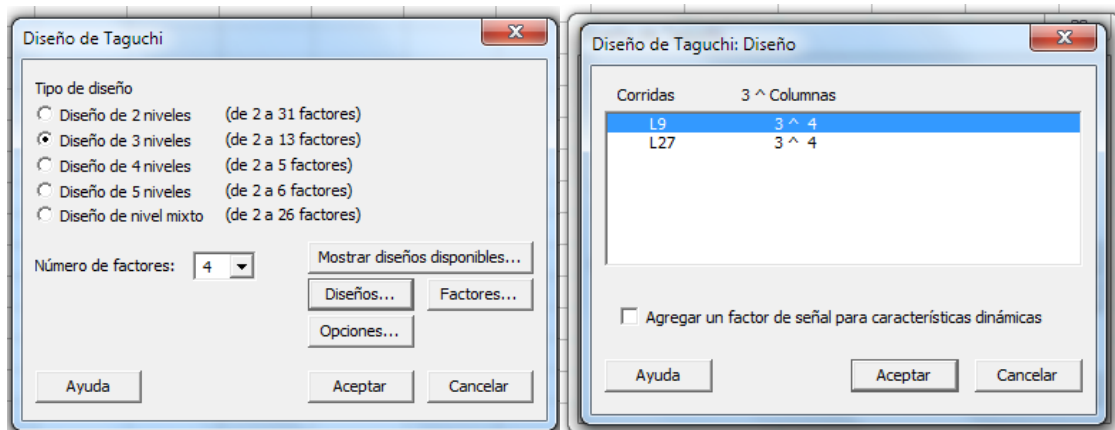


Figura 31 Disseny Taguchi.

- 3) Aleatoritzar l'orde d'assaig (Taula 5), ajuda a garantir que el model compleixi amb certs supòsits estadístics i a reduir els efectes dels factors que no estan inclosos en l'estudi.

Número assaig	Procés assistit (V)	Trajectòria (T)	Força (F)	Pas lateral (b)
1	0	PAR	45	0,29
2	0	PERP	90	0,35
3	0	45	135	0,41
4	50	PAR	90	0,41
5	50	PERP	135	0,29
6	50	45	45	0,35
7	100	PAR	135	0,35
8	100	PERP	45	0,41
9	100	45	90	0,29

Taula 5 Ordre d'assaig

- 4) Implantar l'experiment (Figura 32) en un CODI CNC i introduir a la fresadora LAGUN MC600 integrada amb control numèric de FAGOR 8065M. Un cop realitzats els experiments, trobar les variables de resposta. Un cop obtingudes la o les variables de resposta, analitzar amb les eines que ofereix Minitab.

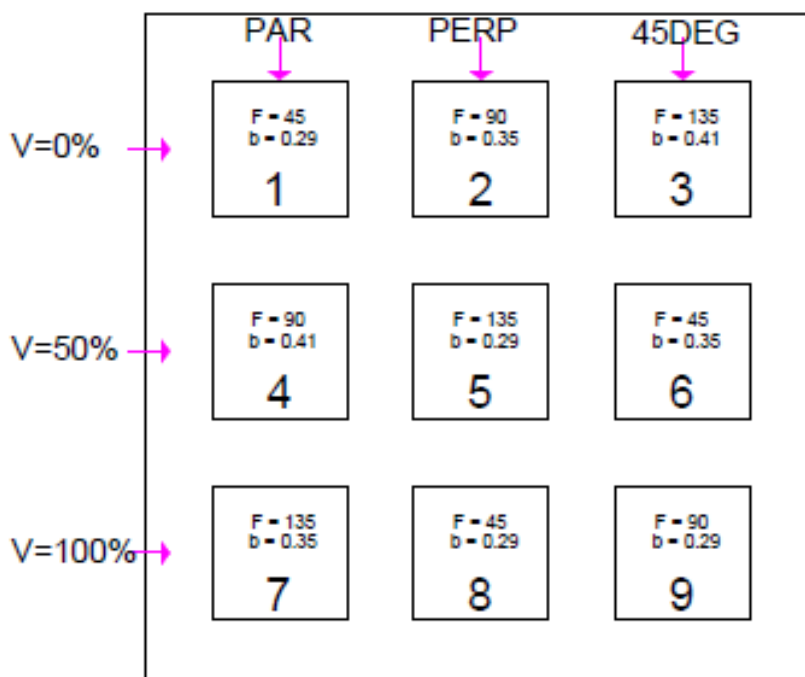


Figura 32 Representació de les 9 mostres a brunyir en l'alumini EN AW 2017 de 10 mm d'ample cada petjada.

2.5.3. MESURA RUGOSITAT SUPERIFICIAL

Una vegada hem brunyit, s'ha de mesurar la rugositat superficial obtinguda després del brunyit. Per avaluar la variació de la qualitat superficial de la peça després del brunyit, la rugositat superficial resultant és un bon indicador.

L'estudi de la rugositat s'ha realitzat en les 9 àrees brunyides en zones diferents de la peça (Figura 33). Es mesura la Ra (rugositat mitjana aritmètica) i la Rt (rugositat màxima total en la longitud de avaluació). S'obtenen mesures en la direcció paral·lela i en la direcció perpendicular.

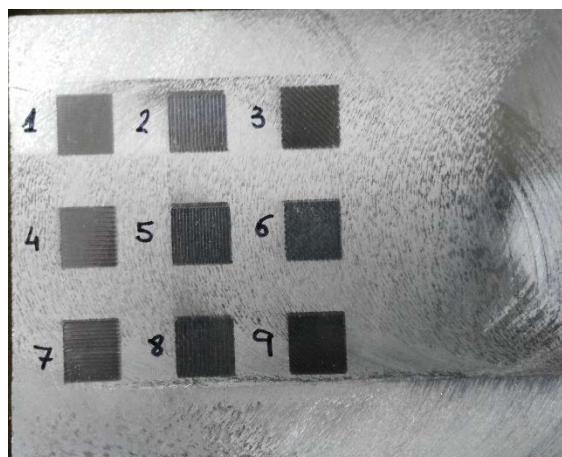


Figura 33 Peça brunyida.

Alhora de avaluar les irregularitats per tal de determinar la rugositat, s'ha utilitzat un rugosímetre (veure apartat 2.4.4).

Per tal de determinar la fiabilitat de la mesura, s'ha optat per aplicar el Criteri de Chauvenet. Es un mètode per calcular si una dada experimental de un conjunt de dades experimentals, es probable que sigui un valor atípic.[13]

Per aplicar el Criteri de Chauvenet, primer s'ha de calcular la mitjana i la desviació estàndard de la informació observada. Basant-se en quant difereix el valor dubtós de la mitjana, s'utilitza la funció de distribució normal per determinar la probabilitat que una dada donat sigui del valor de la dada dubtós. Es multiplica aquesta probabilitat pel nombre de dades de la mostra escollida. Si el resultat és inferior a 0.5, la dada dubtosa es pot descartar.

2.5.4. DETERMINACIÓ DEL PERFIL DE DURESA

Una vegada mesurada la rugositat superficial, un altre indicador a avaluar es la duresa. Es mesura la duresa sobre el perfil de les superfícies brunyides per establir l'efecte del brunyit sobre l'enduriment del material.

L'assaig de duresa s'ha realitzat amb un microduròmetre Buehler 5114 (a l'apartat 3.4.5 s'explica en profunditat la configuració dels paràmetres). La Taula 1 de la Norma Internacional ISO 6507, estableix el rang de forces d'assaig i designa el nostre assaig com " Assaig de microduresa Vickers" (Figura 34).

Rangos de la fuerza de ensayo, F N	Símbolo de dureza	Designación
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Ensayo de dureza Vickers
$1,961 \leq F < 49,03$	de HV 0,2 hasta $< HV 5$	Ensayo de dureza Vickers a baja fuerza
$0,098 07 \leq F < 1,961$	de HV 0,01 hasta $< HV 0,2$	Ensayo de microdureza Vickers

Figura 34 Rang de forces d'assaig ISO 6507-1:2005.

S'indenta 8 vegades en la mateixa línia a una separació de $b/2$ (b , pas lateral). Es realitza un matriu de 3×8 (Figura 35) de manera que la següent línia de indentació estigui separada $b/2$ de la anterior. Aquesta operació es repeteix en les 9 petjades totals. Hem optat per aquesta seqüència de mesura, i no la mesura habitual que es fa en una línia. S'ha realitzat la matriu perquè volíem veure si existeix una diferència significativa dels efectes del brunyit sobre la duresa entre una zona i una zona contigua de la petjada.

- Força aplicada ($m = 50g$) = 0,49 N
- Temps indentació: 10 segons.

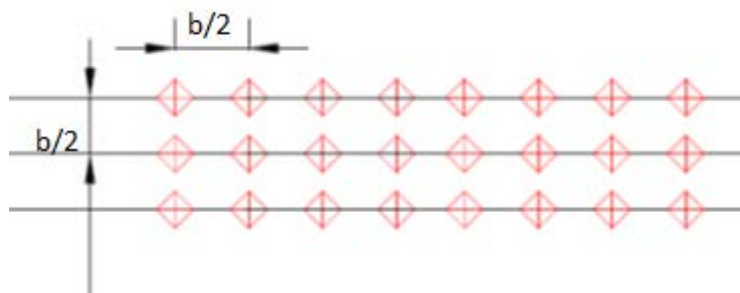


Figura 35 Matriu per indentar amb el microduròmetre.

3. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Les condicions inicials de la proveta a brunyir són les següents:

- Rugositat: R_a (rugositat mitja aritmètica) i R_t (rugositat màxima total en la longitud de avaluació) ambdues obtingudes en dos direccions: la paral·lela i la perpendicular a la direcció d'avanç de la operació de fresat previ (Taula 6).

Paràmetre	Resultat (μm)	Desviació estàndard (μm)
$R_a // (X)$	0,477	0,1464
$R_a \perp (Y)$	0,564	0,1526
$R_t // (X)$	2,748	0,8170
$R_t \perp (Y)$	2,877	0,8508

Taula 6 Condicions inicials en termes de Rugositat de la proveta.

- Duresa: s'ha mesurat mitjançant un microduròmetre la duresa inicial de la proveta després del mecanitzat. Es realitzen un total de 8 indentacions en diferents línies i de mitjana 81,3 HV (amb càrrega aplicada de 50 g) amb un desviació estàndard de 8,75 HV.

3.2.1. RESULTATS DE LA RUGOSITAT SUPERFICIAL DESPRÉS DEL BRUNYIT AMB BOLA

L'estudi de rugositat es realitza sobre 9 àrees brunyides en zones diferents de la peça fresada. Els indicadors per avaluar la rugositat, són R_a (rugositat mitja aritmètica) i R_t (rugositat màxima total en la longitud d'avaluació), ambdues obtingudes en dos direccions: la paral·lela i la perpendicular a la direcció d'avanç de la operació de fresat previ [4].

A la Taula 7 es mostren els resultats obtinguts després de les mesures realitzades amb el rugosímetre Mitutoyo SJ210.

Nº Exp.	Vib [%]	F [N]	Estratègia	b [mm]	$R_a \perp$	Desv. Est.	$R_t \perp$	Desv. Est.	$R_a //$	Desv. Est.	$R_t //$	Desv. Est.
					$R_a \perp$	$R_a \perp$		$R_t \perp$		$R_a //$		$R_t //$
1	0	45	PAR	0,29	0,086	0,0502	0,571	0,3581	0,06	0,0397	0,517	0,3319
2	0	90	PERP	0,35	0,031	0,0105	0,22	0,0808	0,116	0,0335	0,674	0,164
3	0	135	45DEG	0,41	0,064	0,0319	0,405	0,2479	0,096	0,0482	0,579	0,2566
4	50	90	PAR	0,41	0,071	0,0202	0,344	0,0579	0,065	0,0336	0,47	0,2279
5	50	135	PERP	0,29	0,102	0,0856	0,758	0,6232	0,133	0,0814	0,806	0,4409
6	50	45	45DEG	0,35	0,06	0,0154	0,436	0,1858	0,114	0,0388	0,85	0,2804
7	100	135	PAR	0,35	0,112	0,0319	0,674	0,192	0,109	0,0564	0,758	0,4014
8	100	45	PERP	0,41	0,105	0,057	0,781	0,3309	0,106	0,0669	0,676	0,3357
9	100	90	45DEG	0,29	0,12	0,0859	0,742	0,3331	0,105	0,0543	0,717	0,2982
Fresat previ					0,477	0,1464	2,748	0,8170	0,564	0,1526	2,877	0,8508

Taula 7 Resultat de les mesures de R_a i R_t i les seves desviacions estàndard en l'alumini EN AW2017 (μm).

On:

$R_a \perp$	Rugositat superficial mitja, mesurada en el sentit perpendicular a l'avanç del fresat previ.
$R_t \perp$	Rugositat màxima pic-vall, mesurada en el sentit perpendicular de l'avanç del fresat previ.
$R_a //$	Rugositat superficial mitja, mesurada en el sentit paral·lel a l'avanç del fresat previ.
$R_t //$	Rugositat màxima pic-vall, mesurada en el sentit paral·lel de l'avanç del fresat previ.

3.2.1.1. Anàlisi dels resultats de les mesures de rugositat superficial

A la taula 8 es pot observar que el valor de la rugositat superficial ha millorat respecte a la rugositat superficial de la peça prèviament fresada en tots els casos.

Nº Exp.	Vib [%]	F [N]	Estratègia	b [mm]	$R_a \perp$	% Millora Respecte Fresat previ	$R_t \perp$	% Millora Respecte Fresat previ	$R_a //$	% Millora Respecte Fresat previ	$R_t //$	% Millora Respecte Fresat previ
1	0	45	PAR	0,29	0,086	81,98%	0,571	79,22%	0,060	89,36%	0,517	82,03%
2	0	90	PERP	0,35	0,031	93,51%	0,220	91,99%	0,116	79,44%	0,674	76,57%
3	0	135	45DEG	0,41	0,064	86,59%	0,405	85,26%	0,096	82,98%	0,579	79,87%
4	50	90	PAR	0,41	0,071	85,13%	0,344	87,48%	0,065	88,48%	0,470	83,66%
5	50	135	PERP	0,29	0,102	78,63%	0,758	72,41%	0,133	76,42%	0,806	71,98%
6	50	45	45DEG	0,35	0,060	87,43%	0,436	84,13%	0,114	79,79%	0,850	70,45%
7	100	135	PAR	0,35	0,112	76,54%	0,674	75,47%	0,109	80,68%	0,758	73,65%
8	100	45	PERP	0,41	0,105	78,00%	0,781	71,58%	0,106	81,21%	0,676	76,50%
9	100	90	45DEG	0,29	0,120	74,86%	0,742	73,00%	0,105	81,39%	0,717	75,07%
Fresat previ					0,477	82,52%	2,748	80,06%	0,564	82,19%	2,877	76,64%

Taula 8 Resultats de les mesures de R_a , R_t (μm) i percentatge de millora (%).

A la Taula 2, podem observar que la rugositat superficial mitjana, $R_a \perp$, mesurada en el sentit perpendicular a l'avanç del fresat millora en un 82,52% i $R_a //$ mesurada en el sentit paral·lel a l'avanç del fresat millora en un 82,19% la rugositat superficial mitja al fresat previ. Si observem cadascun dels experiments, veurem que la rugositat mitja i màxima és més favorable en el sentit del fresat previ al brunyit amb bola.

La rugositat màxima pic-vall mesurada en el sentit perpendicular a l'avanç del fresat, també millora un 80,06% respecte a la rugositat màxima inicial. En el sentit paral·lel, $R_t //$, millora en un 76,64% respecte el valor inicial. S'observa que la vibració es presenta com un factor influent en la rugositat superficial final, doncs la vibració segons els resultats sembla no ser adequat pel brunyit amb bola, encara que beneficia la direcció Y en contrast de la direcció X.

Amb la configuració de $F = 90$ N; $b = 0,35$ mm; PERP i 0% de vibració, s'arriba a una menor rugositat mitja i màxima final en el sentit perpendicular a l'avanç del fresat. En canvi la configuració $F = 45$ N; $b = 0,29$ mm; PAR i 0% de vibració, s'arriba a una menor rugositat mitja final en el sentit paral·lel a l'avanç del fresat. L'assaig 4, $F = 90$ N; $b = 0,41$ mm;

PAR i 50% de vibració equilibra tant la direcció X com la Y, ja que obté bons resultats tant en la direcció perpendicular com al paral·lel al fresat.

3.2.1.2. Gràfiques d'efectes principals de les variables de resposta

Gràfica $R_a \perp = R_a(X)$:

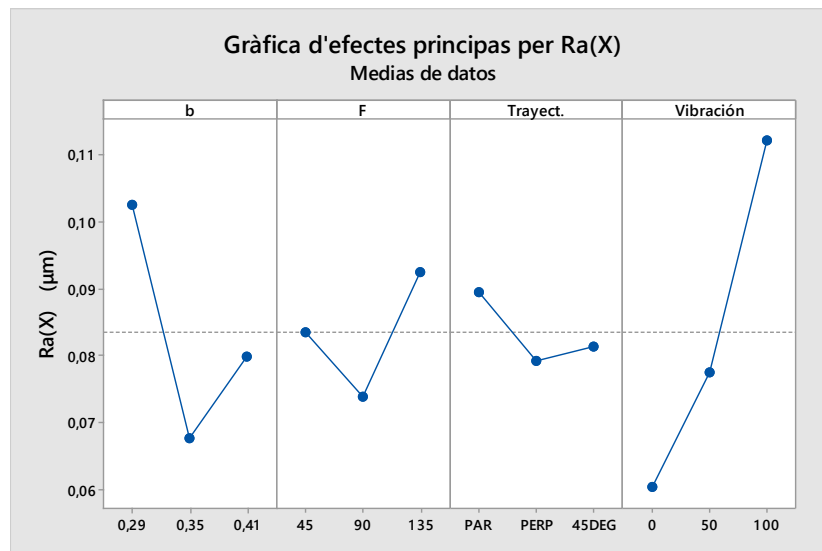


Figura 36 Efectes principals de les variables del procés sobre $R_a \perp$ (μm).

La assistència del procés amb vibracions (Figura 36) es presenta com el factor més influent en la rugositat mitjana final. Un augment de la amplitud de la vibració augmenta la rugositat mitjana del alumini, per tant assistir el procés de brunyit per a aquest material no sembla ser adequat.

Troblem al valor de 90 N com el valor crític de força per brunyit aquest alumini, ja que la força de 135 N comporta un deteriorament de la superfície.

L'amplada de pas lateral (b) de 0,35 mm sembla ser el més adequat, ja que al augmentar-se a 0,41 mm, la rugositat mitjana torna a créixer.

Per últim, la estratègia és el factor menys influent, i, en el cas d'aquest material, s'arriba a una menor rugositat mitjana final al utilitzar la estratègia perpendicular (PERP).

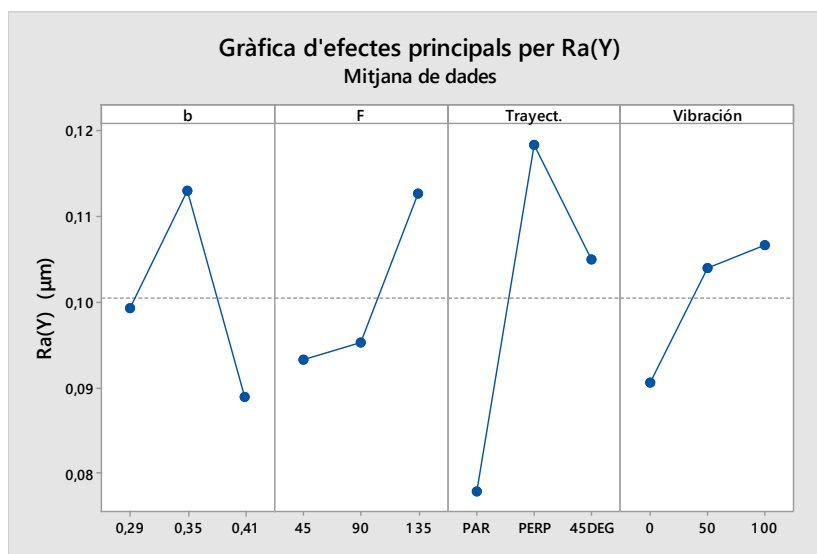
Gràfica $R_a // = R_a(Y)$:

Figura 37 Efectes principals de les variables del procés sobre $R_a //$ (μm).

Al igual que amb $R_a(X)$, la assistència del procés no sembla ser lo més adequat per millorar la rugositat mitjana en la direcció paral·lela al fresat inicial. Però, en aquest cas, la estratègia de brunyit sembla el factor més influent en la rugositat mitja final. Això pot ser degut a que les petjades de brunyit executades han sigut sobre una primera passada en la direcció X, que desplacen el material en la direcció Y, i que, per tant, són corregides al executar una estratègia PAR per la segona passada (ja que es torna a xafar els apilaments provocats), i són, però, agreujats al utilitzar la estratègia PERP.

Respecte a la força, tornem a trobar-nos un empitjorament de la superfície al sobrepassar els 90 N, encara que amb 45 N, s'obté millor rugositat superficial que amb 90 N.

El pas lateral té una influència invertida respecte a $R_a(X)$, al augmentar a 0,35 mm empitjora la rugositat mitja en Y, però, al passar a 0,41 millora de nou. Això pot ser degut a que ampliant la separació entre passades en la segona passada, s'elimina de forma més efectiva els apilaments provocats durant la primera passada.

Gràfica $R_t \perp = R_t(X)$:

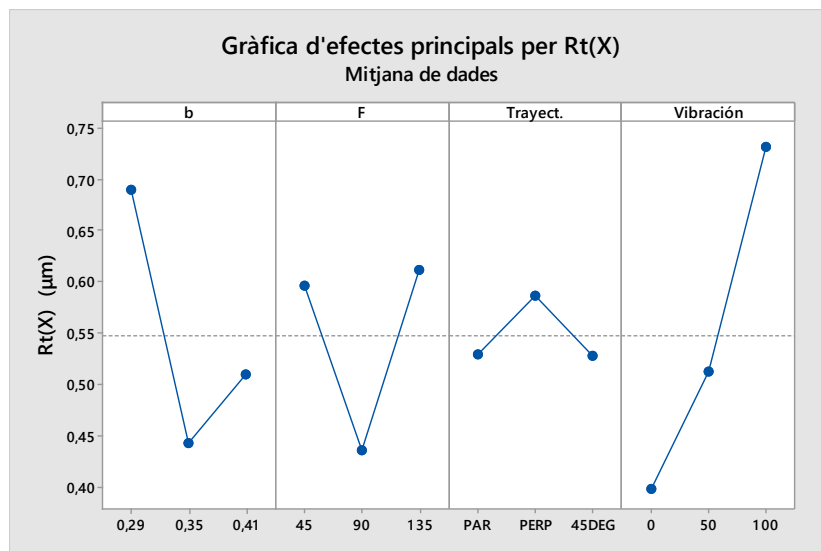


Figura 38 Efectes principals de les variables del procés sobre $R_t \perp$ (μm).

L'indicador R_t , mostra la rugositat total del perfil en la longitud de avaluació. Representa la alçada entre el pic més alt i la vall més profunda, independentment de les longituds basques, és a dir, en tota la longitud de avaluació. Per tant, aquest indicador considera tota la longitud de avaluació de la carrera del palpador.

En la direcció X de mostreig, l'assistència del procés amb vibracions es presenta com el factor més influent en la rugositat mitja final. Un augment de la amplitud implica un augment de la rugositat en la longitud de avaluació del material. Per tant, el procés assistit amb vibració durant el brunyit implica augment de $R_t(X)$. En aquest cas no és convenient assistir amb vibració.

Brunyir amb una força de 90 N sembla ser el valor amb els millors resultats finals de rugositat. Al incrementar la força a 135 N la rugositat empitjora i el mateix passa amb una força de 45 N. Això pot ser degut al tractar-se d'un material tou comparat amb un acer i per tant els efectes de la força de brunyit influeixen directament en la rugositat final del material i per tant hi ha un valor òptim, en aquest cas 90 N, en el qual s'aconsegueixen millors resultats en termes de rugositat.

El pas lateral també es presenta com una variable influent en la rugositat final del material, s'observa que el pas lateral de 0,35 mm s'aconsegueixen rugositats baixes, però que al augmentar a 0,41 mm torna a pujar, encara que s'obté millors resultats que amb un pas lateral de 0,29 mm.

Per últim, la estratègia sembla ser el factor menys influent en la direcció X, sent la estratègia perpendicular la que empitjora la rugositat. Tant la estratègia PAR com la 45DEG s'obtenen resultats semblants.

Gràfica $R_t // = R_t(Y)$:

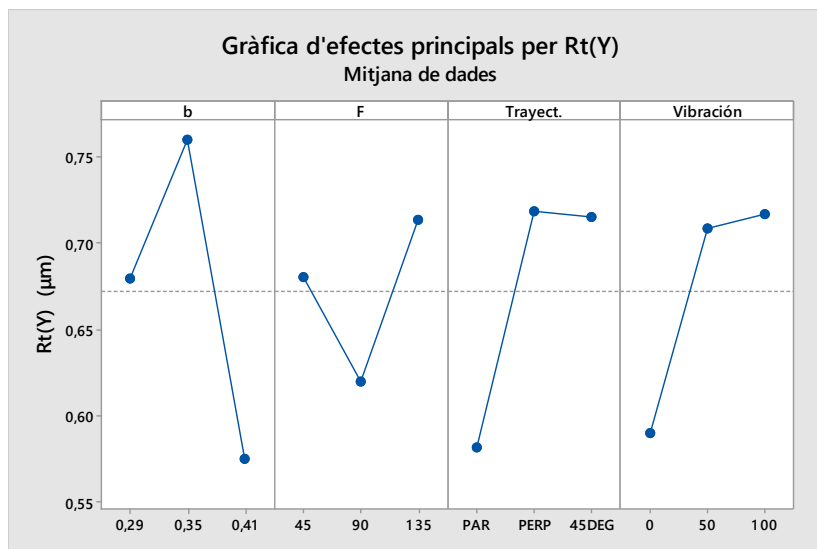


Figura 39 Efectes principals de les variables del procés sobre $R_t //$ (μm).

El pas lateral es presenta com la variable més influent en la rugositat del material. S'observa un comportament invers respecte a $R_t(X)$. El pas lateral 0,41 és el pas lateral més favorable per la rugositat, sent aquest comportament possiblement provocat per l'apilament del material a la primera passada i al augmentar el pas s'eliminen els apilaments provocats en passades anteriors.

La estratègia i l'assistència en el procés per vibració són els següents paràmetres més influents. En la direcció Y de mostreig, igual que la X, l'assistència amb vibració es presenta com a factor influent. La vibració provoca un augment de la rugositat final, amb la qual cosa assistir amb vibració no és adequat per aquest material.

La estratègia PAR és la més favorable i la PERP i 45DEG amb les que s'obtenen pitjors resultats.

La força aplicada per brunyir torna a ser 90N amb la que s'obtenen millors resultats i la pitjor és 135N provocant plastificació del material i per tant pitjors resultats. Resultat semblant que $R_t(X)$.

Gràfica $P_a = R_a(X) / R_a(Y)$:

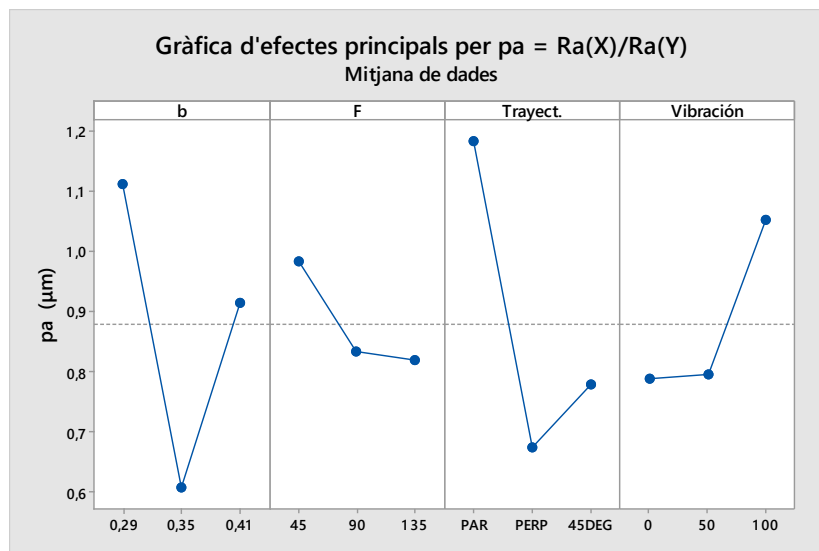


Figura 40 Efectes principals de les variables del procés sobre P_a (μm).

Per avaluar si la direcció de la trajectòria de la segona passada influeix en l'afavoriment d'una direcció concreta de l'espai, es calcula aquest rati, que indica com varia $R_a(X)$ i $R_a(Y)$ de forma relativa (un respecte l'altre), segons cada paràmetre.

La trajectòria és el segon paràmetre més influent. Com era d'esperar, l'estratègia de 45DEG és la que permet obtenir un major equilibri entre $R_a(X)$ i $R_a(Y)$, ja que es cobreixen totes dues direccions simultàniament amb la segona passada. No obstant això, l'efecte mitjà està al voltant del 0,8%, el que significa que la direcció X segueix sent beneficiada en detriment de la Y amb aquesta estratègia. Si es desitja afavorir la rugositat en Y, ha d'emprar-la estratègia PAR. La PERP afavoreix en major mesura a la rugositat en X.

Es pot veure que el pas lateral és el paràmetre més influent, sent 0,29 i 0,41 els millors passos laterals per obtenir la major semblança entre $R_a(X)$ i $R_a(Y)$. Efectivament, 0,29 mm permet obtenir millor rugositat segons Y, mentre que 0,41 permet una millor rugositat en X. El pas de 0,35 perjudica fortament la direcció Y, i afavoreix la X.

L'ús del procés assistit sembla afavorir lleugerament la rugositat segons Y, davant de la direcció X, que és afavorida en general amb el procés sense assistir o assistit al 50% d'amplitud.

Finalment, la força es presenta com el paràmetre menys influent en l'equilibri $R_a(X)$ i $R_a(Y)$, encara que els efectes mitjans d'aquest paràmetre indiquen que s'afavoreix, en qualsevol cas, la rugositat en la direcció X.

Gràfica $P_t = R_t(X) / R_t(Y)$:

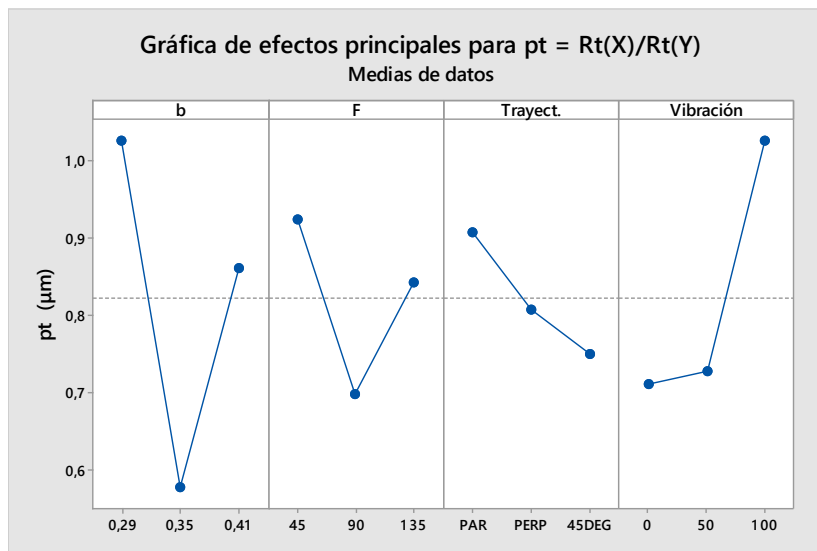


Figura 41 Efectes principals de les variables del procés sobre $P_t \perp$ (µm).

Aquest rati indica com varia $R_t(X)$ i $R_t(Y)$ de forma relativa (un respecte l'altre), segons cada paràmetre.

El pas lateral és el paràmetre més influent, sent 0,29 i 0,41 el millor pas lateral per obtenir major semblança entre $R_t(X)$ i $R_t(Y)$. El pas lateral 0,29 mm permet obtenir la millor rugositat segons Y, mentre que 0,41 permet obtenir millors rugositats en X. El pas lateral de 0,35 mm perjudica de nou a la direcció Y, i afavoreix la direcció X.

L'ús de la vibració afavoreix lleugerament la rugositat en Y enfront de la direcció X, que és afavorida en general amb el procés sense assistir o assistit al 50% d'amplitud.

La força es presenta com a tercer paràmetre menys influent en equilibri entre $R_t(X)$ i $R_t(Y)$, encara que els efectes mitjans d'aquest paràmetre indica que afavoreixen a la rugositat en la direcció X.

La estratègia com a paràmetre menys influent en l'equilibri de $R_t(X)$ i $R_t(Y)$. Els efectes mitjans afavoreixen, en qualsevol cas, la rugositat en la direcció X.

3.2.2. RESUM ANÀLISIS RUGOSITAT

El procés assistit es presenta com el factor més influent en la rugositat mitjana i màxima en la direcció X. Assistir amb vibració durant el brunyit sembla ser no adequat per aquest material. La Força és el segon paràmetre influent amb 90 N com el valor crític per brunyir l'alumini. El pas lateral adequat és 0,35 mm ja que al augmentar a 0,41 empitjora la rugositat. L'estratègia és el paràmetre menys influent, millorant la rugositat mitjana final amb l'estratègia perpendicular i empitjorant la rugositat màxima, ja que la millora de la R_t s'obté amb l'estratègia paral·lela i a 45°.

En la direcció Y, paral·lela a la direcció del fresat previ, l'assistència del procés tampoc sembla ser adequat per millorar la rugositat mitja i màxima. En canvi, l'estratègia (Paral·lela) utilitzada es presenta com el factor més influent en la rugositat superficial mitjana i màxima, doncs s'aconsegueix obtenir millores considerables. Respecte a la força, al igual que en la direcció X, 90 N es presenta com el valor crític per brunyir. Un pas lateral de 0,41 mm, s'aconsegueix el millor resultat de rugositat mitjana i màxima.

El paràmetre P_a , indica la variabilitat relativa entre rugositat superficial mitjana en X respecte a la Y i, avalua si la direcció de la trajectòria de la segona passada influeix en l'afavoriment d'una direcció concreta. Es troba el pas lateral com el factor influent, obtenint la major semblança entre R_aX i R_aY , el valor de 0,29 mm millora la direcció Y i 0,41 mm la X. La trajectòria és el segon factor més influent i la trajectòria de 45° permet obtenir la major semblança entre R_aX i R_aY ja que es cobreixen les dues direccions simultàniament amb la segona passada. La direcció X, segueix sent la afavorida en detriment de la Y. L'assistència amb vibració afavoreix la direcció Y i la força la direcció X.

Finalment, l'indicador P_t , al igual que P_a , un pas lateral de 0,29 mm millora la direcció Y i 0,41 mm la X. L'ús de la vibració lleugerament la direcció Y enfront de la X. La força i la estratègia es presenten com els paràmetres menys influents i els seus efectes mitjans afavoreixen en tot cas la direcció X.

3.2.3. RESULTATS DE LA MESURA DE LA DURESA APLICANT UNA CÀRREGA DE 50g

Un altre indicador a avaluar, que s'ha considerat important en el projecte, és la determinació de la duresa mesurada sobre les superfícies brunyides en l'alumini EN AW 2017 per establir els efectes del brunyit sobre l'enduriment del material.

En la taules de resultats següent, podem observar les dureses mesurades amb el microduròmetre en 3 línies diferents a cada assaig. Es considera oportú realitzar 3 línies de mesura cadascuna amb 8 indentacions separades $b/2$ perquè volem observar si hi ha algun canvi entre una zona contínua i una altre de la peça en termes de duresa superficial.

Es calcula la mitja i la desviació estàndard de cada línia de cadascun dels assajos per observar la dispersió de les dades respecte al valor de la mitjana.

Nº Assaig	Assaig 1			Assaig 2			Assaig 3		
Paràmetres	V=0%; F=45N; b=0,29mm; PAR			V=0%; F=90N; b=0,35mm; PERP			V=0%; F=135N; b=0,41mm; 45DEG		
Línia	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3
Mitja assaig [HV]	73,4	73,8	72,3	76,7	75,9	67,4	74,0	87,3	78,2
Dev. Est. [HV]	1,17	2,94	1,18	7,93	4,98	3,17	7,06	7,18	4,92

Taula 9 Dureses obtingudes en les diferents línies amb la seva mitjana i desviació estàndard per assajos 1, 2 i 3.

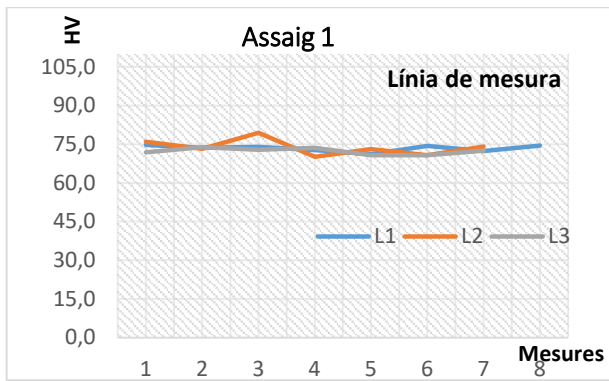
Nº Assaig	Assaig 4			Assaig 5			Assaig 6		
Paràmetres	V=50%; F=90N; b=0,41mm; PAR			V=50%; F=135N; b=0,29mm; PERP			V=50%; F=45N; b=0,35mm; 45DEG		
Línia	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3
Mitja assaig [HV]	90,5	87,1	84,0	82,8	80,4	80,5	85,4	79,8	75,6
Dev. Est. [HV]	6,67	6,07	6,69	21,93	3,19	8,20	5,39	5,46	3,95

Taula 10 Dureses obtingudes en les diferents línies amb la seva mitjana i desviació estàndard per assajos 4, 5 i 6.

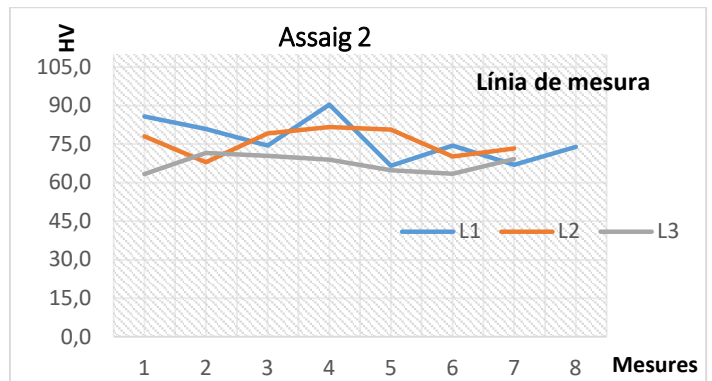
Nº Assaig	Assaig 7			Assaig 8			Assaig 9		
Paràmetres	V=100%; F=135N; b=0,35mm; PAR			V=100%; F=45N; b=0,41mm; PERP			V=100%; F=90N; b=0,29mm; 45DEG		
Línia	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3
Mitja assaig [HV]	78,4	77,5	76,7	79,6	82,7	78,1	64,4	64,6	62,0
Dev. Est. [HV]	3,62	4,09	4,42	3,82	4,30	5,80	2,60	1,55	1,33

Taula 11 Dureses obtingudes en les diferents línies amb la seva mitjana i desviació estàndard per assajos 7, 8 i 9.

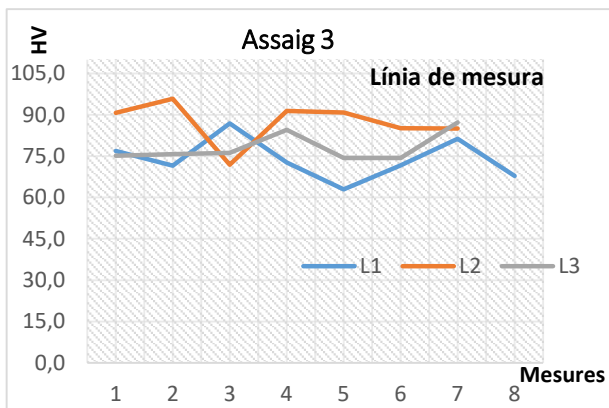
Com es pot observar a les taules 9, 10, 11 i en les gràfiques 8 fins a la 16, no hi ha diferències significatives entre zones de mesura de duresa. A conseqüència de la no existència de diferències entre zones de mesura, s'agafarà la mitjana de les 3 línies de mesura de cada assaig, ja que s'observa que no existeixen diferències significatives mesurant entre una zona i una zona contigua de la petjada.



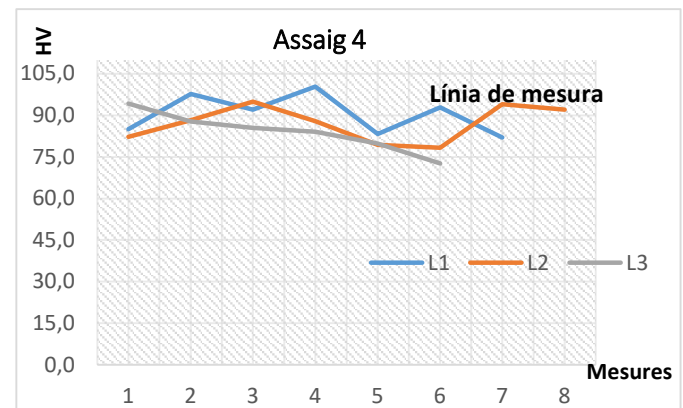
Gràfica 8. Assaig 1.



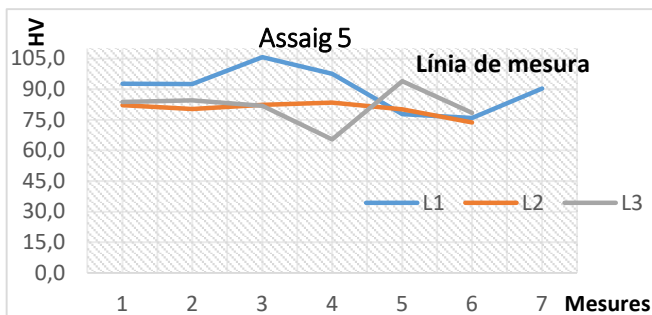
Gràfica 9. Assaig 2.



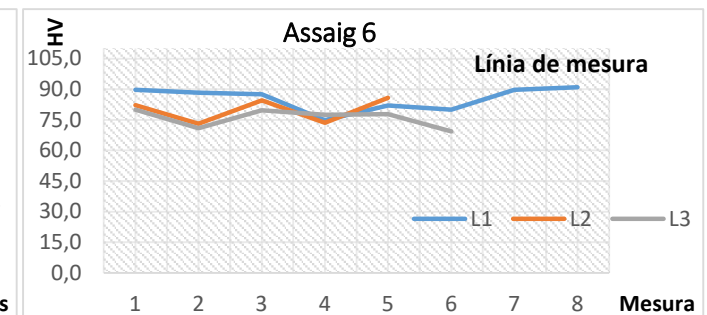
Gràfica 10. Assaig 3.



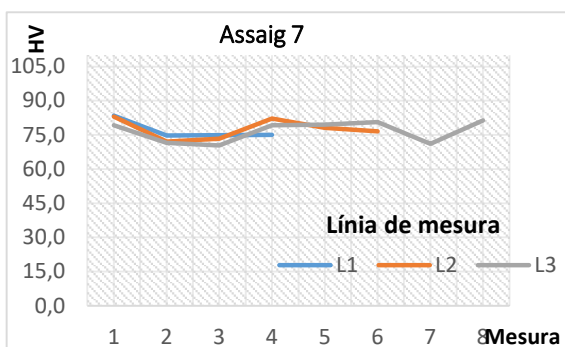
Gràfica 11. Assaig 4.



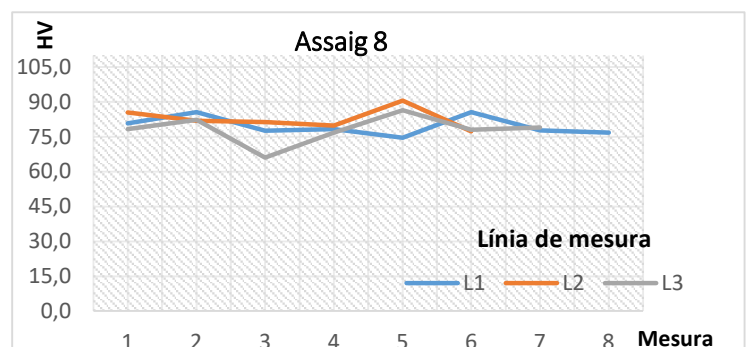
Gràfica 12. Assaig 5.



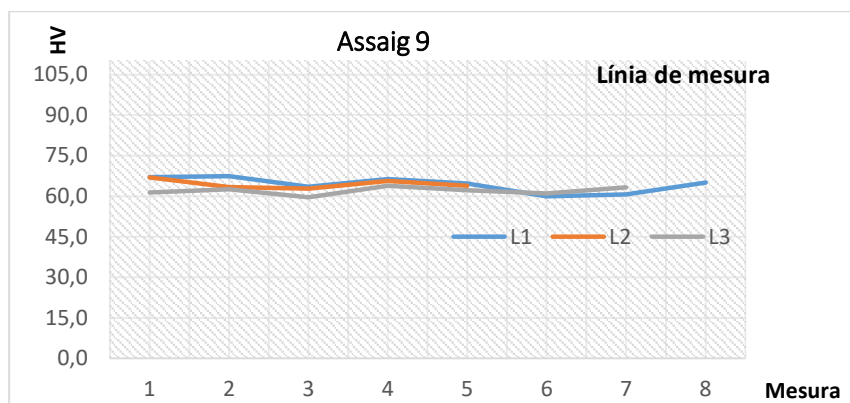
Gràfica 13. Assaig 6.



Gràfica 14. Assaig 7.



Gràfica 15. Assaig 8.



Gràfica 16. Assaig 9.

El fet de no existir desviacions importants entre línies de mesura ens permet fer la mitjana de totes les dades i no fa falta diferenciar entre línies. Es fa la mitjana de les tres línies de cada assaig (Taula 11) i aquesta mitjana l'analtzarem amb el software Minitab 17 (ANOVA).

Mitja HV	Assaig 1	Assaig 2	Assaig 3	Assaig 4	Assaig 5	Assaig 6	Assaig 7	Assaig 8	Assaig 9
[L1]	73,4	76,7	74	92,3	83,9	85,4	78,4	79,6	64,4
[L2]	73,8	75,9	87,3	87,1	80,4	79,8	77,5	82,7	64,6
[L3]	72,3	67,4	78,1	84	80,5	75,6	76,7	78,1	62
HV [L1,L2,L3]	73,2	73,3	79,8	87,8	81,6	80,3	77,5	80,1	63,7
Desv. Est. HV	0,777	5,154	6,811	4,194	1,992	4,917	0,850	2,346	1,447

Taula 12 Mitjana de les dureses mesurades en cadascuna de les línies de cada mostra i la seva desviació estàndard.

En la Taula 12, es mostra la configuració dels paràmetres de brunyit i el resultat de la duresa obtinguda. S'observa que només dos assajos han obtingut una duresa superior al fresat previ i això ens fa sospitar que el material està completament cremat pel fet d'haver deformat a tanta força, el material a sobre plastificat i per tant hem portat al material a la fallada.

Nº Exp.	Vib [%]	F [N]	Estratègia	b [mm]	HV	% Millora Respecte Fresat previ
1	0	45	PAR	0,29	73,2	-11,07%
2	0	90	PERP	0,35	73,3	-10,91%
3	0	135	45DEG	0,41	79,8	-1,88%
4	50	90	PAR	0,41	87,8	7,40%
5	50	135	PERP	0,29	81,6	0,37%
6	50	45	45DEG	0,35	80,3	-1,25%
7	100	135	PAR	0,35	77,5	-4,90%
8	100	45	PERP	0,41	80,1	-1,50%
9	100	90	45DEG	0,29	63,7	-27,63%
Fresat previ					81,3	

Taula 13 % de millora de la duresa respecte al fresat previ.

En la Figura 42, es mostra de forma gràfica, un resum dels valors registrats en els assajos. Aquests valors son la mitja de 3 mitjanes de cada assaig en diferents línies amb el seu interval de confiança al 95%.

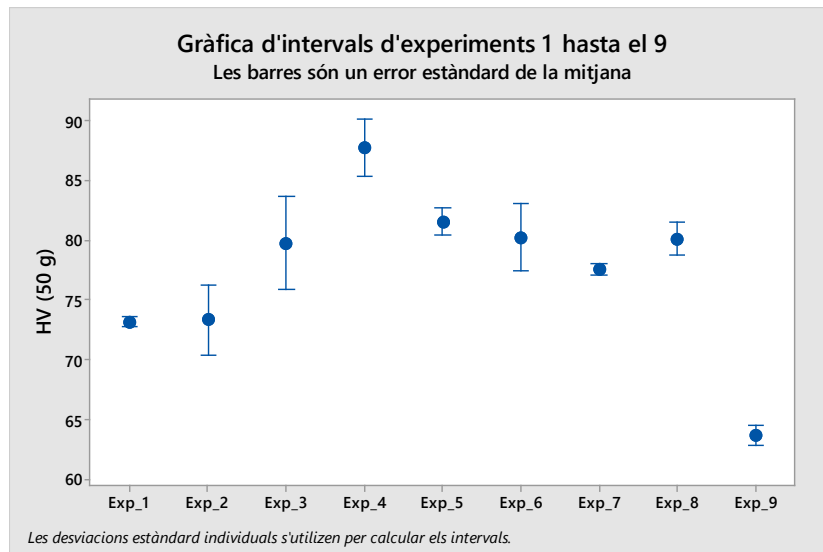


Figura 42 Gràfica d'interval dels assajos.

La influència de tots els paràmetres sobre els resultats, pot apreciar-se en la Figura 43 d'efectes principals de les variables sobre la duresa. Com es pot observar, la combinació de paràmetres que ofereix el millor valor de duresa és la de $F = 135 \text{ N}$, $b = 0,41 \text{ mm}$, vibració: 50% i trajectòria = PAR.

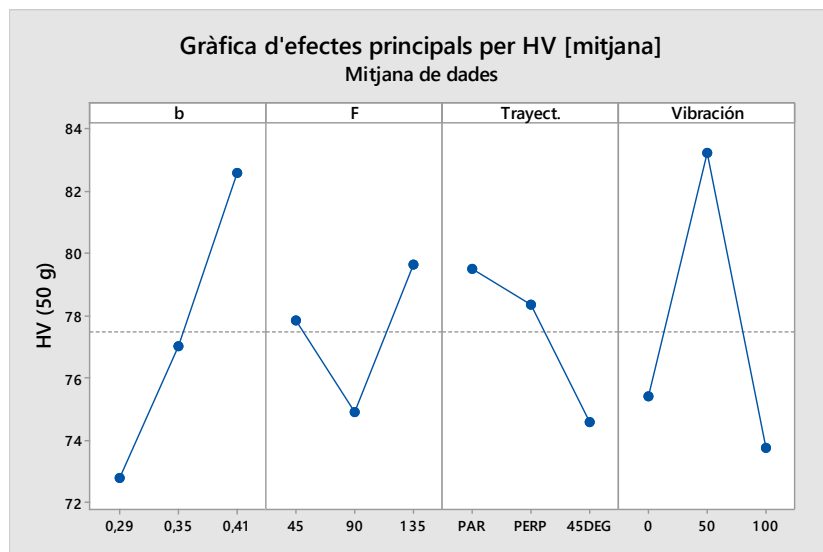


Figura 43 Efectes principals de les variables sobre HV amb càrrega de 50g.

Es pot observar que el pas lateral es el paràmetre més influent en la duresa superficial final després del brunyit, sent el valor de 0,41 mm amb el qual s'aconsegueixen millors resultats en termes de duresa. Per tant, un augment del pas lateral implica un augment de la duresa superficial segons els resultats de la Figura 47.

L'assistència del procés amb vibracions es presenta com el segon paràmetre influent, sent el valor de 50% amb el que s'aconsegueix millors resultats en termes de duresa. Es dedueix de la gràfica, que no es produeix un enduriment al augmentar la vibració al 100%, sinó al contrari, encara pitjor que brunyir sense vibració.

Respecte a la força, s'aconsegueix millors resultats amb 135 N i 45 N. Una força aplicada de 90 N, empitjora l'enduriment de la superfície i l'estratègia paral·lela (PAR), és la més òptima per l'enduriment del material, encara que amb la estratègia perpendicular també s'obté una duresa superior a la estratègia de 45º (45DEG).

3.2.4. RESULTATS DE LA MESURA DE LA DURESA APLICANT UNA CÀRREGA DE 5g

Analitzats als resultats de dureses obtingudes amb una càrrega de 50g, trobem que la duresa posterior al brunyit empitjora en la majoria dels casos. Per això, es decideix tornar a indentar les mostres amb una càrrega inferior per comprovar el fet que indentant amb una càrrega de 50g i tractant-se d'un material tou es doni el cas que estem penetrant a una profunditat on el material és més tou i per tant falsejant els resultats superficials del brunyit.

Nº Exp.	Vib [%]	F [N]	Estratègia	b [mm]	HV	Desv. Est. HV	% Millora Respecte Fresat previ
1	0	45	PAR	0,29	13,3	0,8	19,50%
2	0	90	PERP	0,35	14,4	1,0	25,84%
3	0	135	45DEG	0,41	13,8	0,6	22,30%
4	50	90	PAR	0,41	13,8	0,6	22,50%
5	50	135	PERP	0,29	14,3	0,3	25,33%
6	50	45	45DEG	0,35	14,1	0,7	23,89%
7	100	135	PAR	0,35	14,0	1,3	23,31%
8	100	45	PERP	0,41	14,5	1,2	25,99%
9	100	90	45DEG	0,29	13,7	1,0	21,81%
Fresat previ					10,7	0,34	

Taula 14 Resultats de duresa HV obtinguts amb una càrrega de 5g.

Com es pot observar a la Taula 14, clarament es veu una millora de la duresa en tots els experiments brunyits respecte al mecanitzat previ de la peça d'alumini i per tant, això determina que efectivament la càrrega de 50g penetra a una profunditat on mesurem la duresa del material de base, que és més tou. En la Figura 44 tenim els efectes principals de les variables sobre la duresa, on la estratègia seguida durant el brunyit amb bola sembla ser el paràmetre més influent per incrementar la duresa superficial, la trajectòria perpendicular (PERP) aconsegueix els millors valors de duresa superficial i la trajectòria PAR obtenim els pitjors valors.

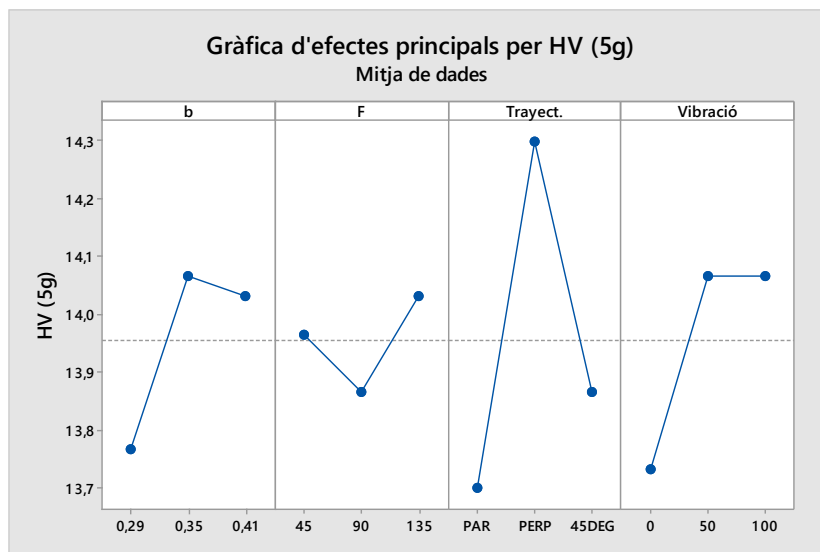


Figura 44 Efectes principals de les variables sobre HV amb càrrega de 50g.

La Taula 14, els assajos 2, 5 i 8 amb trajectòria de brunyit perpendicular s'obtenen 14.4, 14.3 i 14,5 HV respectivament. Cal dir, també, que la mesura de la variació (dispersió de dades) de les dureses en aquests tres assajos en el cas d'assistència amb vibració al 50% és l'assaig amb menys dispersió de dades respecte 0% d'assistència i el 100% d'assistència.

Una altre indicacador influent juntament amb la trajectòria de passada és l'assistència del procés amb vibració, en aquest cas assistir el procés amb vibració sí sembla adequat per obtenir una millora de la duresa superficial tot i que no hi ha diferència entre assistir el procés a un 50% o 100%, encara que sí es veu com la combinació amb altres paràmetres d'assaig, com una força de 45N, un pas lateral de 0,41 mm i una trajectòria de passada perpendicular s'obté el millor resultat en termes de duresa.

L'amplada de pas lateral (b) de 0,35 mm sembla ser el més adequat, ja que al augmentar-se a 0,41 mm, la duresa superficial tornar a descendir.

La força es presenta com el paràmetre menys influent, brunyir amb 90 N sembla ser un valor no adequat, encara que augmentant la força a 135 N sí que s'aconsegueix el valor més alt de duresa. Baixant la força fins a 45 N, millora la duresa respecte aplicant 90 N, això és degut a la dependència segons la trajectòria de passada ja que clarament la perpendicular és més influent que la paral·lela.

4. Anàlisi de l'impacte ambiental

El procés de brunyit per deformació sorgeix com una operació d'acabat superficial, principalment per aconseguir una millora notable de la rugositat superficial així, un augment de la duresa superficial i introduint tensions residuals de compressió augmentant notablement la vida a fatiga y millorant les propietats de desgast i corrosió.

El camp d'aplicació és extens i el podem trobar tant en sectors com l'automoció, fabricació de motlles i matrius, aeronàutica i implants quirúrgics.

L'augment de la consciència mediambiental, la immersió en una crisi mediambiental, les estrictes normatives mediambientals i la necessitat de aconseguir processos de poc impacta ambiental i d'alta productivitat han obert un front d'investigació tècnica de lubricació.

En la majoria dels processos és impensable treballar eliminant l'ús de refrigerants. L'avantatge de l'ús de taladrines i olis de tall són diverses[9]:

- Major duració de la vida de la eina
- Possibilitat d'incrementar el rendiment del procés
- Capacitat d'aconseguir característiques superficials desitjades.

L'ús dels fluids de tall en general, extens en general, en l'actualitat tendeix a minimitzar-se pel seu impacte ambiental, pel seu elevat cost durant la vida útil (adquisició, ús, filtrat i eliminació) i per ser perjudicial per la salut de l'operari en alguns casos. Evitar l'ús de la taladrina durant el procés millora l'ambient de l'empresa, ja que aquestes poden arribar a ser tòxiques en funció dels seus components i pot derivar en malalties. A més, les deixalles de la taladrina són residus perillosos i podrien arribar a contaminar llacs i rius, afectant a la vegetació subaquàtica i els amfibis que viuen en aquest llocs [9].

Cal remarcar que hi ha casos on l'ús dels fluids de tall no estan justificats per el procés i es comú utilitzar-los per inèrcia, ja que van bé en altres caos, sense cap criteri de càlcul previ. En altres casos, l'èxit del procés depèn en gran mesura de un bon control de les tècniques de lubricació-refrigeració.

En aquesta línia es treballa en diferents alternatives: des de l'ús de lubricants tradicionals i olis de tall: l'ús de lubricants sòlids; el mecanitzat en sec, l'ús de taladrines a alta pressió; ús de pistoles d'aire fred i recentment mecanitzat criogènic.

En el present projecte, es pretén valorar l'impacte mediambiental de la operació de brunyit des de la fase prèvia al posterior brunyit amb bola.

Durant les diferents fases, s'observa les següents deficiències que interfereixen amb el medi ambient:

- Consum energètic de la maquinària: Fresadora durant el mecanitzat
- Partícules de material (ferritja) en petites quantitats a priori sense cap tractament posterior.
- Ús de taladrina i les seves deixalles sense tractament posterior.
- Sorolls durant el procés de mecanitzat perjudicials per l'operari i entorn.

També es remarca que en la operació de brunyit te avantatges respecte altres operacions d'acabat i que per tant, és menys agressiu respecte d'altres sobre el medi ambient.

- Acabat sense pèrdua de material i per tant no produeix ferritja.
- No hi ha un ús d'olis de tall
- Sorolls mínims.

Per mitigar tots els aspectes negatius, s'hauria de buscar una alternativa als olis de tall i fomentar recollida i posterior reciclatge tant de ferritja com d'olis.

5. Conclusions

Un cop finalitzat aquest treball s'ha pogut veure que el procés de brunyit amb bola és efectiu per millorar tant la duresa com l'acabat superficial del alumini. Segons la bibliografia consultada la força es presenta com un dels paràmetres més influents del procés de brunyit amb bola i l'assistència del procés amb vibració ajuda a millorar l'acabat superficial de l'alumini. En aquest treball s'ha pogut analitzar quin dels diferents paràmetres estudiats es més influent i es poden extreure aquests conclusions:

1. És possible deformar plàsticament les irregularitats d'una superfície per millorar l'acabat superficial mitjançant el procés de brunyit assistit per vibracions ultrasòniques.
2. En funció de l'estratègia seleccionada per a l'última passada es pot trobar una estratègia clarament més favorable per reforçar una direcció concreta de l'espai. Per aquest material, la direcció X perpendicular al avanç del fresat, sembla en termes generals la més afavorida segons els paràmetres assajats. Amb el conjunt de paràmetres següents s'obté el millor resultat en termes de rugositat superficial: un pas lateral $b = 0,35$ mm, força aplicada de 90 N, estratègia perpendicular i sense assistència en el procés amb vibració. Si es desitja afavorir la rugositat segons la direcció Y, paral·lela al avanç del fresat, s'hauria de canviar la direcció del brunyit i utilitzar un conjunt de paràmetres definits i molt concret: un pas lateral $b = 0,29$ mm, força aplicada de 45 N, estratègia paral·lela i sense assistència en el procés amb vibració.
3. La rugositat empitjora en el procés assistit amb vibracions. Per tant, en aquest cas no és adequat assistir amb vibració durant el brunyit amb bola. Per explicar el perquè de la no millora de la rugositat amb la vibració, es pot explicar a que el mecanitzat previ realitzat ha generat una capa de alumina sobre la superfície del material, més tova que l'alumini, i per tant més vulnerable a superplastificació en assistir amb vibracions. Així, la deformació produïda per la bola genera noves irregularitats que empitjoren l'acabat.
4. Utilitzant una càrrega de 50 g, la duresa mesurada resulta més baixa que la duresa de la superfície abans de brunyir, i la majoria dels assajos són més tous després del brunyit. Es considera per tant que no és una càrrega adequada per avaluar els efectes d'enduriment produïts pel brunyit. Al disminuir la càrrega aplicada a 5g, els resultats mostren un augment de la duresa amb un increment mitjà del 23% aproximadament en tots els assajos respecte a zona no brunyida i com a paràmetre més significatiu la estratègia de passada, sent la perpendicular la més beneficiada. La vibració (50%), en aquest cas sí que sembla adequada per obtenir millores en la duresa superficial, ja que la gràfica d'efectes mostra que la duresa final és, en termes mitjans, semblant si s'assisteix el procés amb 50 % d'amplitud i amb 100 % d'amplitud. Respecte a l'amplada de pas lateral i la força, els valors crítics per brunyir aquest material són 0,35 mm i 135 N respectivament.

5. Els paràmetres òptims de brunyit per millorar la R_aX , R_aY i la duresa són els següents:

Variable de resposta	Paràmetres			
	b Pas lateral (mm)	Assistència amb vibració (%)	Força (N)	Estratègia
R_aX	0,35	0	90	PERP
R_aY	0,41	0	45	PAR
HV	0,35	50-100	135	PERP

Taula 15 Recomanacions sobre els paràmetres del procés de brunyit a utilitzar en les provetes planes d'alumini AW2017.

6. Pressupost

El pressupost incloent totes les partides considerades per elaborar el projecte, ascendeix a la quantitat de **15.325,85€**.

Per determinar els preus de cadascuna de les partides, es parteix que tota la maquinària ens la subministra la EEBE i per tant, només repercutirem el preu hora per utilització.

El preu hora d'enginyeria, assessorament extern i operaris són preus que actualment pressupostem a l'enginyeria on actualment estic treballant (F87 ARQUITECTURA, ENGINYERIA I FACILITIES S.L).

Cost mà d'obra d'un operari: un operari que realitza totes les operacions. Els temps que dedicarà a realitzar la operació serà la suma dels temps de mecanitzat multiplicada per un coeficient de temps improductius 20% (Eq.5).

$$C_{MO} = (T_{Mec.} \cdot (1 + 0,2)) \cdot C_o \quad \text{(Eq. 5)}$$

El cost de la maquinària, al igual que el cost de mà d'obra, s'estima en funció del temps total d'utilització de cada màquina i el cost per màquina (Eq.6) i (Eq.7):

$$C_{MA} = (T_{FRESADORA} \cdot (1 + 0,2)) \cdot C_{FRESADORA} \quad \text{(Eq. 6)}$$

$$C_{MA} = (T_{CNC} \cdot (1 + 0,2)) \cdot C_{CNC} \quad \text{(Eq. 7)}$$

PRESSUPOST BRUNYIT

Codi	NatC	Ut	Resum	Quant	Pres	ImpPres
01	Capítol		ENGINYERÍA DE PROJECTES			
01.01	Partida	h	REDACCIÓ DEL PROJECTE	150,00	60,00	9.000,00
			Honoraris professionals per la redacció d'un projecte realitzar un assaig consistent en la realització d'un brunyit amb bola per tal de determinar els efectes d'uns paràmetres determinats sobre la rugositat i duresa superficial. Es redactarà el projecte, definint les solucions i els materials que es considerin òptims per aquest tipus d'assaig.			
01.02	Partida	h	ASSESORAMENT EXTERN	15,00	90,00	1.350,00
			Honoraris d'un professional del sector per realitzar el codi CNC a implantar en l'estudi, tot aportant noves idees com validant i realitzant un seguiment dels assajos de l'enginyeria per verificar els resultats obtinguts durant la mesura de la rugositat i la duresa superficial.			
			Total 01			10.350,00
02	Capítol		TALLER DE MECANITZAT			
02.01	Partida	h	OPERARI	4,80	40,00	192,00
			Mecanitzat de la proveta en taller mitjançant fresadora Lagun MC 600 CNC. Aquesta partida inclou implantació del codi CNC a la fresadora i el fresat de la peça pel posterior procés de brunyit.			
02.02	Partida	h	OPERARI	14,40	40,00	576,00
			Realització del brunyit segons els paràmetres establerts prèviament. Inclou la identificació dels 9 assajos realitzats amb permanent color negre sobre la peça per tal de identificar cadascuna de les petjades amb el seu assaig corresponent.			
			Total 02			768,00
03	Capítol		LABORATORI			
03.01	Partida	h	RUGOSITAT SUPERFICIAL	7,00	45,00	315,00
			Mesura de la rugositat superficial mitjançant un rugosímetre MITUTOYO-SJ210, un equip que realitza un seguiment del perfil, en línia recta, mitjançant una fina punta denominada palpador i que tradueix les variacions d'alçada de superfície en senyals elèctriques que es registren i processen en un equip de control. Cal mesurar la rugositat en la direcció X com la Y.			
03.02	Partida	u	DURESA SUPERFICIAL	13,50	45,00	607,50
			Mesura de la duresa superficial amb un microduròmetre BUEHLER model 5114. Aquesta partida inclou la mesura prèvia de la duresa abans del brunyit. Es realitzen 24 indentacions en cada experiment amb un total de 9 i la zona no brunyida, amb un total de 10 assajos amb 24 indentacions cadascun.			
			Total 03			922,50

04		Capítol		MATERIAL D'ASSAIG (Subministrat per la EEBE)		
04.01	Partida	ml	PROBETA D'ALUMINI EN AW2017	1,00	1,20	1,20
			Subministrament de barra d'alumini amb designació EN AW2017 amb resistència mecànica mitja apte per mecanitzar i posteriorment per realitzar el brunyit. En aquesta partida, només es contempla la dimensió de la proveta utilitzada, ja que el material el subministra la Universitat.			
04.02	Partida	u	FRESA FRONTAL	1,00	175,20	175,20
			Subministrament de fresa frontal helicoidal cilíndrica de 80 mm de diàmetre apte per alumini per atacar frontalment l'alumini en la operació de fresat.			
04.03	Partida	u	EINA DE BRUNYIR	4,00	60,00	240,00
			Subministrament (Cost de lloguer) d'eina de brunyir de 10 mm de diàmetre de la bola equipada amb piezoelèctric i equipada per acoblar a fresadora Lagun MC 600 i a un generador d'ultrasons.			
Total 04						416,40
05		Capítol		MAQUINÀRIA PER BRUNYIR (Subministrat per la EEBE)		
05.01	Partida	ml	CENTRE DE MECANITZAT LAGUN MC 600 CNC	6,00	60,00	360,00
			Lloguer de centre de mecanitzat - Fresadora Lagun MC 600 Control CNC Fagor 8065M: superfície de la taula de 762x381 mm, pes de la taula 350 kg, velocitat del capçal 6000 rpm i avanç ràpid 20.000 mm/min.			
05.02	Partida	u	RUGOSÍMETRE MITUTOYO -SJ210	7,00	10,00	70,00
			Subministrament (Cost de lloguer per hores) de equip de mesura de rugositat superficial portàtil amb capacitat de operar independentment de la xarxa elèctrica i realitzar mesures en qualsevol superfície.			
05.03	Partida	u	MICRODURÒMETRE BUEHLER MODEL 5114	13,50	40,00	540,00
			Subministrament (Cost de lloguer per hores) d'un microduròmetre amb escala Vickers amb 13 intervals de càrrega compresos entre 0,1 N i 20 N. L'equip treballarà amb objectius d'alta qualitat i augments dels objectius de 10x, 50x i 100x.			
05.04	Partida	u	GENERADOR D'ULTRASSONS	6,00	15,00	90,00
			Subministrament (Cost de lloguer per hores) d'un generador d'ultrasons amb capacitat de regular la freqüència entre 0 % i 100 % de la marca CEUS a connectar a l'eina de brunyir.			
Total 05						1.060,00
06		Capítol		SOFTWARE & L·LICÈNCIES		
06.01	Partida	u	MINITAB 17	1,00	1.808,95	1.808,95
			Subministrament de software estadístic Minitab, per analitzar i interpretar els resultats obtinguts durant la mesura de la rugositat i la duresa.			
Total 06						1.808,95

TOTAL PROJECTE	15.325,85
-----------------------	------------------

7. Bibliografia

La bibliografia consultada per redactar i elaborar el projecte es la següent:

- [1] G. Gomez–Gras · J. A. Travieso–Rodriguez · R. Jerez–Mesa · J. Lluma-Fuentes · B. Gomis de la Calle. Experimental study of lateral pass width in conventional and vibrations-assisted ball burnishing. 2016.
- [2] R. Jerez Mesa, G. Gómez Gras, J.A. Travieso Rodríguez, J. Llumà Fuentes, O. Casadesús, M. Madueño Guerrero. Estudio experimental del efecto de bruñido sobre la vida a fatiga de probetas de acero AISI 1038.
- [3] N. H. Loh and S. C. Tam. Effects of ball burnishing parametres on surface finsish – A literatura survey and discussion.
- [4] Giovanni Gómez Gras. Estudio del proceso de bruñido con bola asistido por vibración.
- [5] Alberto Saldaña Robles, Adrián Flores Ortega, Adriana Saldaña Robles, Noé Saldaña Robles, César Gutiérrez Vaca. Bruñido con bola como proceso de acabado superficial y mejoramiento de propiedades físico-mecánicas de piezas manufacturadas.
- [6] J.A. Travieso Rodríguez, A. Sánchez Egea, A.E. Nápoles Alberro, J.L Huertas Talón, G. Gómez Gras, H.A. González Rojas. Comparativa del proceso de bruñido con bola en máquina de 3 y 5 ejes en piezas de aluminio A92017 y A96351.
- [7] J.A. Travieso Rodríguez, H.A. González Rojas, G. Gómez Gras, A. Nápoles Alberro, A.J. Sánchez Egea. Influencia del proceso de bruñido con bola sobre la dureza y las tensiones residuales en el aluminio A92017.
- [8] Carla Iserte Ventura y Aimar Martin Rubio. Puesta a punto y aplicación de una herramienta de bruñido assitida por vibraciones ultrasónicas.
- [9] Tecnologías novedosas en el mecanizado de suepraleaciones. A. Rodríguez, O. Pereira, L.N. Lopez de Lacalle, de Universidad del País vasco (UPV/EHU); T. Ostra, A. Rivero, de Tecnalia Research & Innovation04/03/2015. <http://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/134036-Tecnologias-novedades-en-el-mecanizado-de-superaleaciones.html> (Consulta en 10/07/2017)
- [10] Metrología del acabado superficial. Departamento de ingeniería mecànica. Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea. http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/745_ca.pdf (Consulta en 02/09/2017).

- [11] Mitutoyo. Boletín Técnico. Abril 2010. Nº. 7. Medición de Rugosidad.
<http://www.mitutoyo.com.mx/Descargas/Boletines/BOLETIN%20ABRIL%202010.pdf> (Consulta en 27/06/2017)
- [12] Escuela universitària de ingeniería aeronàutica. Expresión gràfica en la ingeniería.
http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/PDFs/3_INFORMACION_TECNICA/3.1_UTILIZACION_DE_LOS_SISTEMAS_DE_TOLERANCIAS/3-1-3_tolerancias_geometricas.pdf (Consulta setembre 2017).
- [13] Metrología estadística. Análisis de datos.
<http://www.metrologiaindust.com.ar/Servicios/Capacitacion/Curso2/Material/Diapositivas/1-%20Metrologia%20Estadistica.pdf> (Consulta agost 2017).
- [14] N.H. LOH, S.C TAM. Optimisation of the surface finish produced by ball burnishing. Journal of mechanical working Technology, 19 (1989) 101-107. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam – Printed in The Netherlands.
- [15] R.L, Murthy, B. Kotiveerachari. Burnishing of metallic surfaces – a review.

8. Annex A

A1. Càlculs del procés de mecanitzat previ

Per seleccionar la eina adequada per la operació a realitzar, primer cal identificar el tipus operació. Un cop identificada la operació, cal seleccionar la eina adequada, en aquest cas, una fresa frontal de plaquetes per un planejat de cara apte per mecanitzar alumini.

Standard cutting conditions TAW / EAW 13 type								
Work material	Recommended insert grade	Cutting speed Vc (m/min)	Roughing (Depth of cut: ap ≥ 1.0 mm)					
			Feed per tooth: fz (mm/t)					
			MJ	ML	HJ	MS	Flat top	AJ
Mild steels Low carbon steels (< 180HB)	AH120 (First choice)	180 (100 - 270)	0.2 (0.05 - 0.3)	0.15 (0.05 - 0.25)	0.4 (0.2 - 0.6)	—	0.2 (0.05 - 0.3)	—
	T3130 (Priority on wear resistance)	220 (150 - 300)	0.2 (0.05 - 0.3)	—	0.4 (0.2 - 0.6)	—	0.2 (0.05 - 0.3)	—
	AH130 / AH140 (Priority on impact resistance)	130 (80 - 180)	0.2 (0.05 - 0.3)	—	—	0.17 (0.1 - 0.25)	—	—
	NS740 (Priority on surface finish)	200 (100 - 300)	0.15 (0.05 - 0.23)	—	—	—	0.15 (0.05 - 0.23)	—
Carbon steels Alloy steels (< 300HB)	AH120 (First choice)	150 (100 - 230)	0.17 (0.05 - 0.25)	0.12 (0.05 - 0.2)	0.3 (0.2 - 0.5)	—	0.17 (0.05 - 0.25)	—
	T3130 (Priority on wear resistance)	200 (150 - 280)	0.17 (0.05 - 0.25)	—	0.3 (0.2 - 0.5)	—	0.17 (0.05 - 0.25)	—
	AH130 / AH140 (Priority on impact resistance)	120 (80 - 150)	0.17 (0.05 - 0.25)	—	0.3 (0.2 - 0.5)	—	—	—
	NS740 (Priority on surface finish)	150 (100 - 230)	0.12 (0.05 - 0.2)	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.2)	—
Die steels (< 30HRC)	AH120 (First choice)	140 (100 - 180)	0.12 (0.05 - 0.2)	0.12 (0.05 - 0.2)	0.3 (0.2 - 0.4)	—	0.12 (0.05 - 0.2)	—
	T3130 (Priority on wear resistance)	140 (100 - 180)	0.12 (0.05 - 0.2)	—	0.3 (0.2 - 0.4)	—	0.12 (0.05 - 0.2)	—
Stainless steels (< 250HB)	AH130 / AH140 (First choice)	150 (80 - 200)	0.17 (0.1 - 0.25)	—	0.3 (0.2 - 0.5)	0.15 (0.1 - 0.2)	—	—
	AH120 (Priority on wear resistance)	200 (150 - 250)	0.17 (0.1 - 0.25)	0.15 (0.1 - 0.2)	0.3 (0.2 - 0.5)	—	0.17 (0.1 - 0.25)	—
Grey cast irons	T1115 (First choice)	180 (100 - 250)	0.17 (0.05 - 0.25)	—	0.4 (0.2 - 0.6)	—	0.17 (0.05 - 0.25)	—
Ductile cast irons	AH120 (Priority on impact resistance)	180 (100 - 250)	0.17 (0.05 - 0.25)	0.15 (0.05 - 0.2)	0.4 (0.2 - 0.6)	—	0.17 (0.05 - 0.25)	—
Aluminium alloys (Si < 13 %)	DS1100 / KS05F (First choice)	500 (300 - 1000)	—	—	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.2)
Aluminium alloys (Si ≥ 13 %)	DS1100 / KS05F (First choice)	200 (80 - 300)	—	—	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.2)
Copper alloys	DS1100 / KS05F (First choice)	350 (200 - 500)	—	—	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.2)

Figura 45 Velocitats de tall recomanats per a diferents materials per a un planejat de desbast [www.tungaloy.com].

Per un alumini amb % de silici inferior al 13% els paràmetres recomanats són (Figura 45):

- Velocitat de tall: 300 - 1000 m/min. S'escull una Vc de 650 m/min per desbast i 750 m/min per l'acabat.
- Avanç: 0,05 – 0,2 mm/dent. 0,1 mm/dent per desbast i 0,05 mm/dent per l'acabat.
- Profunditat de tall (desbast) ≥ 1 mm. Desbast 2 mm i acabat a 1 mm.

Per un planejat d'acabat, els paràmetres recomanats es troben a la Figura 46

Work material	Recommended insert grade	Cutting speed V _c (m/min)	Light cutting to finishing (Depth of cut: a _p ≥ 1.0 mm)					
			Feed per tooth: f _z (mm/t)					
			MJ	ML	HJ	MS	Flat top	AJ
Mild steels Low carbon steels (< 180HB)	AH120 (First choice)	180 (100 - 270)	0.17 (0.05 - 0.25)	0.12 (0.05 - 0.2)	0.4 (0.2 - 0.6)	—	0.17 (0.05 - 0.25)	—
	T3130 (Priority on wear resistance)	220 (150 - 300)	0.17 (0.05 - 0.25)	—	0.4 (0.2 - 0.6)	—	0.17 (0.05 - 0.25)	—
	AH130 / AH140 (Priority on impact resistance)	130 (80 - 180)	0.17 (0.05 - 0.25)	—	—	0.15 (0.1 - 0.2)	—	—
	NS740 (Priority on surface finish)	200 (100 - 300)	0.12 (0.05 - 0.2)	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.2)	—
Carbon steels Alloy steels (< 300HB)	AH120 (First choice)	150 (100 - 230)	0.12 (0.05 - 0.2)	0.1 (0.05 - 0.15)	0.3 (0.2 - 0.5)	—	0.12 (0.05 - 0.2)	—
	T3130 (Priority on wear resistance)	200 (150 - 280)	0.12 (0.05 - 0.2)	—	0.3 (0.2 - 0.5)	—	0.12 (0.05 - 0.2)	—
	AH130 / AH140 (Priority on impact resistance)	120 (80 - 150)	0.12 (0.05 - 0.2)	—	0.3 (0.2 - 0.5)	—	—	—
	NS740 (Priority on surface finish)	150 (100 - 230)	0.12 (0.05 - 0.18)	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.18)	—
Die steels (< 30HRC)	AH120 (First choice)	140 (100 - 180)	0.12 (0.05 - 0.18)	0.1 (0.05 - 0.12)	0.3 (0.2 - 0.4)	—	0.12 (0.05 - 0.18)	—
	T3130 (Priority on wear resistance)	140 (100 - 180)	0.12 (0.05 - 0.18)	—	0.3 (0.2 - 0.4)	—	0.12 (0.05 - 0.18)	—
Stainless steels (< 250HB)	AH130 / AH140 (First choice)	150 (80 - 200)	0.15 (0.1 - 0.2)	—	0.3 (0.2 - 0.5)	0.15 (0.1 - 0.18)	—	—
	AH120 (Priority on wear resistance)	200 (150 - 250)	0.15 (0.1 - 0.2)	0.15 (0.1 - 0.18)	0.3 (0.2 - 0.5)	—	0.15 (0.1 - 0.2)	—
Grey cast irons Ductile cast irons	T1115 (First choice)	180 (100 - 250)	0.15 (0.05 - 0.2)	—	0.4 (0.2 - 0.6)	—	0.15 (0.05 - 0.2)	—
	AH120 (Priority on impact resistance)	180 (100 - 250)	0.15 (0.05 - 0.2)	0.12 (0.05 - 0.18)	0.4 (0.2 - 0.6)	—	0.15 (0.05 - 0.2)	—
Aluminium alloys (Si < 13 %)	DS1100 / KS05F (First choice)	500 (300 - 1000)	—	—	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.2)
Aluminium alloys (Si ≥ 13 %)	DS1100 / KS05F (First choice)	200 (80 - 300)	—	—	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.2)
Copper alloys	DS1100 / KS05F (First choice)	350 (200 - 500)	—	—	—	—	—	0.12 (0.05 - 0.2)

Figura 46 Velocitats de tall recomanats per a diferents materials per a un planejat d'acabat [www.tungaloy.com].

Operació: planejat de desbast en fresadora. Es realitza un fresat frontal amb una fresa de planejar en una sola passada amb una profunditat de 2 mm.

1) Velocitat de tall

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \tag{8}$$

$$n = \frac{1000 \cdot 650 \text{ m/min}}{\pi \cdot 80 \text{ mm}} = 2586 \text{ rev/min}$$

2) Avanç: la fresa frontal disposa de 4 plaquetes

$$a_v = a_z \cdot z \tag{9}$$

$$a_v = \frac{0,1 \text{ mm}}{\text{dent}} \cdot 4 \text{ dents} = 0,4 \frac{\text{mm}}{\text{rev}}$$

3) Velocitat d'avanç

$$V_a = a_v \cdot n \tag{10}$$

$$V_a = 0,4 \cdot 2586 = 1034,4 \text{ mm/min}$$

4) Temps de mecanitzat

$$t_m = \frac{L_m}{V_a} \quad (11)$$

$$t_m = \frac{100}{1034,4} = 0,097 \text{ min}$$

Temps improductius:

- Col·locar eina en portaeines: 0,5 min
- Configuració paràmetres (revolucions, avanç, zero peça, comprovacions de cota, etc.): 1,5 min

5) Força de tall

$$f_c = k \cdot \sigma_r \quad (12)$$

$$f_c = 3 \cdot 310 = 930 \text{ N}$$

$$F_c = f_c \cdot p \cdot b \quad (13)$$

$$F_c = 930 \cdot 2 \cdot 10 = 18.600 \text{ N}$$

6) Potència de tall

$$N_c = \frac{F_c \cdot V_a}{60.000} \quad (14)$$

$$N_c = \frac{18.600 \cdot 1034,4}{60.000} = 321 \text{ W}$$

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (15)$$

$$N_m = \frac{0,321}{0,75} = 0,43 \text{ kW}$$

Operació assumible al disposar d'una màquina amb una potència entregada de 11kW.

Operació: planejat d'acabat en fresadora. Es realitza un fresat frontal amb la peça en la mateixa posició, aquesta vegada a una profunditat de passada de 1 mm i un avanç per dent de 0,05 mm/dent. Velocitat recomanada 750 /min.

7) Velocitat de tall

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (8)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 750 \text{ m/min}}{\pi \cdot 80 \text{ mm}} = 2984 \text{ rev/min}$$

8) Avanç: la fresa frontal disposa de 4 plaquetes

$$a_v = a_z \cdot z \quad (9)$$

$$a_v = \frac{0,05 \text{ mm}}{\text{dent}} \cdot 4 \text{ dents} = 0,2 \frac{\text{mm}}{\text{rev}}$$

9) Velocitat d'avanç

$$V_a = a_v \cdot n \quad (10)$$

$$V_a = 0,2 \cdot 2984 = 596,8 \text{ mm/min}$$

10) Temps de mecanitzat

$$t_m = \frac{L_m}{V_a} \quad (11)$$

$$t_m = \frac{100}{596,8} = 0,17 \text{ min}$$

Temps improductius:

- Col·locar eina en portaeines: 0,5 min
- Configuració paràmetres (revolucions, avanç, zero peça, comprovacions de cota, etc.): 1,5 min

Temps total: 0,5 + 1,5 + t_m (desbast) + t_m (acabat) = 2,267 min.

11) Força de tall

$$f_c = k \cdot \sigma_r \quad (12)$$

$$f_c = 3 \cdot 310 = 930 \text{ N}$$

$$F_c = f_c \cdot p \cdot b \quad (13)$$

$$F_c = 930 \cdot 2 \cdot 10 = 18.600 \text{ N}$$

12) Potència de tall

$$N_c = \frac{F_c \cdot V_a}{60.000} \quad (14)$$

$$N_c = \frac{18.600 \cdot 596,8}{60.000} = 185 \text{ W}$$

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (15)$$

$$N_m = \frac{0,185}{0,75} = 0,25 \text{ kW}$$

Operació assumible al disposar d'una màquina amb una potència entregada de 11kW.

A2. Resultats mesura rugositat

A continuació es presenta una taula amb les rugositats mesurades en les provetes brunyides.

	Previ al brunyit			
	X		Y (Avanç fresat)	
	Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //
	0,302	2,484	0,399	1,994
	0,786	4,723	0,398	1,906
	0,413	2,503	0,522	2,621
	0,418	2,512	0,487	2,522
	0,395	2,169	0,507	2,946
	0,496	2,298	0,551	2,443
	0,567	2,766	0,458	2,250
	0,442	2,527	0,746	4,190
			0,801	3,907
			0,772	3,986
MEDIA (μm)	0,477	2,748	0,564	2,877
DESVEST ((μm)	0,1464	0,8170	0,1526	0,8508
LIMITE UP	0,770	4,382	0,869	4,578
LIMITE DOWN	0,185	1,114	0,259	1,175

Taula 16 Resultats rugositat prèvia al brunyit.

	Assaig 1				Assaig 2				Assaig 3			
	X		Y (Avanç fresat)		X		Y (Avanç fresat)		X		Y (Avanç fresat)	
	Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //	Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //	Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //
	0,056	0,383	0,096	0,751	0,022	0,148	0,147	0,791	0,109	0,783	0,048	0,379
	0,182	1,220	0,087	1,000	0,019	0,108	0,118	0,678	0,092	0,583	0,165	0,939
	0,067	0,461	0,127	0,893	0,026	0,211	0,152	0,889	0,035	0,193	0,163	0,918
	0,043	0,227	0,041	0,390	0,047	0,314	0,147	0,806	0,073	0,465	0,126	0,755
	0,097	0,732	0,027	0,193	0,035	0,268	0,083	0,526	0,036	0,176	0,118	0,621
	0,073	0,403	0,023	0,244	0,036	0,281	0,075	0,442	0,040	0,227	0,047	0,272
			0,019	0,135			0,089	0,583			0,048	0,245
			0,062	0,532							0,079	0,522
											0,071	0,556
MEDIA (μm)	0,086	0,571	0,060	0,517	0,031	0,222	0,116	0,674	0,064	0,405	0,096	0,579
DESVEST (μm)	0,0502	0,3581	0,0397	0,3319	0,0105	0,0808	0,0335	0,1640	0,0319	0,2479	0,0482	0,2566
LIMITE UP	0,187	1,287	0,140	1,181	0,052	0,383	0,183	1,002	0,128	0,900	0,192	1,092
LIMITE DOWN	-0,014	-0,145	-0,019	-0,147	0,010	0,060	0,049	0,346	0,000	-0,091	0,000	0,065

Taula 17 Resultats rugositats en assaig 1,2 i 3.

Assaig 4				Assaig 5				Assaig 6				
X		Y (Avanç fresat)		X		Y (Avanç fresat)		X		Y (Avançfresat)		
Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //	Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //	Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //	
0,068	0,396	0,096	0,592	0,016	0,102	0,067	0,333	0,041	0,243	0,114	0,902	
0,065	0,340	0,077	0,523	0,035	0,217	0,065	0,445	0,066	0,461	0,174	1,237	
0,048	0,293	0,025	0,148	0,097	0,628	0,063	0,357	0,062	0,359	0,149	1,164	
0,044	0,246	0,024	0,208	0,107	0,645	0,131	0,897	0,067	0,443	0,084	0,716	
0,093	0,403	0,077	0,463		1,707	0,142	1,046	0,051	0,354	0,092	0,724	
0,094	0,385	0,060	0,527	0,279	1,732	0,113	0,829	0,048	0,326	0,123	0,777	
0,083	0,342	0,102	0,732	0,103	0,543	0,302	1,642	0,091	0,859	0,134	0,814	
		0,117	0,864	0,076	0,493	0,251	1,366	0,055	0,440	0,050	0,271	
		0,035	0,266			0,089	0,518			0,075	0,774	
		0,040	0,377			0,104	0,628			0,149	1,124	
MEDIA (μm)	0,071	0,344	0,065	0,470	0,102	0,758	0,133	0,806	0,060	0,436	0,114	0,850
DESVEST ((μm)	0,0202	0,0579	0,0336	0,2279	0,0856	0,6232	0,0814	0,4409	0,0154	0,1858	0,0388	0,2804
LIMITE UP	0,111	0,459	0,132	0,926	0,273	2,005	0,295	1,688	0,091	0,807	0,192	1,411
LIMITE DOWN	0,030	0,228	-0,002	0,014	-0,069	-0,488	-0,030	-0,076	0,029	0,064	0,037	0,289

Taula 18 Resultats rugositats en assaig 4,5 i 6.

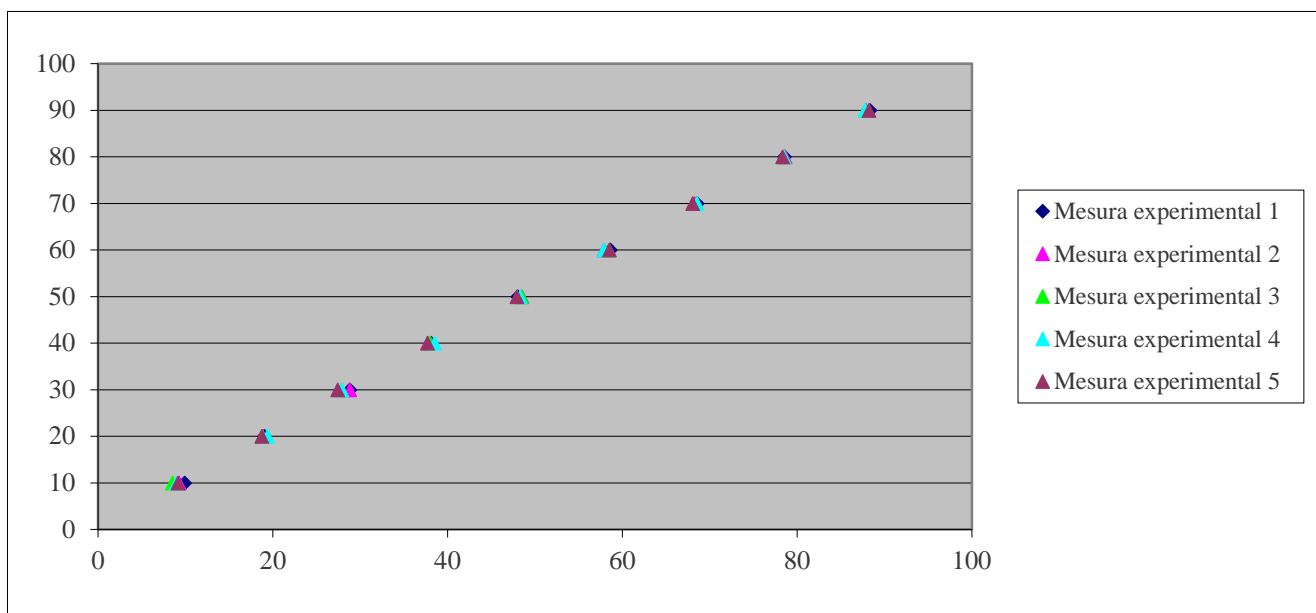
Assaig 7				Assaig 8				Assaig 9				
X		Y (Avanç fresat)		X		Y (Avanç fresat)		X		Y (Avançfresat)		
Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //	Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //	Ra ⊥	Rt ⊥	Ra //	Rt //	
0,133	0,971	0,114	0,840	0,073	0,554	0,118	0,828	0,113	0,758	0,115	0,928	
0,112	0,719	0,112	0,738	0,051	0,482	0,049	0,292	0,326	1,434	0,077	0,521	
0,098	0,668	0,046	0,348	0,043	0,393	0,073	0,428	0,104	0,600	0,077	0,547	
0,103	0,578	0,049	0,348	0,060	0,543	0,061	0,515	0,065	0,534	0,115	1,028	
0,063	0,337	0,155	1,045	0,117	1,263	0,204	1,087	0,086	0,857	0,099	0,822	
0,075	0,543	0,181	1,303	0,171	1,048	0,250	1,398	0,110	0,788	0,212	1,134	
0,130	0,705	0,184	1,348	0,206	1,160	0,072	0,577	0,171	0,971	0,183	0,997	
0,167	0,921	0,148	0,926	0,165	1,141	0,075	0,595	0,054	0,357	0,066	0,495	
0,129	0,622	0,046	0,309	0,075	0,575	0,079	0,514	0,049	0,383	0,071	0,420	
		0,058	0,371	0,090	0,647	0,082	0,523			0,038	0,280	
MEDIA (μm)	0,112	0,674	0,109	0,758	0,105	0,781	0,106	0,676	0,120	0,742	0,105	0,717
DESVEST ((μm)	0,0319	0,1920	0,0564	0,4014	0,0570	0,3309	0,0669	0,3357	0,0859	0,3331	0,0543	0,2982
LIMITE UP	0,176	1,058	0,222	1,560	0,219	1,442	0,240	1,347	0,292	1,409	0,214	1,314
LIMITE DOWN	0,048	0,290	-0,003	-0,045	-0,009	0,119	-0,027	0,004	-0,052	0,076	-0,003	0,121

Taula 19 Resultats rugositats en assaig 6, 7 i 8.

A3. Resultats Protocol correcció mesura longitud

Mesura patró	Mesura experimental 1	Mesura experimental 2	Mesura experimental 3	Mesura experimental 4	Mesura experimental 5
(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
10,00	9,88	9,26	8,48	8,94	9,11
20,00	19,0	18,8	18,7	19,3	18,7
30,00	28,7	28,7	27,8	27,8	27,3
40,00	38,0	37,6	37,9	38,5	37,7
50,00	48,0	48,4	48,4	48,2	47,9
60,00	58,6	57,8	58,4	57,8	58,5
70,00	68,5	68,2	68,5	68,5	68,0
80,00	78,5	78,6	78,5	78,4	78,3
90,00	88,3	87,8	87,7	87,7	88,2

valor	error estàndar
1,2058	
a= 4	0,14602
b= 0	0,00267
0,9997	
r2= 0	
error estàndar en l'estimació de y= 9	
graus de llibertat= 43	



Taula 20 Resultats de la correcció de mesura longitud.

A4. Resultats mesura duresa

Es presenten les taules de duresa Vickers mesurades amb el microduròmetre Buehler 5114. A cada mostra hi trobarem una identificació "Assaig (X) _L(Y)". La lletra X correspon el número d'assaig i L(Y), a la línia de mesura (1,2,3).

Nº Assaig	Assaig 1			Assaig 2			Assaig 3		
	V=0%; F=45N; b=0,29mm; PAR			V=0%; F=90N; b=0,35mm; PERP			V=0%; F=135N; b=0,41mm; 45DEG		
Paràmetres	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3
Mesura 1	74,7	75,9	71,8	85,8	X	63,4	76,9	90,7	75,2
Mesura 2	73,6	73,2	73,8	80,9	78,0	71,5	71,6	X	75,8
Mesura 3	73,9	79,5	72,9	74,4	68,0	70,4	86,8	95,9	X
Mesura 4	72,7	X	73,7	90,4	79,2	69,0	72,6	71,9	76,2
Mesura 5	71,2	70,2	70,7	66,6	81,6	64,8	62,9	91,4	84,5
Mesura 6	74,4	73,1	70,7	74,4	80,7	63,5	71,7	90,8	74,4
Mesura 7	72,3	70,7	72,5	67,0	70,2	69,3	81,3	85,1	74,4
Mesura 8	74,5	74,1	X	73,9	73,3		67,9	85,0	87,2
Mitja assaig [HV]	73,4	73,8	72,3	76,7	75,9	67,4	74,0	87,3	78,2
Desv. Est. [HV]	1,17	2,94	1,18	7,93	4,98	3,17	7,06	7,18	4,92

Taula 21 Resultats mesura de duresa en assaig 1, 2 i 3.

Nº Assaig	Assaig 4			Assaig 5			Assaig 6		
	V=50%; F=90N; b=0,41mm; PAR			V=50%; F=135N; b=0,29mm; PERP			V=50%; F=45N; b=0,35mm; 45DEG		
Paràmetres	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3	Línia 1	Línia 2	Línia 3
Mesura 1	85,1	82,2	94,3	30,0	X	83,8	89,7	82,2	80,0
Mesura 2	X	88,2	X	92,7	82,2	84,6	88,4	73,0	70,9
Mesura 3	97,8	94,9	X	92,6	80,2	81,9	87,5	84,5	79,7
Mesura 4	92,0	87,9	87,7	105,6	82,3	65,4	74,9	X	77,5
Mesura 5	100,4	79,4	85,5	97,6	83,4	94,0	81,9	73,5	77,8
Mesura 6	83,3	78,4	84,1	77,8	X	78,5	79,9	X	69,4
Mesura 7	92,8	94,0	79,8	76,0	80,2	X	89,7	X	X
Mesura 8	82,0	92,0	72,6	90,4	73,7	75,0	90,9	85,8	73,7
Mitja assaig [HV]	90,5	87,1	84,0	82,8	80,4	80,5	85,4	79,8	75,6
Desv. Est. [HV]	6,67	6,07	6,69	21,93	3,19	8,20	5,39	5,46	3,95

Taula 22 Resultats mesura de duresa en assaig 4, 5 i 7.

Mostra		Assaig 1 _L2						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolent	Avís	Operari	Souliman Annouhi Amar	
34,50	32,42	34,94	75,9			Reina		
34,56	33,63	35,58	73,2			Càrrega (g)	50	0,750
32,13	33,23	34,16	79,5			Objectiu	100	
35,49	35,94	Descartat	Descartat	x	NO		pendent	
34,61	35,11	36,35	70,2				Interc. (µm)	
33,60	34,63	35,60	73,1			λ (µm)	0,40	
34,18	35,26	36,21	70,7			Resolució òptica (µm)	0,21	
33,57	34,19	35,37	74,1			Mesures bones	7	
						HV	Error	
						73,8	9,1	

Taula 26 Resultat duresa assaig 1 de la línia 2.

Mostra Assaig 1 _L3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar	
34,54	34,33	35,93	71,8					
34,20	33,70	35,44	73,8			Reïna		
34,07	34,30	35,67	72,9					
33,95	34,03	35,48	73,7			Càrrega (g)	50	0,750
34,74	34,68	36,20	70,7					
35,05	34,39	36,21	70,7			Objectiu	100	
33,92	34,64	35,77	72,5					
36,28	34,90	Descarta t	Descarta t	x	NO		Valor	Error
						pendent		
						Interc. (µm)		
						λ (µm)	0,40	
						Resolució òptica (µm)	0,21	
						Mesures bones	7	
						HV	Error	
						72,3	9,1	

Taula 27 Resultat duresa assaig 1 de la línia 3.

Mostra						Assaig 2_L3		
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolent	Avis	Operari	Souliman Annouhi Amar	
37,22	36,27	38,26	63,4		NO	Reïna		
34,96	34,07	36,01	71,5			Càrrega (g)	50	0,750
34,26	35,33	36,29	70,4			Objectiu	100	
34,86	35,48	36,67	69,0				Valor	Error
36,15	36,47	37,82	64,8			pendent		
37,04	36,38	38,22	63,5		NO	Interc. (µm)		
34,73	35,45	36,59	69,3			λ (µm)	0,40	
						Resolució òptica (µm)	0,21	
						Mesures bones	7	
						HV	Error	
						67,4	9,1	

Taula 30 Resultat duresa assaig 2 de la línia 3.

Mostra						Assaig 3_L2	
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	
30,37	30,65	31,97	90,7			Souliman Annouhi Amar	
27,56	28,08	Descartat	Descartat	x	NO	Reïna	
29,82	29,48	31,10	95,9			Càrrega (g)	
35,40	33,44	35,91	71,9			50	0,750
30,42	30,36	31,85	91,4			Objectiu	
30,45	30,54	31,95	90,8			100	
32,02	31,05	33,00	85,1			pendent	
31,24	31,88	33,03	85,0			Valor	Error
						pendent Interc. (µm)	
						λ (µm)	0,40
						Resolució òptica (µm)	0,21
						Mesures bones	7
						HV	Error
						87,3	9,1

Taula 32 Resultat duresa assaig 3 de la línia 2.

Mostra		Assaig 4_L2							
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolent	Avis	Operari	Souliman Annouhi Amar		
31,13	33,08	33,58	82,2			Reïna			
31,13	30,78	32,42	88,2			Càrrega (g)	50	0,750	
29,98	29,63	31,26	94,9			Objectiu	100		
30,96	31,06	32,47	87,9				Valor	Error	
33,05	32,35	34,18	79,4			pendent			
32,08	33,76	34,40	78,4			Interc. (µm)			
29,98	29,91	31,40	94,0			λ (µm)	0,40		
30,26	30,31	31,74	92,0			Resolució òptica (µm)	0,21		
						Mesures bones	8		
						HV	Error		
						87,1	9,1		

Taula 35 Resultat duresa assaig 4 de la línia 2.

Mostra		Assaig 4_L3						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar	
31,17	28,65	31,36	94,3			Reïna		
28,39	27,24	Descarta t	Descarta t	x	NO			
24,97	25,21	Descarta t	Descarta t	x	NO	Càrrega (g)	50	0,750
31,46	30,63	32,51	87,7				Objectiu 100	
32,15	30,78	32,93	85,5			pendent Interc. (µm)	Valor	Error
31,42	32,05	33,20	84,1					
33,24	31,99	34,09	79,8			λ (µm)	0,40	
34,81	33,67	35,73	72,6				Resolució òptica (µm)	0,21
						Mesures bones		6
							HV	Error
						84,0		9,1

Taula 36 Resultat duresa assaig 4 de la línia 3.

Mostra		Assaig 5_L2						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar	
30,25	30,21	Descartat	Descartat	x	NO	Reïna		
31,88	32,33	33,58	82,2			Càrrega (g)	50	0,750
32,76	32,28	34,00	80,2			Objectiu	100	
32,21	31,97	33,56	82,3			pendent Interc. (µm)	Valor	Error
31,69	32,04	33,33	83,4			λ (µm)	0,40	
30,05	30,84	Descartat	Descartat	x	NO	Resolució òptica (µm)	0,21	
32,42	32,63	34,00	80,2			Mesures bones	6	
34,29	33,67	35,47	73,7			HV	Error	
						80,4	9,1	

Taula 38 Resultat duresa assaig 5 de la línia 2.

Mostra		Assaig 6_L3						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar	
31,98	33,14	34,04	80,0			Reïna		
34,62	34,71	36,16	70,9			Càrrega (g)	50	0,750
32,56	32,69	34,10	79,7			Objectiu	100	
32,90	33,32	34,59	77,5			pendent Interc. (µm)	Valor	Error
32,96	33,14	34,53	77,8			λ (µm)	0,40	
34,96	35,17	36,56	69,4			Resolució òptica (µm)	0,21	
29,74	30,00	Descarta t	Descarta t	x	NO	Mesures bones	7	
33,90	34,05	35,46	73,7			HV	Error	
						75,6	9,1	

Taula 42 Resultat duresa assaig 6 de la línia 3.

Mostra	Assaig 7_L1
---------------	-------------

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolent	Avís
32,77	30,97	33,34	83,4		
33,13	34,33	35,22	74,8		
33,55	33,84	35,18	74,9		
32,98	34,33	35,14	75,1		
39,46	40,15	Descartat	Descartat	x	NO
31,33	32,93	33,60	82,1		
21,64	21,64	Descartat	Descartat	x	NO
32,20	32,83	33,99	80,3		

Operari	Souliman Annouhi Amar
----------------	--------------------------

Reïna	
--------------	--

Càrrega (g)	50	0,750
--------------------	----	-------

Objectiu	100
-----------------	-----

	Valor	Error
pendent		
Interc. (µm)		

λ (µm)	0,40
---------------	------

Resolució òptica (µm)	0,21
------------------------------	------

Mesures bones	6
----------------------	---

HV	Error
78,4	9,1

Taula 43 Resultat duresa assaig 7 de la línia 1.

Mostra						Assaig 7_L2	
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar
31,92	32,00	33,43	83,0			Reina	
35,29	33,49	35,88	72,0			Càrrega (g)	50 0,750
28,61	28,26	Descartat	Descartat	x	NO	Objectiu	100
28,83	28,89	Descartat	Descartat	x	NO	pendent	
34,59	33,54	35,55	73,4			Interc. (µm)	
31,89	32,34	33,59	82,2			λ (µm)	0,40
33,11	32,86	34,46	78,1			Resolució òptica (µm)	0,21
33,68	32,94	34,79	76,6			Mesures bones	6
						HV	Error
						77,5	9,1

Taula 44 Resultat duresa assaig 7 de la línia 2.

Mostra	Assaig 8_L2
---------------	-------------

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s
19,84	19,52	Descartat	Descartat	x	NO
31,52	31,40	32,93	85,5		
33,03	31,34	33,66	81,8		
32,00	32,60	33,77	81,3		
27,39	27,62	Descartat	Descartat	x	NO
31,09	34,10	34,07	79,9		
30,81	30,25	31,99	90,6		
32,52	33,80	34,64	77,3		

Operari	Souliman Annouhi Amar
----------------	--------------------------

Reïna	
--------------	--

Càrrega (g)	50	0,750
--------------------	----	-------

Objectiu	100
-----------------	-----

	Valor	Error
pendent		
Interc. (µm)		

λ (µm)	0,40
---------------	------

Resolució òptica (µm)	0,21
------------------------------	------

Mesures bones	6
----------------------	---

HV	Error
82,7	9,1

Taula 47 Resultat duresa assaig 8 de la línia 2.

Mostra						Assaig 8_L3	
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar
29,29	28,15	Descartat	Descartat	x	NO		
33,04	32,80	34,40	78,4			Reïna	
32,47	31,74	33,58	82,2			Càrrega (g)	50 0,750
36,30	35,67	37,49	66,0			Objectiu	100
33,25	33,31	34,76	76,7			pendent Interc. (µm)	
31,25	31,34	32,76	86,4			λ (µm)	0,40
33,14	32,83	34,46	78,1			Resolució òptica (µm)	0,21
33,36	32,19	34,25	79,0			Mesures bones	7
						HV	Error
						78,1	9,1

Taula 48 Resultat duresa assaig 8 de la línia 3.

Mostra						Assaig 9_L1					
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolent	Avis	Operari	Souliman Annouhi Amar				
35,54	35,79	37,17	67,1			Reïna					
35,51	35,66	37,09	67,4			Càrrega (g)	50	0,750			
36,14	37,23	38,19	63,6		NO	Objectiu	100				
35,94	35,84	37,39	66,3			pendent	Valor		Error		
36,41	36,28	37,85	64,7			Interc. (µm)					
37,61	37,96	39,30	60,0		NO	λ (µm)	0,40				
37,20	37,93	39,08	60,7		NO	Resolució òptica (µm)	0,21				
37,21	35,28	37,75	65,1			Mesures bones	8				
						HV	Error				
						64,4	9,1				

Taula 49 Resultat duresa assaig 9 de la línia 1.

Mostra		Assaig 9_L2						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar	
33,95	34,12	Descarta t	Descarta t	x	NO	Reïna		
34,93	36,47	37,20	67,0			Càrrega (g)	50	0,750
37,09	36,34	38,23	63,5		NO	Objectiu	100	
35,86	37,97	38,43	62,8		NO	pendent	Valor	Error
36,49	35,64	37,57	65,7			Interc. (µm)		
36,51	36,69	38,11	63,8			λ (µm)	0,40	
39,33	39,80	Descarta t	Descarta t	x	NO	Resolució òptica (µm)	0,21	
						Mesures bones	5	
						HV	Error	
						64,6	9,1	

Taula 50 Resultat duresa assaig 9 de la línia 2.

Mostra		Assaig 9_L3						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar	
37,51	37,20	38,87	61,4		NO	Reina		
36,65	37,32	38,50	62,6		NO	Càrrega (g)	50	0,750
34,46	32,11	Descartat	Descartat	x	NO	Objectiu	100	
38,11	37,70	39,43	59,7		NO	pendent		
36,48	36,70	38,10	63,9			Interc. (μm)		
36,92	37,23	38,59	62,3		NO	λ (μm)	0,40	
37,67	37,27	38,99	61,0		NO	Resolució òptica (μm)	0,21	
37,28	36,27	38,29	63,3		NO	Mesures bones	7	
						HV	Error	
						62,0	9,1	

Taula 51 Resultat duresa assaig 9 de la línia 3.

Mostra		Assaig 2						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolent	Avis	Operari	Souliman Annouhi Amar	
24,71	24,92	26,23	13,5		NO	Reïna		
23,69	23,30	24,90	15,0		NO	Càrrega (g)	5	0,075
24,98	24,51	26,16	13,6		NO	Objectiu	100	
23,61	24,77	25,60	14,2		NO		Valor	Error
22,78	21,80	23,68	16,5		NO		pendent	
23,88	24,00	25,34	14,4		NO		Interc. (µm)	
24,75	23,34	25,45	14,3		NO		λ (µm)	0,40
24,25	24,41	25,74	14,0		NO		Resolució òptica (µm)	0,21
							Mesures bones	8
							HV	Error
							14,4	0,5

Taula 54 Resultat duresa assaig 2. Càrrega de 5g.

Mostra		Assaig 4						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV	Dolent	Avis	Operari	Souliman Annouhi Amar	
24,89	24,92	26,32	13,4		NO	Reïna		
24,51	25,41	26,37	13,3		NO	Càrrega (g)	5	0,075
24,66	23,35	25,41	14,4		NO	Objectiu	100	
25,79	24,68	26,65	13,1		NO		Valor	Error
24,66	23,03	25,25	14,5		NO	pendent		
25,34	23,65	25,90	13,8		NO	Interc. (μm)		
24,18	23,79	25,39	14,4		NO	λ (μm)	0,40	
25,75	23,69	26,13	13,6		NO	Resolució òptica (μm)	0,21	
						Mesures bones	8	
						HV	Error	
						13,8	0,5	

Taula 56 Resultat duresa assaig 4. Càrrega de 5g.

Mostra		Assaig 5						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV	Dolen t	Avi s	Operari	Souliman Annouhi Amar	
23,61	23,60	25,01	14,8		NO			
19,42	18,51	Descartat	Descartat	x	NO	Reïna		
23,98	24,51	25,65	14,1		NO			
23,65	24,77	25,62	14,1		NO	Càrrega (g)	5	0,075
23,78	23,79	25,19	14,6		NO			
23,98	24,01	25,40	14,4		NO	Objectiu	100	
24,75	23,65	25,61	14,1		NO			
24,27	24,41	25,75	14,0		NO			
24,01	23,79	25,30	14,5		NO	pendent	Valor	Error
						Interc. (μm)		
						λ (μm)	0,40	
						Resolució òptica (μm)	0,21	
						Mesures bones	8	
						HV	Error	
						14,3	0,5	

Taula 57 Resultat duresa assaig 5. Càrrega de 5g.

Mostra		Assaig 6						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolent	Avis	Operari	Souliman Annouhi Amar	
25,47	22,93	25,61	14,1		NO	Reïna		
22,93	23,90	24,81	15,1		NO	Càrrega (g)	5	0,075
23,73	23,91	25,22	14,6		NO	Objectiu	100	
24,43	24,86	26,06	13,7		NO		Valor	Error
25,41	24,86	26,55	13,2		NO		pendent	
25,75	24,21	26,39	13,3		NO		Interc. (µm)	
24,15	23,62	25,29	14,5		NO		λ (µm)	0,40
24,18	24,33	25,66	14,1		NO		Resolució òptica (µm)	0,21
							Mesures bones	8
							HV	Error
							14,1	0,5

Taula 58 Resultat duresa assaig 6. Càrrega de 5g.

Mostra		Assaig 8						
d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (µm)	HV	Dolent	Avis	Operari	Souliman Annouhi Amar	
22,58	22,69	24,03	16,1		NO	Reïna		
23,46	24,00	25,13	14,7		NO	Càrrega (g)	5	0,075
23,26	23,60	24,83	15,0		NO	Objectiu	100	
25,12	24,95	26,45	13,3		NO		Valor	Error
25,08	25,29	26,60	13,1		NO		pendent	
24,41	24,72	25,97	13,7		NO		Interc. (µm)	
22,26	22,92	23,98	16,1		NO			
24,79	24,48	26,04	13,7		NO		λ (µm)	0,40
							Resolució òptica (µm)	0,21
							Mesures bones	8
							HV	Error
							14,5	0,5

Taula 60 Resultat duresa assaig 8. Càrrega de 5g.

A5. Codi CNC

El codi de control numèric s'ha utilitzat per el brunyit en la Fresadora Lagun MC600. S'ha utilitzat el codi Fagor 8065M.

Codi de les funcions preparatòries G:

G00: amb aquesta funció s'hi indica a la màquina que es desplaci a màxima velocitat fins al punt indicat.

G01: interpolació lineal recta. Aquesta instrucció serveix per programar una trajectòria en línia recta i mecanitzant a la velocitat d'avanç programat (F).

G90: cotes absolutes. La funció G90 serveix per indicar-li al control que volem definir les cotes de forma absoluta, és a dir, la distància que separa aquest punt del zero peça, independentment de la posició on estigui l'eina.

G91: amb la instrucció G91 li indiquem al control que les cotes que definirem són cotes "incrementals". Això vol dir que es desplaci d'un punt a un altre prenent com a referència la mesura existent des del punt en què estem actualment i el nou punt programat.

G54 a G59: per efectuar un trasllat d'origen de coordenades, disposem de les funcions G54 a G59 ambdues incloses, que s'encarreguen de desplaçar l'origen des del zero màquina fins al nou origen triat (zero peça), disposant així de set desplaçaments diferents, que anomenarem a nostre programa indicant la funció desitjada (G57 ...) sense haver de assignar de nou els valors X, Y, Z.

Codi de les funcions auxiliars M:

M30: final del programa.

Brunyit estratègia-força-pas_lateral

PROTOTIP B10PZ40k83

SELECCIONAR ELS PARÀMETRES DEL PROGRAMA

;=====

P25=3; SELECCIONAR ESTRATÈGIA 1=PERP 2= PAR 3=45DEG

P0 = 50; coordenada X empremta local

P1 = 100; coordenada y empremta local

P2 = -1.5 ; valor NEGATIU coordenada z força -0.987 -> 100 N - 1.345 -> 150 N

P3 = 0.35; valor absolut pas lateral

P5 = 1; multiplicador pas lateral

P4 = 10; ample empremta

P15 = 0; comptador de passades

```
;=====
```

```
; FUNCIONS DE PREPARACIÓ I POSICIONAMENT
```

```
G54
```

```
G00 G90 X0 Y0 Z10
```

```
; PRIMERA PASADA
```

```
G01 XP0 YP1 Z1 F300
```

```
G01 ZP2
```

```
$WHILE P3*P15 < P4
```

```
G91 G1 YP4
```

```
XP3
```

```
Y-P4
```

```
XP3
```

```
P15 = P15 + 2
```

```
$ENDWHILE
```

```
; SEGONAS PASADAS
```

```
$IF P25==1
```

```
$GOTO N10
```

```
$ELSEIF P25 ==2
```

```
$GOTO N20
```

```
$ELSE
```

```
$GOTO N30
```

```
$ENDIF
```

```
; ESTRATÈGIA PERP
```

```
N10: P15 = 0
```

```
$WHILE P3*P15 < P4
```

```
G91 G1 X-P4
```

```
YP3*P5
```

```
XP4
```

```
YP3*P5
```

```
P15 = P15 + 2
```

```
$ENDWHILE
```

```
Z10
```

```
M30
```

; ESTRATÈGIA PAR

N20: P15 = 0
G91 G1 XP3*P5/2
\$WHILE P3*P15 < P4
G91 G1 X-P3*P5
YP4
X-P3*P5
Y-P4
P15 = P15 + 2
\$ENDWHILE
Z10
M30

; ESTRATÈGIA 45DEG

N30: P15 = 1
\$WHILE P15*P3*2/SQRT[2] < P4 ; primera meitat de la empremta

G91 G1 X-P3*P5*2/SQRT[2]
XP15*P3*P5*2/SQRT[2] YP15*P3*P5*2/SQRT[2]
P15 = P15 + 1
YP3*P5*2/SQRT[2]
X-P15*P3*P5*2/SQRT[2] Y-P15*P5*P3*2/SQRT[2]
P15 = P15 + 1
\$ENDWHILE

P15=P15-1
X-P3*P5*2/SQRT[2]

\$WHILE P15 > 0 ; segona meitat de la empremta
G91 G1 XP15*P3*P5*2/SQRT[2] YP15*P5*P3*2/SQRT[2]
X-P3*P5*2/SQRT[2]
P15 = P15 - 1
X-P15*P3*P5*2/SQRT[2] Y-P15*P3*P5*2/SQRT[2]
YP3*P5*2/SQRT[2]
P15 = P15 - 1
\$ENDWHILE
Z10
M30

