

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**ESTUDIO DEL PROCESO DE BRUÑIDO DE SUPERFICIES
COMPLEJAS**



Memoria i Anexos

Autor: Sara Karout Capdevila
Director: José Antonio Travieso Rodríguez
Co-Director: Jordi-Adalbert Marqués Salvador

Convocatoria: Enero 2022

Resum

Millorar l'acabat superficial d'una peça plana o cilíndrica, pot fer-se fàcilment mitjançant un procés de rectificat, tanmateix, millorar la qualitat superficial d'una superfície de configuració complexa (com motlles o matrius) és un problema difícil de tractar. Per aquest motiu, es recorre al procés conegut com a "brunyt". El brunyt és una operació tecnològica que s'aplica després del mecanitzat i que deforma plàsticament les irregularitats superficials de la peça mitjançant l'ús d'una eina que aplica força sobre la zona de treball. En aquest projecte, es descriu el procés de brunyt d'una superfície complexa amb una eina de puntes intercanviables que té com a element que brunyeix una punta esfèrica de carbur de Tungstè (o carbur de Wolfram), a diferència del brunyt convencional que es realitza mitjançant l'ús d'una esfera que rota sobre si mateixa.

L'objectiu principal d'aquest treball és definir els paràmetres òptims de funcionament de l'eina de treball amb la finalitat de determinar quins permeten obtenir millors acabats, arribant a valors de rugositat similars als obtinguts en un procés de polit manual. Per a aconseguir-ho, s'han realitzat dos experiments basats en el brunyt de diverses mostres sotmeses a diferents combinacions de paràmetres: força, velocitat de rotació, passada lateral, etc. El material de la peça sobre la qual s'han fet els assajos és un bloc d'acer 1045 (o C45).

Un cop analitzades les mostres, no s'aconsegueixen determinar els paràmetres òptims de funcionament de l'eina. No obstant això, es determinen paràmetres recomanables que milloren dràsticament l'acabat superficial de la peça quan es treballa amb mostres d'acer 1045. Pel que fa al brunyt de superfícies complexes, es determina que treballant amb velocitats de rotació elevades ($n > 600$ rpm) i amb forces inferiors a 100 N, s'obtenen rugositats R_a per sota de $0,6\mu\text{m}$, independentment de si han estat brunyides en una fresadora de 3 o 5 eixos. En canvi, no es recomana l'ús d'aquesta eina quan es requereixi millorar l'acabat de superfícies planes, ja que s'obtenen valors de rugositat per sobre de $0,8\mu\text{m}$, arribant a superar $1\mu\text{m}$.

Resumen

Mejorar el acabado superficial de una pieza plana o cilíndrica puede hacerse fácilmente mediante un proceso de rectificado, sin embargo, mejorar la calidad superficial de una superficie de configuración geométrica compleja (como moldes y matrices) es un problema difícil de tratar. Por ello, se recurre al proceso conocido con el nombre de “bruñido”. El bruñido es una operación tecnológica que se aplica después del mecanizado y que deforma plásticamente las irregularidades superficiales de la pieza mediante el uso de una herramienta que aplica fuerza sobre la zona de trabajo. En este proyecto, se describe el proceso de bruñido de una superficie compleja con una herramienta de puntas intercambiables que tiene como elemento que bruñe una punta esférica de carburo de Tungsteno (o carburo de Wolframio), a diferencia del bruñido convencional que se realiza mediante el uso de una esfera que rota sobre sí misma.

El objetivo principal de este trabajo es definir los parámetros óptimos de funcionamiento de la herramienta de trabajo con el fin de determinar cuáles permiten obtener mejores acabados, llegando a valores de rugosidad similares a los obtenidos en un proceso de pulido manual. Para ello, se han realizado dos experimentos basados en el bruñido de varias muestras sometidas a distinta combinación de parámetros: fuerza, velocidad de rotación de la herramienta, paso lateral, etc. El material de la pieza sobre la que se han realizado los ensayos es un bloque de acero 1045 (o C45).

Tras el análisis de los distintos ensayos, no se logran determinar los parámetros óptimos de funcionamiento de la herramienta. Sin embargo, se obtienen parámetros recomendables que conllevan una mejoría drástica en el acabado de la pieza cuando se trabaja con muestras de acero 1045. Por lo que refiere al bruñido de superficies complejas, se determina que trabajando a velocidades de rotación elevadas ($n > 600$ rpm) y con fuerzas aplicadas inferiores a 100 N, se obtienen rugosidades R_a por debajo de $0,6 \mu\text{m}$, independientemente de si han sido bruñidas en una fresadora de 3 o de 5 ejes. En cambio, no se recomienda el uso de esta herramienta cuando se quiera mejorar el acabado de superficies planas, ya que se obtienen valores de rugosidad por encima de $0,8 \mu\text{m}$, llegando a superar $1 \mu\text{m}$.

Abstract

The finishing of a flat or cylindrical part can be easily done by a grinding process, however, to improve the surface quality of a complex surface (such as molds and dies) is a difficult problem to deal with. Therefore, the process known as “burnishing” is used. Burnishing is a technological operation that is applied after machining process and that plastically deforms surface irregularities by using a tool that applies force on the selected area. In this project, the process of burnishing a complex surface with an interchangeable tip tool is described. The tool has as a burnishing element a spherical tip of Tungsten carbide, unlike conventional burnishing which is done by using a sphere that rotates on itself.

The main objective of this project is to define the optimal operating parameters of the tool in order to determine which allow to obtain better finishes, reaching roughness values similar to those obtained in a manual polishing process. Therefore, two experiments have been carried out based on the burnishing of several samples subjected to different combinations of parameters like: force, tool rotation speed, step, etc. The material that has been used for the experiments is 1045 (or C45) Steel.

After the analysis of the different experiments, it has been not possible to determine the optimal operating parameters of the tool. However, some recommended parameters that lead to a drastic improvement in the finish of the part when working with 1045 Steel samples are obtained. Regarding the burnishing of complex surfaces, it is determined that working at high rotation speeds ($n > 600$ rpm) and with applied forces lower than 100 N, roughness $R_a < 0,6 \mu\text{m}$ is obtained, regardless of whether they have been done on a 3 or 5-axis milling machine. On the other hand, the use of this tool is not recommended if you want to improve the finish of a flat surface, since roughness values above $0,8 \mu\text{m}$ are obtained, reaching more than $1 \mu\text{m}$ in some cases.



Agradecimientos

Durante la realización de este proyecto, he recibido el apoyo de profesores, amigos y familiares, que han contribuido positivamente en el desarrollo del estudio y a los que querría agradecer su dedicación y ánimos, especialmente a:

Antonio Travieso, tutor de proyecto, al que me gustaría agradecerle la dedicación que ha mostrado a lo largo del trabajo y por hacerme ver que el mundo de la investigación conlleva: dedicación, tiempo y no desmoralizarse cuando los resultados no son los esperados, porque en eso consiste investigar, en seguir buscando.

Eric y Jaume, estudiantes de máster en la EEBE, quienes me han ayudado en numerosas ocasiones a entender el funcionamiento de las máquinas usadas en este proyecto y quienes dedicaron tiempo y esfuerzo en aclararme todas las dudas que me surgían durante el proyecto.

David Muñoz, quien me ha apoyado en todo momento y me ha ayudado a no perder los nervios en los momentos más críticos de este proyecto y ante los imprevistos que han ido saliendo a lo largo del trabajo. Gracias por creer en mí, quererme y apoyarme cuando más se necesita.

Y, por último, a mi familia. A los que están siempre a mi lado, en las buenas y en las malas, y a los que están lejos, pero están. Por animarme siempre a tirar hacia delante y a seguir mis pasiones. A mi madre especialmente le agradezco: su paciencia y esfuerzo dedicado en mi vida, por quererme y hacer de mí la persona que soy ahora.

Por todo esto y más: gracias a tod@s.



Glosario

A: Acero.

Al: Aluminio.

Ti-6Al-4V: Aleación del tipo *alpha-beta* de titanio, aluminio y vanadio.

p: Paso lateral.

t: Movimiento de penetración o profundidad de penetración.

a: Avance de la herramienta.

Va: Velocidad o movimiento de avance.

Vc: Velocidad o movimiento de corte.

CAD: Computer Aided Design.

CAM: Computer Aided Machining.

CNC: Computer Numerical Control.

l_b o λ_c: Longitud base o cut-off.

l_e: Longitud de evaluación.

Ra: Rugosidad superficial media aritmética.

Rz: Máxima altura del perfil en la longitud base.

Rq o RMS: Rugosidad media cuadrática.

Rsk: Parámetro de rugosidad Skewness.

Rku: Parámetro de rugosidad Kurtosis.

Sa: Desviación media aritmética de los puntos del mapa de alturas.

Sz: Desviación máxima de los puntos del mapa de alturas.

Sq: Desviación media cuadrática de los puntos del mapa de alturas.

Ssk: Parámetro estadístico Skewness.

Sku: Parámetro estadístico Kurtosis.

Fm: Fuerza real aplicada sobre una superficie.

k: Constante de *Hooke* de un muelle.

F₀: Precarga de la herramienta.

n: Velocidad de rotación, revoluciones por minuto (rpm).

μm: Unidad de medición (micrómetros).



Índice

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
GLOSARIO	VII
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. Problemática del acabado superficial en superficies complejas	17
1.2. Objetivos del trabajo	19
1.2.1. Objetivo general.....	19
1.2.2. Objetivos específicos.....	19
1.3. Alcance del trabajo	19
1.4. Antecedentes.....	19
1.5. Estado del arte.....	20
1.5.1. Mejora del acabado superficial de superficies complejas	20
1.5.2. Mejora del acabado superficial mediante el bruñido con bola	22
1.5.3. Comparativa entre procesos de fabricación de súper-acabado	24
1.6. Metodología de trabajo.....	25
1.6.1. Fase 1: Estudio previo	25
1.6.2. Fase 2: Ideación.....	25
1.6.3. Fase 3: Experimentación.....	25
2. ASPECTOS TEÓRICOS	27
2.1. Conocimientos previos	27
2.1.1. Teoría de mecanizado.....	27
2.1.2. Propiedades superficiales	32
2.1.3. Rugosímetro	36
2.2. Descripción del proceso de estudio	40
2.2.1. Proceso de Bruñido.....	40
2.2.2. Procedimiento para el bruñido de superficies complejas.....	41
2.3. Descripción de la herramienta usada.....	42
2.3.1. Partes de la herramienta	43
3. ENSAYOS REALIZADOS	47

3.1.	Experimento 1: Fase de experimentación.....	47
3.1.1.	Diseño del modelo.....	47
3.1.2.	Ejecución del modelo planteado.....	50
3.1.3.	Evaluación de la calidad superficial de las muestras	53
3.1.4.	Resultados	55
3.1.5.	Discusión de resultados.....	59
3.2.	Experimento 2: Análisis.....	60
3.2.1.	Descripción del ensayo.....	60
3.2.2.	Diseño del modelo.....	61
3.2.3.	Evaluación de la calidad superficial de las muestras	64
3.2.4.	Resultados	67
3.2.5.	Discusión de resultados.....	70
3.3.	Resumen de resultados	71
4.	ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL _____	72
5.	CONCLUSIONES _____	73
6.	ANÁLISIS ECONÓMICO _____	75
	BIBLIOGRAFÍA _____	77
	ANEXO A. PLANOS DE LA HERRAMIENTA. _____	79
	ANEXO B. FUSION 360. _____	80
	B1. Guía para la Instalación de FUSION 360.....	80
	B2. Guía para la simulación del programa	82

Índice de figuras

Figura 1.- Pulido manual de un molde.[2]	18
Figura 2.- Herramienta de bruñido de puntas intercambiables en funcionamiento.	18
Figura 3.- Procesos más comúnmente usados para mejorar el acabado superficial de piezas mecanizadas. [2]	21
Figura 4.- Mapas de altura obtenidos por cromatografía 3D de las tres superficies originales consideradas en el estudio.[3].....	23
Figura 5.- Comparación de los valores de Sq para los procesos ejecutados con y sin vibraciones.[3] .	23
Figura 6.- Ejemplo de una herramienta de fresa con plaquitas hexagonales en funcionamiento.[5] ..	29
Figura 7.- Movimientos durante el proceso de arranque de viruta. 1) Movimiento de corte, 2) Movimiento de avance, 3) Movimiento de penetración.[6].....	30
Figura 8.- Dibujo esquemático del proceso de extrusión.....	32
Figura 9.- Representación gráfica de Ra. [8].....	33
Figura 10.- Representación gráfica de Rz.	33
Figura 11.- Distribución del parámetro de asimetría Rsk.....	34
Figura 12.- Distribución del parámetro de distribución de alturas Rku.....	35
Figura 13.-Perfilómetro montado preparado para la medición de la muestra.	37
Figura 14.-Partes del perfilómetro usado para la medida de las muestras.....	38
Figura 15.- Partes del rugosímetro óptico usado para la medición de las muestras.....	39
Figura 16.- Esquema representativo del proceso de deformación plástica de las crestas de las irregularidades de una superficie mecanizada. [2]	40
Figura 17.- (A) Bailarina en estado original, (B) Bailarina tras detectar colisión con la pieza.....	42
Figura 18.- Vista de sección del conjunto de la herramienta de puntas intercambiables.	43
Figura 19.- Vista explosionada del conjunto de la herramienta de puntas intercambiables.....	43

Figura 20.- Vista parcial (a) y completa (b) del cuerpo de la herramienta.....	44
Figura 21.-Vista parcial (a) y completa (b) del patín deslizante de la herramienta.....	44
Figura 22.- Punta intercambiable libre (a) e introducida (b) en el patín deslizante de la herramienta.	45
Figura 23.-Tuerca (a) y muelle (b) prefabricados de la herramienta.....	46
Figura 24.-Bloque a ensayar diseñado en FUSION 360.	48
Figura 25.- Bloque a ensayar vista lateral en FUSION 360.....	48
Figura 26.-Disposición, nomenclatura y descripción de las muestras.....	49
Figura 27.- Muestras generadas en el programa CAD/CAM FUSION 360.....	52
Figura 28.- Muestras de 10x10mm bruñidas con la herramienta de puntas intercambiables.....	52
Figura 29.- Piezas diseñadas para nivelar las muestras a medir.....	53
Figura 30.- Esquema de parámetros de medida de la rugosidad de una muestra.	54
Figura 31.- Parámetros establecidos en el programa de escaneo de superficie.	54
Figura 32.-Representación gráfica de la variación de Ra y Sa en función de la fuerza aplicada sobre la superficie.	55
Figura 33.-Representación gráfica de la variación de Rz y Sz en función de la fuerza aplicada sobre la superficie	56
Figura 34.-Representación gráfica de la variación de Rq y Sq en función de la fuerza aplicada sobre la superficie	56
Figura 35.-Representación gráfica de la variación de Ra y Sa en función de la velocidad de rotación de la herramienta.	57
Figura 36.-Representación gráfica de la variación de Rz y Sz en función de la velocidad de rotación de la herramienta.	57
Figura 37.-Representación gráfica de la variación de Rq y Sq en función de la velocidad de rotación de la herramienta.	58

Figura 38.-Representación gráfica de la variación de Ra y Sa en función de la velocidad del paso lateral.	58
Figura 39.-Representación gráfica de la variación de Rz y Sz en función del paso lateral.	59
Figura 40.-Representación gráfica de la variación de Rq y Sq en función del paso lateral.	59
Figura 41.- Pieza analizada. a) Vista perfil, b) Vista planta.	61
Figura 42.- Posición de bruñido de la herramienta según las condiciones (a), (b) y (c).	62
Figura 43.- d) Herramienta funcionando con 3 ejes, e) Herramienta funcionando con 5 ejes.	62
Figura 44.- Muestras en pieza mecanizada: a) Vista frontal, b) Vista dorsal.	62
Figura 45.- Dibujo esquemático de muestras bruñidas en dorsal de la pieza.	63
Figura 46.- Dibujo esquemático de muestras bruñidas en frontal de la pieza.	64
Figura 47.-Rugosímetro óptico en funcionamiento.	65
Figura 48.- Perfilómetro en funcionamiento vista planta.	66
Figura 49.- Perfilómetro en funcionamiento vista perfil.	66
Figura 50.- (a) Aviso de pérdida de contacto con la superficie (fuera de rango), (b) Medición realizada correctamente	66
Figura 51.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Ra en la fresadora de 3 y 5 ejes.	68
Figura 52.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Rz en la fresadora de 3 y 5 ejes.	68
Figura 53.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Rq en la fresadora de 3 y 5 ejes.	69
Figura 54.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Rsk en la fresadora de 3 y 5 ejes.	69
Figura 55.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Rku en la fresadora de 3 y 5 ejes.	70
Figura 56.- Pantalla de inicio de sesión / crear cuenta en Autodesk.	80
Figura 57.- Ficha de datos personales para completar la instalación.	81
Figura 58.- Pestaña para la descarga de FUSION 360.	81

Figura 59.- Croquis 2D de la vista lateral del bloque de acero 1045 a mecanizar.....	83
Figura 60.- Extrusión de los perfiles 2D generados.....	83
Figura 61.- Croquis para extraer y aplanar parte del material de la pieza.	84
Figura 62.- Extrusión corte del croquis generado.....	84
Figura 63.- Croquis de muestra individual.	85
Figura 64.- Diseño del patrón de muestras a bruñir.....	85
Figura 65.- Cambio a pestaña de fabricación.....	86
Figura 66.- Descripción de estrategias usadas en el proyecto.	86
Figura 67.- Pestaña "Administrar Biblioteca de Herramientas".	87
Figura 68.- Pantalla de insertar nueva herramienta.	87
Figura 69.- Pliego de herramientas disponibles en FUSION 360.	88
Figura 70.- Ficha técnica de la herramienta seleccionada para el mecanizado.	88
Figura 71.- Pantalla para establecer la herramienta de fresado.	89
Figura 72.- Pantalla para establecer los límites de trabajo.....	89
Figura 73.- Simulación del proceso de fresado de desbaste.	90
Figura 74.- Simulación del proceso de fresado de acabado.	90
Figura 75.- Selección de la herramienta y perfil a bruñir.....	91
Figura 76.- Pantalla para establecer la dirección de bruñido y paso lateral.	91
Figura 77.- Herramienta de postproceso del código asociado a un setup.....	92
Figura 78.- Pestaña de selección de máquina a la que se quiere enviar el código.	92

Índice de tablas

Tabla 1.- Resumen de la comparación de procesos de super acabado.....	24
Tabla 2.- Valores de Cut-off en función de la rugosidad medida.....	38
Tabla 3.- Descripción condiciones de bruñido muestras.	50
Tabla 4.- Resultados de rugosidades obtenidos con el rugosímetro óptico.....	55
Tabla 5.- Descripción de condiciones de bruñido para el experimento 2.	63
Tabla 6.- Condiciones de bruñido variables del experimento 2.....	64
Tabla 7.- Resumen de resultados de rugosidad obtenidos en la medición con el rugosímetro óptico y perfilómetro.....	67
Tabla 8.- Tabla comparativa de resultados obtenidos con la fresadora de 3 y 5 ejes.....	67
Tabla 9.- Resumen mejores valores de rugosidad obtenidos en el experimento 1.	71
Tabla 10.- Resumen mejores valores de rugosidad obtenidos en el experimento 2.	71
Tabla 11.- Presupuesto aproximado de este proyecto.	75

1. Introducción

Lograr un buen acabado superficial en una pieza de configuración simple, como una pieza plana o cónica, no supone mucha complicación, puede elaborarse con cierta facilidad en una rectificadora. En cambio, cuando se trata de una pieza geométrica compleja, como en el caso de moldes y matrices, lograr un buen acabado superficial puede ser una tarea difícil de tratar.

En este trabajo se estudia cómo mejorar el acabado superficial de una pieza de geometría compleja mediante un proceso de deformación plástica: el bruñido. Se trata de un proceso automatizado que se desarrolla en la máquina de mecanizado donde se elabora la propia pieza. Este, puede ser sustitutivo del pulido manual, un proceso mucho más costoso en tiempo y mano de obra. [1] En la mayoría de casos, se trata de una esfera que, mediante una fuerza aplicada, gira y bruñe la superficie. En cambio, en este caso, se trata de una nueva herramienta, bautizada como “herramienta de puntas intercambiables”, que permite desechar únicamente la punta dañada en vez del conjunto entero y reducir el coste que supone, tanto económico como ambiental.

Para realizar este estudio se desarrollan una serie de experimentos con el objetivo de determinar los parámetros óptimos de mecanizado de la nueva herramienta de bruñido de puntas intercambiables. Dichos parámetros variarán en función del experimento. Al final se analizará el impacto de los valores establecidos sobre la superficie, midiendo la rugosidad de cada una de las muestras ensayadas. El proceso se realiza en una fresadora CNC, se coloca la herramienta sobre un cabezal hidráulico que ejerce presión sobre la punta y permite bruñir la superficie.

Travieso Rodríguez et al [2], también realiza un estudio del mismo calibre en el año 2010, donde ensaya distintas probetas de distinto material y forma, someténdolas a un proceso de bruñido con el objetivo de valorar el acabado superficial en función de distintas variables.

1.1. Problemática del acabado superficial en superficies complejas

La mayoría de elementos mecánicos que se conocen, como moldes o matrices, están compuestos por superficies complejas. De hecho, casi todo producto comercial contiene, por lo menos, un elemento crítico en su diseño que dificulta el proceso de mecanizado. Esto debe tenerse en cuenta en los procesos de manufactura actuales, ya que debido a los crecientes avances en tecnologías y nuevas aplicaciones CAD-CAM, el diseño en ingeniería se ha vuelto cada vez más sofisticado, buscando mayor precisión en sus resultados. Del mismo modo, el usuario busca cada vez más la producción al momento, donde el tiempo que transcurre entre la concepción del producto y su lanzamiento al mercado sea mínimo, haciendo que se genere una mayor demanda y productividad. Por lo tanto, es

necesario que los procesos de manufactura vayan actualizándose y mejorándose a modo de poder producir los productos que demandan los usuarios, pudiendo asegurar: rapidez y calidad.

Por ahora, la mayoría de procesos de acabado y mejora de la calidad superficial de moles y matrices, por ejemplo, se realizan de forma manual, cosa que consume una gran cantidad de tiempo y dinero debido a la necesidad de mano de obra especializada (véase **Figura 1**).



Figura 1.- Pulido manual de un molde.[2]

Es por ello que, en este proyecto, se propone mejorar la calidad de superficial de un elemento complejo mediante un proceso de bruñido similar al bruñido con bola. Donde una herramienta acabada en punta redondeada, aplica fuerza sobre la superficie, suavizándola y reduciendo la rugosidad de esta. Se trata de un proceso fácilmente reproducible y automatizable en la misma máquina de control numérico (CNC), donde se realiza el previo mecanizado de la pieza. A continuación, se adjunta una imagen representativa del funcionamiento de dicha herramienta.



Figura 2.- Herramienta de bruñido de puntas intercambiables en funcionamiento.

1.2. Objetivos del trabajo

1.2.1. Objetivo general

Este proyecto ha sido realizado con el objetivo de determinar los parámetros óptimos de funcionamiento de una herramienta de puntas intercambiables. Es decir, determinar aquellos parámetros que conlleven un mejor acabado superficial de una pieza previamente mecanizada y de superficie compleja. Dicha herramienta debe ser capaz de dar mejores, o iguales, resultados que un proceso de pulido manual.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar de forma experimental el comportamiento de la herramienta, sometiéndola a distintas condiciones de trabajo y comprobar que beneficios aporta el proceso a la pieza ensayada en función de dichas condiciones.
- Realizar distintos ensayos sobre piezas de superficie compleja y analizar los resultados obtenidos.
- Determinar los parámetros óptimos de funcionamiento de la herramienta en función de los resultados obtenidos en la fase experimental.
- Comparar los resultados obtenidos con los de otros investigadores que están trabajando en el mismo tema.

1.3. Alcance del trabajo

Como se ha comentado con anterioridad, este proyecto busca determinar los parámetros óptimos de funcionamiento de un prototipo funcional de una herramienta con puntas intercambiables con el objetivo de establecer las mejores condiciones de trabajo de dicha herramienta para cuando se trabaje con piezas de acero AISI 1045. Por ello, deberán realizarse distintos ensayos que permitan llegar a las conclusiones pertinentes.

1.4. Antecedentes

Al realizar una operación de mecanizado, ocasionalmente se obtienen valores de rugosidad superficial que no se ajustan a los deseados, valores que no son adecuados para las prestaciones que debe tener la pieza de trabajo. Esto es importante sobre todo cuando se está trabajando con piezas que requieren de un ajuste concreto entre ellas, como es el caso de componentes hidráulicos, o que requieren de características superficiales muy finas, como por ejemplo los moldes de inyección. Es ese caso, se

necesitan valores de rugosidad superficial muy bajos. Es por ello que existen varios procesos de acabado superficial que se pueden aplicar tras el mecanizado con el objetivo de reducir dicha rugosidad, como: el rectificado, el lapeado, el pulido o el bruñido, entre otros. Por el contrario, estas superficies suelen ser de geometría compleja y, por lo tanto, el rectificado convencional no puede usarse para dar un buen acabado a la pieza. Por ello, el proceso de bruñido (posteriormente descrito en el apartado *2.2.1 Proceso de Bruñido*) puede ser una buena solución al problema.

Para realizar dicha operación, es necesario disponer de la herramienta adecuada para cada geometría a mecanizar. Es decir, en caso de disponer de una pieza cuya superficie sea cónica, será necesario disponer de una herramienta específica para bruñir superficies cónicas. Es por ello que existen varios fabricantes que ofrecen la posibilidad de solicitar una herramienta concreta en función de la geometría que se desee bruñir.

1.5. Estado del arte

Con la intención de complementar el trabajo realizado y a modo de poder entender la evolución del proceso a realizar, se describen a continuación distintos artículos y trabajos relacionados con el actual proyecto que se han tenido como referencia.

1.5.1. Mejora del acabado superficial de superficies complejas

Como se ha mencionado con anterioridad, todo proceso de mecanizado aporta ciertas características superficiales a la pieza trabajada que, en muchos de los casos, es necesario mejorar debido a la finalidad de uso de dicho elemento. Por ello, deben tenerse en cuenta los distintos procesos de mejora del acabado superficial en piezas mecanizadas. Estos se dividen en dos grupos fundamentales: acabado por arranque de viruta y sin arranque de viruta, ambos descritos en el apartado *Mecanizado por arranque de viruta*, y se sub agrupan en los distintos tipos de acabado que se muestran en la **Figura 3**.

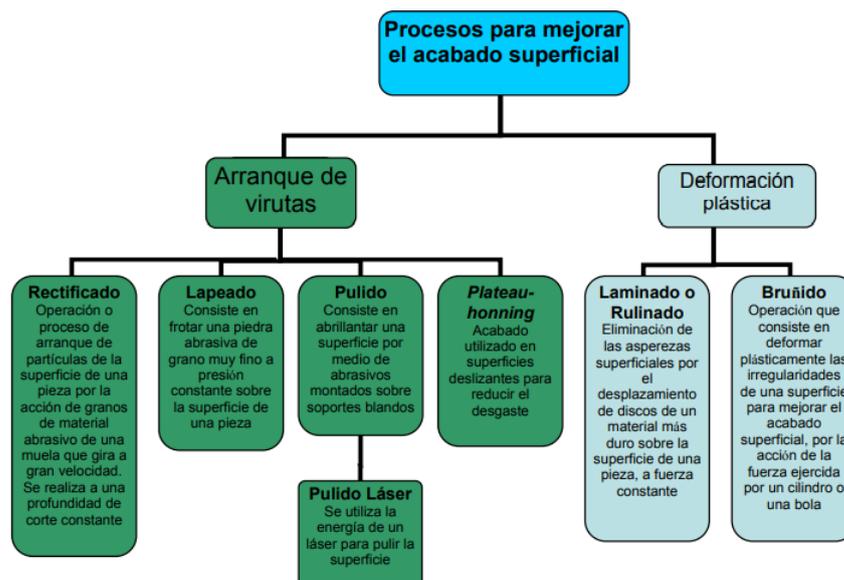


Figura 3.- Procesos más comúnmente usados para mejorar el acabado superficial de piezas mecanizadas. [2]

La mayoría de los procesos descritos en la figura anterior son fáciles de llevar a cabo cuando se trata de superficies con poca complejidad, como pueden ser las superficies planas o de revolución. En cuanto dicha condición cambia y debe realizarse el acabado a una pieza de inclinación variable o con pequeñas ranuras, estos procesos se ven muy limitados, por lo que en la mayoría de casos se opta por un pulido manual, algo mucho más lento y costoso.

Travieso Rodríguez et al [2], explica como varias empresas e investigadores han desarrollado aplicaciones para mejorar el acabado superficial en superficies complejas mediante la automatización del proceso de pulido con el fin de optimizar tiempo y coste.

Un ejemplo de ello es la empresa IDEKO la cual consiguió, a través del proyecto Amadeus, adaptar una de sus máquinas y desarrollar un dispositivo lijador capaz de trabajar según las condiciones de pulido necesarias dependiendo de la dirección del pliegue de la chapa a trabajar. Sin embargo, a pesar de obtener resultados acordes a los esperados, no se consideró que fuera aplicable a procesos reales, ya que se debían mejorar varios aspectos que no lograron perfeccionarse como, por ejemplo, la optimización del tiempo de pulido.

Por otro lado, como también menciona Travieso Rodríguez en su tesis, Eneko Ukar, investigador del departamento de Ingeniería Mecánica en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, en el año 2009, propone el pulido láser como proceso sustitutivo al pulido manual. Este es el proceso más usado en la mejora superficial de elementos no metálicos como, por ejemplo, lentes ópticas. Dicho proceso, consiste en fundir parte de los picos de la topografía superficial de la pieza mediante la fusión controlada de una capa microscópica de material con el objetivo de rellenar los valles y suavizar la superficie.

Actualmente, se está estudiando la aplicación de este proceso sobre superficies metálicas con reducciones de la rugosidad del orden del 85%, obteniendo valores finales de rugosidad por debajo de $1 \mu\text{m}$. De todos modos, aún se requiere de cierta experimentación previa para determinar las condiciones óptimas de trabajo en función del tipo de láser, material y rugosidad inicial, por lo que el uso de este proceso a nivel industrial aún es muy limitado.

1.5.2. Mejora del acabado superficial mediante el bruñido con bola

Teniendo en cuenta que la herramienta usada en este proyecto cumple una función similar al bruñido con bola, se hace una búsqueda bibliográfica en esta temática como punto de partida. Como se describe en la **Figura 3** adjunta con anterioridad y en el apartado *2.2.1 Proceso de Bruñido*, el bruñido es un proceso que consiste en deformar plásticamente la superficie del material a modo de reducir su rugosidad mediante la aplicación de fuerza sobre una bola o cilindro de entre 3-12mm. Esta se encuentra ligeramente suelta de modo que pueda bruñir la superficie mientras rota sobre sí misma.

Travieso Rodríguez et al [2], realiza en 2010 un estudio sobre la mejora de la calidad superficial mediante un proceso de deformación plástica, el bruñido con bola. En él, desarrolla una herramienta de bruñido y realiza varias pruebas sobre distintas probetas de acero (A) y aluminio (Al) con geometrías planas, cóncavas y convexas. Así pues, A. Travieso realiza un experimento de tipo factorial 2^3 , lo que consiste en combinar todas las variables presentes en el estudio entre sí y observar cómo influyen en el acabado superficial del elemento. Dichas variables son: paso lateral de la operación a realizar (p), la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta (t) y la velocidad de avance de la herramienta de bruñido (a).

Por lo que refiere a las piezas de superficie plana de (Al), se determina que el factor de peso es la velocidad de avance (V_a), ya que es la que aporta más variación de rugosidad superficial a la muestra en función de su valor. Del mismo modo se realiza el experimento en las muestras de (A), obteniendo resultados totalmente dispares a los obtenidos con la muestra anterior, llegando a la conclusión de que no se pueden tomar un mismo parámetro como bueno muestras de distinto material.

Por otro lado, de los experimentos realizados en superficies cóncavas y convexas se determina la influencia del radio de curvatura de la superficie, siendo favorable un menor radio de curvatura cuando se busquen rugosidades superficiales inferiores. En caso de tener superficies de alto radio, conviene realizar el proceso de bruñido perpendicular al previo fresado para reducir su efecto negativo.

Ramon Jerez Mesa, J. Antonio Travieso Rodríguez, Giovanni Gómez Gras y Jordi Llumà Fuentes et al [3], realizan un estudio y publican un artículo en Setiembre de 2018, Madrid, donde exponen los efectos del bruñido con bola acustoplástico sobre la integridad superficial de Ti-6Al-4V. En dicho estudio se realizan distintos experimentos sobre una superficie fresada con una herramienta de

bruñido que incorpora un actuador piezoeléctrico, este tiene la finalidad de transmitir vibraciones al proceso de bruñido a través de la misma herramienta generando el fenómeno conocido como efecto acustoplástico. De este modo, se diseñan varios experimentos y se analizan tres parámetros distintos: S_q , S_{sk} y S_{ku} . Los experimentos parten de superficies previamente mecanizadas con distintos pasos laterales (p) (véase **Figura 4**, donde: S01 presenta un paso lateral menor que S02, y S02 menor que S03), y se determina que: a mayor (p) inicial, más fuerza y pasadas deben llevarse a cabo para mejorar la superficie objetivo.

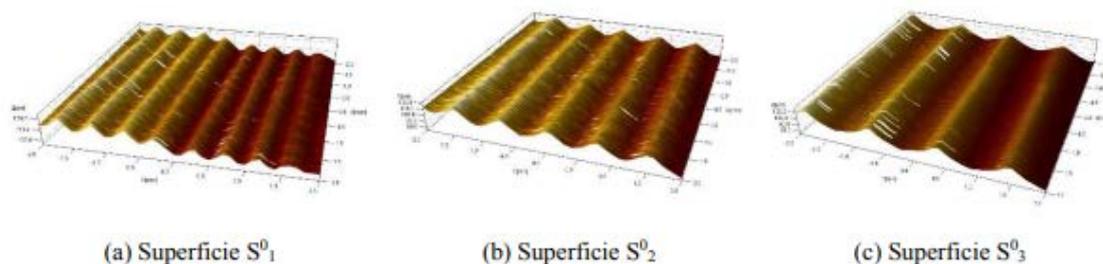


Figura 4.- Mapas de altura obtenidos por cromatografía 3D de las tres superficies originales consideradas en el estudio.[3]

Del mismo modo, se concluye que: S_q se ve claramente influenciada por la textura de partida de la superficie (**Figura 4**) y que, por lo tanto, un proceso asistido por vibraciones (VABB) será útil cuando se parta de una S_q inicial de $1,5 \mu\text{m}$, en otros casos no muestra gran diferencia a un proceso de bruñido con bola convencional no asistido (NVABB).

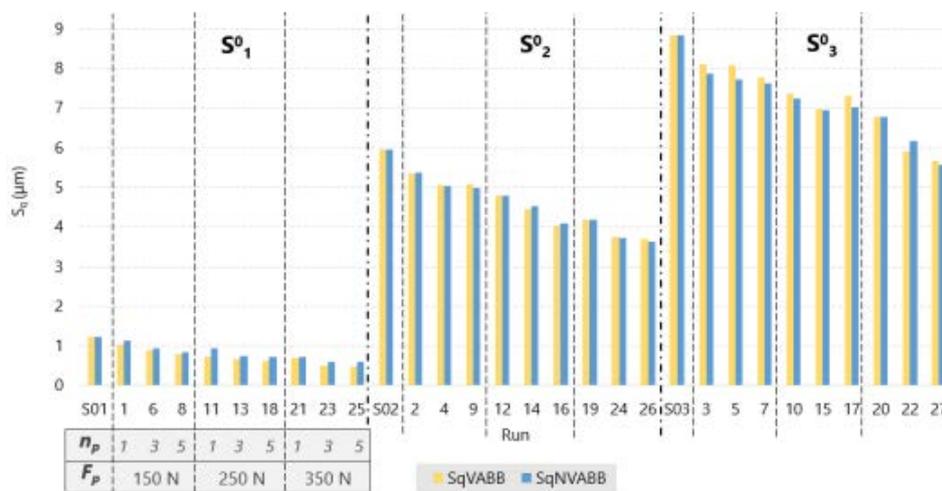


Figura 5.- Comparación de los valores de S_q para los procesos ejecutados con y sin vibraciones.[3]

1.5.3. Comparativa entre procesos de fabricación de súper-acabado

A continuación, se comparan los distintos procesos de fabricación de súper-acabado entre sí con la finalidad de remarcar los pros y contras de cada uno. Para su comparación, se han usado indicadores binarios del tipo Sí y No. Dichos indicadores se describen a continuación:

- **Máquina específica:** se trata de un indicador que establece si es necesario o no el uso de una máquina específica además del centro de mecanizado en la que se realiza la pieza. La necesidad de una máquina específica se considera como indicador negativo ya que limita la fabricación y implica un coste económico extra.
- **Programación CAM:** determina la necesidad de la preparación de un programa mediante herramientas CAM. Se considera un indicador positivo en caso afirmativo, ya que la necesidad de programación CAM implica que el mecanizado lo realizará la propia máquina y no habrá trabajo físico del operario reduciendo la fatiga de este.
- **Útiles específicos:** igual que en el caso de la máquina específica, la necesidad de útiles específicos implica que para poder lograr el acabado de la pieza hay que fabricar previamente útiles específicos tales como: electrodos de electroerosión, discos de rectificado específicos, etc. En caso afirmativo se considera un indicador negativo debido al coste económico y de tiempo adicional que supone.
- **Versatilidad de geometrías:** indicador que determina que con dicha tecnología pueden realizarse súper-acabados en piezas de casi cualquier geometría. En caso afirmativo se considera positivo.
- **Fatiga de operario:** indicador que muestra si en el proceso se ve involucrado un operario realizando esfuerzo físico. Se considera *Sí*, si el operario se ve obligado a realizar dicho esfuerzo por más de 2h.
- **Tiempo de mecanizado:** se trata de un indicador relativo y se muestra en forma cuantitativa. Este parámetro puede compararse en ciertos casos en los que la tecnología puede realizar la misma tarea, como en este caso. Se ha hecho una consideración sobre el tiempo que implica realizar una misma tarea en cada uno de los procesos.

Tabla 1.- Resumen de la comparación de procesos de super acabado.

Proceso	Máquina específica	Cambio de estacada	Programación CAM	Útiles específicos	Versatilidad de geometrías	Fatiga operario	Tiempo
Rectificado	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	++
EDM	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	+++
Lapeado	Sí	Sí	Sí	No	No	No	++++
Pulido manual	No	No	No	No	Sí	Sí	+++++
Bruñido	No	No	Sí	No	Sí	No	+

Así pues, como se muestra en la tabla adjunta, se puede escoger cada uno de los procesos en función de la optimización que quiera hacerse. Aun así, se puede destacar como mejor opción el bruñido, ya que no requiere de máquina y útiles específicos, ni de un operario que ejerza el trabajo manualmente. Este trabaja con un programa CAM que permite que la máquina realice todo el trabajo por si sola. A su vez, esto implica una reducción considerable de tiempo de trabajo, puesto que el mismo programa permite optimizarlo.

1.6. Metodología de trabajo

Para la realización de este proyecto ha sido necesario dividirlo en distintas etapas con la finalidad de cumplir con los objetivos establecidos con anterioridad. Se describen dichas etapas a continuación:

1.6.1. Fase 1: Estudio previo

- i. Búsqueda de información:
Como su nombre indica, esta primera fase consiste en realizar una búsqueda exhaustiva sobre el tema de estudio, lo que incluye la lectura de artículos y trabajos relacionados, en este caso, con las distintas técnicas de bruñido actuales.
- ii. Visualización de muestras ensayadas en los artículos estudiados:
En la que se han observado y estudiado las características iniciales y finales de las piezas ensayadas en los distintos artículos con el fin de definir el diseño de la que se parte en este proyecto.

1.6.2. Fase 2: Ideación

- i. Ideación y realización del croquis en CAD 3D de la pieza a la que, posteriormente, se le realizaran los ensayos.
- ii. Diseño de los ensayos iniciales a realizar sobre la pieza con el objetivo de encontrar los parámetros óptimos de la herramienta de trabajo.
- iii. Simulación previa de las estrategias de mecanizado a realizar sobre la pieza mediante el programa de diseño CAD/CAM llamado FUSION 360.
- iv. Replanteamiento de los ensayos iniciales en función de los resultados obtenidos tras el análisis de la primera tanda de resultados del primer diseño.

1.6.3. Fase 3: Experimentación

- i. Puesta en marcha de la herramienta: realización de la curva de calibración.
- ii. Mecanizado de desbaste previo de la pieza en bruto para su posterior bruñido.

- iii. Mecanizado de acabado de las distintas muestras siguiendo las estrategias fijadas con anterioridad.
- iv. Comprobación de la calidad superficial de las muestras a ojo para certificar si es necesario repetir el proceso o si se ha realizado con éxito.
- v. Análisis superficial de las muestras con el rugosímetro óptico/de contacto para evaluar la calidad superficial en función de los parámetros base.
- vi. Análisis de los resultados obtenidos.

2. Aspectos teóricos

2.1. Conocimientos previos

Con el objetivo de poder comprender el desarrollo del proyecto, se exponen los siguientes conceptos teóricos.

2.1.1. Teoría de mecanizado

El conjunto de procesos industriales (corte, marcado, agujereado, etc.) con los que, a partir de una pieza de materia prima y mediante la reducción del material sobrante de forma controlada, se obtiene una pieza con una forma y tamaño final específico recibe el nombre de “mecanizado”. Por lo general, dicha acción se realiza en un centro de mecanizado, una máquina capaz de realizar todas las operaciones tecnológicas necesarias y que dispone de un sistema automático para el cambio de herramientas, hecho que facilita el conjunto del proceso y proporciona mejores acabados en la pieza. Un claro ejemplo es el centro de mecanizado CNC (*Computer Numerical Control*), el cual permite controlar la posición exacta del elemento a mecanizar mediante el uso de una computadora. En él, se encuentran varios elementos que facilitan el proceso de mecanizado:

- **Bancada:** es una estructura fija en la que se disponen los distintos elementos que forman el centro de mecanizado.
- **Guías:** son las que permiten el movimiento de la herramienta o pieza en distintos ejes (generalmente X, Y, Z). Por lo general, los ejes X e Y se ajustan mediante el movimiento de la pieza, mientras que el eje Z se gestiona mediante el desplazamiento de la herramienta.
- **Accionamientos:** generalmente formados por motores eléctricos y mecanismos que sirven para transmitir el movimiento de accionamiento a los elementos móviles. En un centro de mecanizado CNC, los accionamientos vendrían dados por la señal emitida desde el ordenador asociado a este.
- **Elementos de sujeción:** los elementos de sujeción permiten la unión sólida entre la pieza a mecanizar y la máquina, y de la herramienta y la máquina, como es el caso del porta herramientas.
- **Instalación de refrigeración y lubricación:** es la que se encarga de mantener lubricado y a una temperatura adecuada el proceso de mecanizado. En muchos casos este sistema está

automatizado, como en el caso del CNC, en otros es necesario añadir el lubricante manualmente antes de iniciar el proceso.

Para un correcto mecanizado se requieren de planos e indicaciones que hagan referencia tanto a las dimensiones como a las características superficiales finales del elemento, de modo que el operario a cargo sea capaz de dar las indicaciones necesarias a la máquina. Es por ello que se suele trabajar con programas de diseño CAD/CAM.

Las siglas CAD hacen referencia a las palabras *Computer Aided Design* (o diseño asistido por ordenador), y se trata de una herramienta informática que permite generar diseños tanto en dos dimensiones (planos) como en tres (piezas y ensamblajes). Por otro lado, las siglas CAM hacen referencia a *Computer Aided Machining* (o mecanizado asistido por ordenador), que se utiliza para generar el código asociado a la pieza 3D realizada con la herramienta CAD. Esto permite al centro de mecanizado CNC seguir las trayectorias y movimientos necesarios para la creación de dicho elemento.

2.1.1.1. Mecanizado por arranque de viruta

Como se ha podido ver en apartados anteriores, existen muchos tipos de mecanizado en función del acabado que quiera dejarse en la pieza a trabajar. Estos, pueden dividirse en dos grupos: procesos con arranque de viruta y procesos sin arranque de viruta (también conocido como deformación plástica).

Los procesos con arranque de viruta son aquellos en los que el material excedente es arrancado o cortado por el filo de la herramienta dando lugar a un desperdicio. En este tipo de mecanizado se pueden realizar dos procesos: el desbaste, donde el objetivo principal es reducir la mayor parte del material sobrante sin importar la precisión de su acabado, y el acabado, cuya finalidad es dar el acabado superficial que se requiera para cada superficie. Dichos procesos pueden realizarse mediante trabajo manual o con la ayuda de maquinaria específica como: torno, fresadora, taladro, etc. Del mismo modo, no todas las herramientas pueden realizar este tipo de mecanizado, ya que, como bien se ha comentado, es necesario que se disponga de filos que corten el material no deseado. Un claro ejemplo de herramientas usadas para un proceso con arranque de viruta son: la fresa, una broca, un escariador o una muela (véase **Figura 6**). [4]



Figura 6.- Ejemplo de una herramienta de fresa con plaquitas hexagonales en funcionamiento.[5]

Una ventaja clara de este tipo de mecanizado es que se pueden obtener superficies con un amplio rango de tolerancias. Por otro lado, se debe tener en cuenta que un proceso por arranque de viruta conlleva cierta pérdida de material que no podrá recuperarse, lo que, a su vez, conlleva pérdidas económicas.

Por otro lado, se deben tener en cuenta varios parámetros de mecanizado en función del acabado que se busque obtener en la pieza. Existen tres tipos de movimientos a tener en cuenta:

- **Movimiento de corte (V_c):** se define como la velocidad relativa de la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte. Normalmente, se mide en metros por minuto (m/min). Se debe tener en cuenta que no cualquier velocidad es buena, una velocidad demasiado baja influye negativamente en la productividad, mientras que una demasiado alta provoca un desgaste rápido de la herramienta.

La velocidad óptima de trabajo se obtiene de modo experimental y viene dada por el fabricante de la herramienta, indicando valores orientativos para cada material a trabajar. A partir de este dato, (V_c) se calcula como las revoluciones por minuto (n en r.p.m) a las que debe girar la pieza o la herramienta, según sea el proceso, con la siguiente relación [6]:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} [m/min] \quad (Eq. 1)$$

Donde: V_c = velocidad de corte en m/min
 d = diámetro de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado) en mm
 n = revoluciones de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado) en un minuto (r.p.m)

- **Movimiento de avance (V_a):** este hace posible el arranque de viruta continuo. El avance (a) es el camino recorrido por la herramienta por cada revolución o carrera y se expresa en (mm). Conociendo la velocidad de giro (n en r.p.m) y el avance (a en mm), se calcula la velocidad de avance (V_a), expresada en (mm/min), como:

$$V_a = n \cdot a \text{ [mm/min]} \quad (\text{Eq. 2})$$

- **Movimiento de penetración (p):** también conocida como profundidad de pasada, es la distancia que penetra la herramienta en la pieza, la que determina el grosor de la viruta arrancada y se expresa siempre en (mm).

A continuación, se muestra una imagen donde se pueden ver distintos procesos de mecanizado por arranque de viruta con sus respectivos movimientos de corte mencionados con anterioridad.

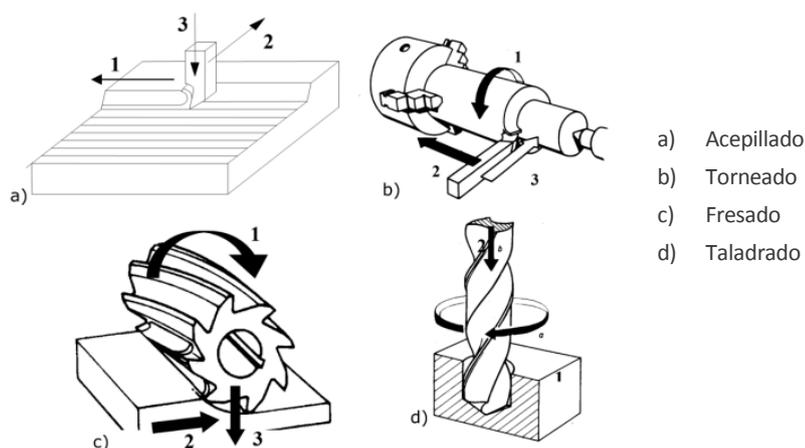


Figura 7.- Movimientos durante el proceso de arranque de viruta. 1) Movimiento de corte, 2) Movimiento de avance, 3) Movimiento de penetración.[6]

Así pues, deberán escogerse correctamente los distintos valores para cada uno de los parámetros a modo de obtener buenos resultados en la pieza trabajada.

Por último, debe tenerse en cuenta que el modo de funcionamiento principal de este tipo de procesos es el arranque de material mediante los filos o cuchillas de la herramienta de trabajo. Con lo cual, sabiendo que los filos tienen cierto ángulo de trabajo, debe tenerse en cuenta que se produce un aumento de la temperatura en la zona de trabajo de la pieza debido al rozamiento de dichos filos con la superficie. Esto, junto con la presión ejercida por la herramienta, hace que se genere una capa de “soldadura” en el extremo del filo (pequeños puntos de material caliente adheridos en el borde de la cuchilla de la herramienta) que, con el paso del tiempo y uso, conllevan un empeoramiento en el acabado superficial de la pieza. Este tipo de rozamiento se conoce como rozamiento por adherencia y se produce con grandes esfuerzos normales sobre el filo.

Por otro lado, el calor que se genera durante el proceso puede afectar seriamente al rendimiento de la herramienta y, como en el caso anterior, a la calidad de la pieza. Generalmente, las temperaturas más elevadas se alcanzan en la superficie de desprendimiento de la herramienta (zonas cercanas al filo), es por ello que es necesario analizar que ángulo y velocidad de corte será la más adecuada para cada tipo de pieza. En cualquier caso, es deseable que la mayor parte del calor generado en el proceso sea disipada por la viruta, ya que este no afectará ni a la herramienta ni a la propia pieza.

Es por ello que existen varios medios para disminuir las altas temperaturas a las que se trabaja, como aumentar la sección de corte de la herramienta. Aunque, en la mayoría de ocasiones, es necesario usar algún tipo de lubricante y/o refrigerante mientras se realizan los distintos procesos. Un ejemplo común es el uso de taladrina, una emulsión de agua y aceite.

2.1.1.2. Mecanizado sin arranque de viruta

Por lo contrario, el mecanizado o conformado sin arranque de viruta es un proceso de manufactura donde la pieza final se obtiene sin desprender ninguna partícula de material. Estos procesos se fundamentan en la deformación plástica del material mediante la aplicación de presión y calor, ya sea mediante golpes, rodillos o a través de un troquel. Con este tipo de mecanizado se obtienen piezas con las dimensiones y acabados deseados, aun así, estos siempre tendrán mayores limitaciones en cuanto a la obtención de dimensiones finales que no en el caso de los conformados por arranque de viruta.

Actualmente, casi todas las piezas metálicas destinadas a la fabricación en industrias han estado sometidas, por lo menos, a un proceso de mecanizado sin arranque de viruta. Un claro ejemplo son los tubos de acero en los que es necesario laminar una chapa de acero en caliente, luego laminarla en frío, cortarla, darle forma de tubo mediante rodillos y, posteriormente, soldarla.

Existen varios tipos de conformado sin arranque de viruta, entre los que se encuentran [7]:

- **Forjado:** consiste en la deformación plástica de un material mediante la aplicación de fuerzas de compresión localizada, es decir, golpes, con un martillo. Dicho proceso puede hacerse en frío o caliente y las piezas que se obtienen generalmente necesitan de un procesado adicional (como un mecanizado por arranque de viruta) para lograr un resultado más ajustado a los exigentes requisitos del mercado.
- **Laminado:** se trata de un proceso de deformación plástica, donde el material es introducido entre uno o más pares de rodillos que giran en sentidos opuestos con el objetivo de reducir el espesor de la chapa inicial y uniformarlo. Este tipo de proceso puede llevarse a cabo tanto en frío como en caliente.

- **Extrusión:** igual que en el caso del laminado, consiste en deformar plásticamente el material, en este caso, haciéndolo fluir a través de un troquel con una sección transversal definida y fija (véase **Figura 8**). De este modo se logran obtener formas bastante complejas. El proceso de extrusión, a diferencia de los anteriores, generalmente se realiza en caliente.

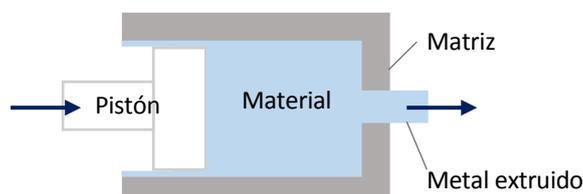


Figura 8.- Dibujo esquemático del proceso de extrusión.

Así pues, un proceso de mecanizado sin arranque de virutas tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Si lo comparamos con un proceso por arranque de viruta, se podría decir que este es un proceso más ecológico y económico, ya que se aprovecha la totalidad del material, sin desperdiciarlo en forma de viruta, como es el caso del conformado descrito con anterioridad. Además, los procesos sin arranque de viruta, suelen llevar menos tiempo de fabricación debido a que son menos complejos, por lo que suelen ser procesos mucho más productivos. Sin embargo, si lo que se quiere es obtener una pieza con dimensiones finales precisas, será necesario un segundo procesado, preferiblemente con arranque de viruta para cumplir con las especificaciones más exigentes.

2.1.2. Propiedades superficiales

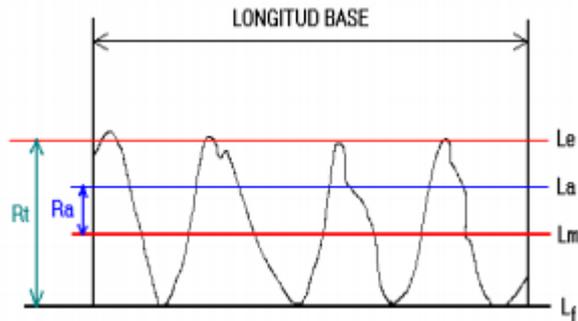
Todo proceso de fabricación lleva asociado unas propiedades superficiales finales en la pieza mecanizada como, por ejemplo, la rugosidad o calidad superficial. Se define como “rugosidad” las micro irregularidades producidas sobre la superficie de una pieza tras la acción de haber sido transformadas a través de cualquier proceso de fabricación. Para evaluar dichas irregularidades se suele usar un rugosímetro, un equipo que realiza un seguimiento del perfil mediante una punta fina denominada palpador y que traduce las variaciones de altura de la superficie en señales eléctricas que se registran y procesan en una unidad de control. Ello, permiten calcular los distintos parámetros de rugosidad.

Existen dos tipos de parámetros superficiales a tener en cuenta: parámetros de amplitud, que vienen representados con la letra *R* (como R_a , R_z , R_q , etc), y parámetros de espacio, a los que se representa con la letra *S* (como S_a , S_z , S_q , etc).

2.1.2.1. Parámetros de amplitud

Así pues, para este proyecto, se destacan tres parámetros de rugosidad fundamentales:

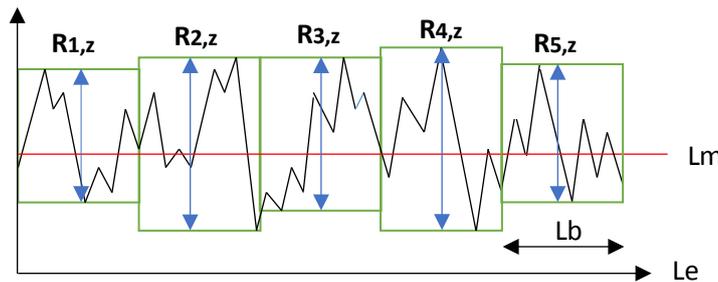
- Rugosidad superficial media aritmética (Ra):** se calcula como la suma de los valores absolutos de las áreas generadas al dividir el perfil de muestreo con la recta L_m , dividido por la longitud base (lb).[8]



$$R_a = \frac{1}{lb} \cdot \sum_0^{lb} |Z(x)| \quad (Eq. 3)$$

Figura 9.- Representación gráfica de Ra. [8]

- Máxima altura del perfil en la longitud base (Rz):** se conoce como la media aritmética de los valores absolutos entre los cinco picos más altos y cinco valles más profundos del *cut-off*. [9]



$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^{i=5} R_{i,z} \quad (Eq. 4)$$

Figura 10.- Representación gráfica de Rz.

- Rugosidad media cuadrática (Rq o RMS):** también recibe el nombre de desviación media cuadrática y se define como el promedio cuadrático de las desviaciones del perfil de rugosidad des de la línea media a lo largo de la longitud de evaluación. Rq complementa al valor de Ra, siendo uno de los parámetros más usados y facilitando el manejo estadístico obteniendo resultados estables [8]. Se define como:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx} \quad (Eq. 5)$$

- Distribución de alturas. Asimetría (Rsk):** este parámetro hace referencia a la distribución de alturas y se define como el cociente del valor medio cúbico de $Z(x)$ y el cubo de Rq dentro de la longitud de muestreo (véase ecuación adjunta).[10]

$$R_{sk} = \frac{1}{Rq^3} \left(\frac{1}{lm} \int_0^{lm} Z^3(x) dx \right) \quad (Eq. 6)$$

Pudiendo tomar los siguientes valores

- $R_{sk} = 0$: indica simetría frente la línea media y una distribución normal de los valores.
- $R_{sk} > 0$: Desviación por debajo de la línea media.
- $R_{sk} < 0$: Desviación por encima de la línea media.

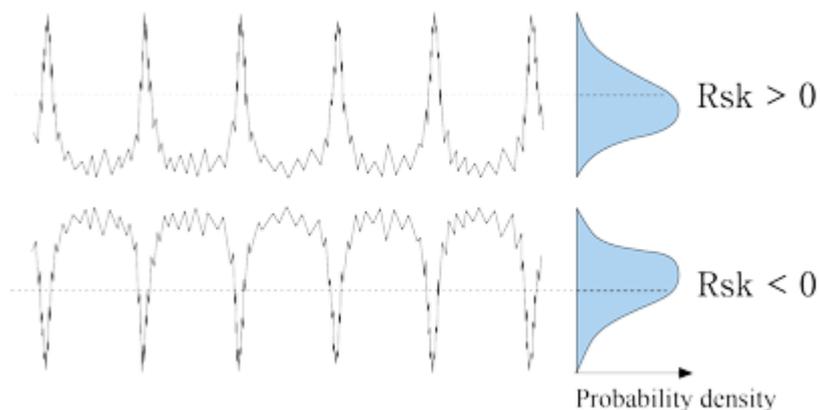


Figura 11.- Distribución del parámetro de asimetría R_{sk} .

En este caso, siempre se busca la simetría y, por lo tanto, valores de R_{sk} aproximados a 0.

- **Kurtosis (R_{ku}):** este parámetro está asociado a la geometría de picos y valles. Se define como el cociente medio cuadrático de $Z(x)$ y la cuarta potencia de Rq en una longitud de muestreo (véase ecuación adjunta).[10]

$$R_{sk} = \frac{1}{Rq^4} \left(\frac{1}{lm} \int_0^{lm} Z^4(x) dx \right) \quad (Eq. 7)$$

Pudiendo tomar los siguientes valores

- $R_{sk} = 3$: indica simetría frente la línea media y una distribución normal de los valores.
- $R_{sk} > 3$: Distribución de altura nítida.
- $R_{sk} < 3$: Distribución de altura uniforme.

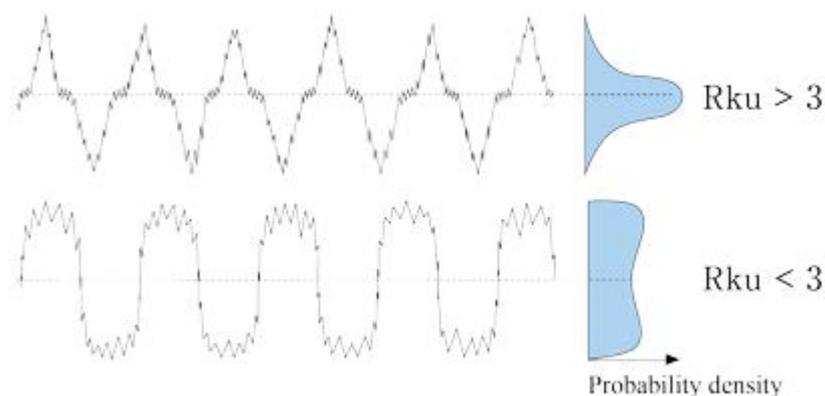


Figura 12.- Distribución del parámetro de distribución de alturas Rku .

2.1.2.2. Parámetros de superficie

Los parámetros de superficie se representan con la letra S y un sub índice que indica que tipo de información proporciona. Dichos parámetros son una representación en 2D de las características estadísticas de la distribución de altura de una superficie, la escala de sus irregularidades y los puntos extremos que esta presenta. De los posibles parámetros S , para este proyecto se distinguen los siguientes:

- **Desviación media cuadrática de los puntos del mapa de alturas (S_q):** también conocida como *altura media al cuadrado*, es un parámetro que da una idea de la magnitud o escala de la superficie de alturas, de modo que un valor menor indica que la superficie está formada por puntos de menor separación relativa en alturas. S_q viene definida por la siguiente ecuación:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^2(x_i, y_j)} \quad (Eq. 8)$$

- **Desviación media aritmética de los puntos del mapa de alturas (S_a):** del mismo modo que S_q , S_a es un parámetro que informa sobre la magnitud de la superficie de alturas, indicando menor separación entre alturas a mayor valor de S_a . Puede calcularse como:

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |\eta(x_i, y_j)| \quad (Eq. 9)$$

- **Desviación de máxima altura en la longitud base del mapa del perfil (S_z o S_{10z}):** es un parámetro que muestra la diferencia entre los 10 picos más altos y más profundos a lo largo de la longitud de evaluación. Representa la amplitud de las máximas desviaciones y puede calcularse como:

$$S_z = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 |\eta_{si}| + \sum_{i=1}^5 |\eta_{vi}| \quad (\text{Eq. 10})$$

- **Skewness (Ssk) y kurtosis (Sku) de los puntos del perfil:** son parámetros estadísticos que describen la forma de la distribución de alturas de la superficie. Por lo general, igual que en el caso de Rsk y Rku se toman valores Gaussianos como referencia, donde $S_{sk}=0$ y $S_{ku}=3$, de modo que valores de *skewness* inferiores al valor 0 establecido describen superficies con supremacía de picos (puntos de cota positiva), mientras que valores de *kurtosis* inferior a 3 representa superficies poco abruptas.

$$S_{sk} = \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^3(x_i, y_j) \quad (\text{Eq. 11})$$

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \eta^4(x_i, y_j) \quad (\text{Eq. 12})$$

2.1.3. Rugosímetro

La rugosidad de una superficie se determina mediante técnicas que exploran la superficie de una pieza y obtienen perfiles 2D o representaciones 3D. Existen varias técnicas microscópicas que sirven para obtener la calidad superficial de un elemento, como la microscopía eléctrica de barrido (SEM), microscopía de fuerza atómica (AFM) y la de efecto túnel (STM), aunque la más usada es mediante el uso de un rugosímetro, ya que, a diferencia del resto, se caracteriza por ser un ensayo no destructivo aunque requiere de equipamiento algo más sofisticado y de coste más elevado. [11]

Existen dos tipos de rugosímetros: de contacto (perfilómetro) y de no contacto (óptico), y en cada uno de ellos deberán establecerse parámetros de medida iniciales para poder proceder correctamente al análisis superficial del elemento.

En este proyecto, debido a la complejidad de la superficie a tratar, se han usado ambos tipos de perfilómetro. El de contacto para las superficies con pendiente pronunciada y el óptico para las planas.

- **Rugosímetro de contacto o perfilómetro**

Dentro de los rugosímetros de contacto se encuentran los perfilómetros. En ellos, una fina punta (palpador) es la encargada de recorrer la superficie a analizar controlando la velocidad de desplazamiento y transformando las variaciones de altura que va detectando en impulsos eléctricos que son registrados gráficamente en el aparato de lectura, dando lugar a un perfil de rugosidad en dos dimensiones. Por ello, el diámetro del palpador es el que determina la sensibilidad de las medidas, no pudiendo medir rugosidades de diámetro inferior al de la punta.

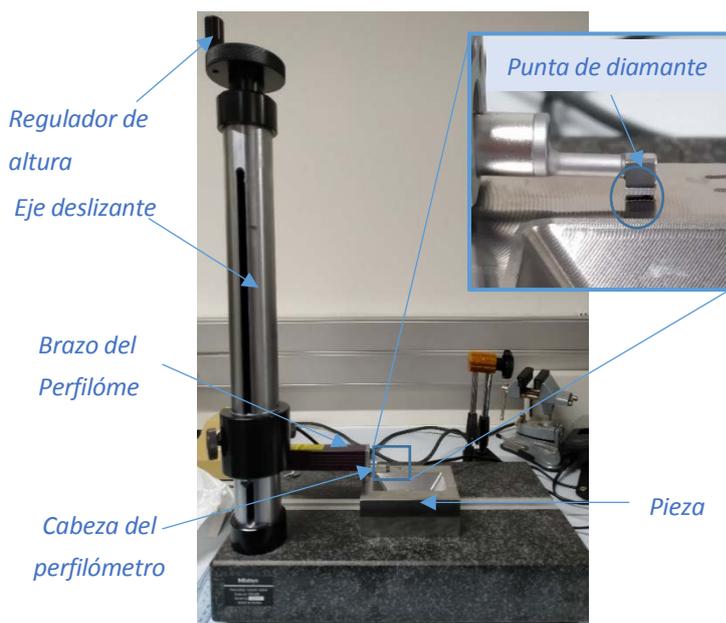


Figura 13.-Perfilómetro montado preparado para la medición de la muestra.

Otro aspecto importante a tener en cuenta cuando se trabaja con un perfilómetro es la carga o presión que el palpador ejerce sobre la superficie, ya que puede inducir cierta deformación plástica si se aplica una carga superior a la que soporta el material con el que se esté trabajando. Esto es un caso poco común cuando se trata con materiales del tipo acero o hierro. Del mismo modo, si la superficie a analizar no se encuentra del todo en estado horizontal (simulando una superficie plana), puede producirse la pérdida de contacto del palpador con la superficie durante su desplazamiento y, por lo tanto, la pérdida de puntos de interés en la medida, mostrándose en forma de aviso en la pantalla del perfilómetro.

Así pues, como se ha comentado con anterioridad, dependiendo del tipo de rugosímetro que se esté usando, deberán establecerse unos parámetros iniciales para poder realizar correctamente la medida. En este caso, cuando se trabaja con un rugosímetro de contacto, debe establecerse previamente la longitud base o “Cut-off” (l_b o λ_c) frente a la longitud de evaluación (l_e). La longitud de evaluación describe la distancia total de muestreo, mientras que la longitud base o “Cut-off” se refiere a la distancia parcial a partir de la cual se calculan los valores de rugosidad. Por lo general, los valores de *cut-off* oscilan entre 0,08 - 2,5 mm en función de la medida de rugosidad obtenida a lo largo de la longitud de evaluación. [8]

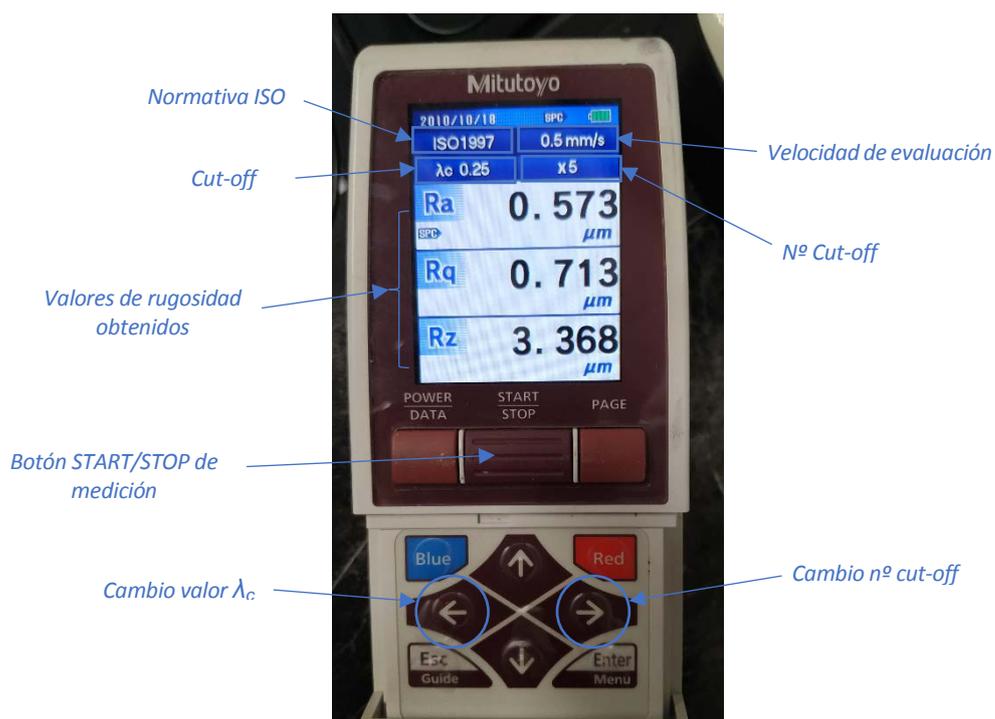


Figura 14.-Partes del perfilómetro usado para la medida de las muestras.

Se puede obtener el valor de (λ_c) en función de la longitud de evaluación y el número de *cut-off* (número de veces en la que se dividirá la medida) siguiendo la ecuación descrita a continuación. Dicho número tomará siempre un valor igual a 5.

$$\lambda_c = \frac{le}{n^{\circ} \text{ cut - off}} \rightarrow \lambda_c = \frac{le}{5} \quad (\text{Eq. 13})$$

A continuación, se muestran los valores de (λ_c) a establecer en función de la rugosidad de la superficie (R_a) medida en la superficie y de la longitud de evaluación (l_e).

Tabla 2.- Valores de Cut-off en función de la rugosidad medida.

Ra (μm)	le (mm)	λ_c (mm)
< 0,02	0,4	0,08
0,02 – 1	1,25	0,25
1 – 2	4	0,8
2 – 10	12,5	2,5

Para todas las medidas de rugosidad se ha seguido la normativa ISO 4287.

- **Rugosímetro óptico**

Por otro lado, los rugosímetros ópticos se caracterizan por no necesitar contacto directo con la superficie a estudiar a medida que se realizan las mediciones ya que emite un rayo de luz

láser para medir las irregularidades de esta. Se podría decir que su funcionamiento es similar al de un telémetro común, que emite el rayo de luz sobre la superficie y mide el tiempo que tarda en volver. El cabezal es el encargado de emitir dicha luz.

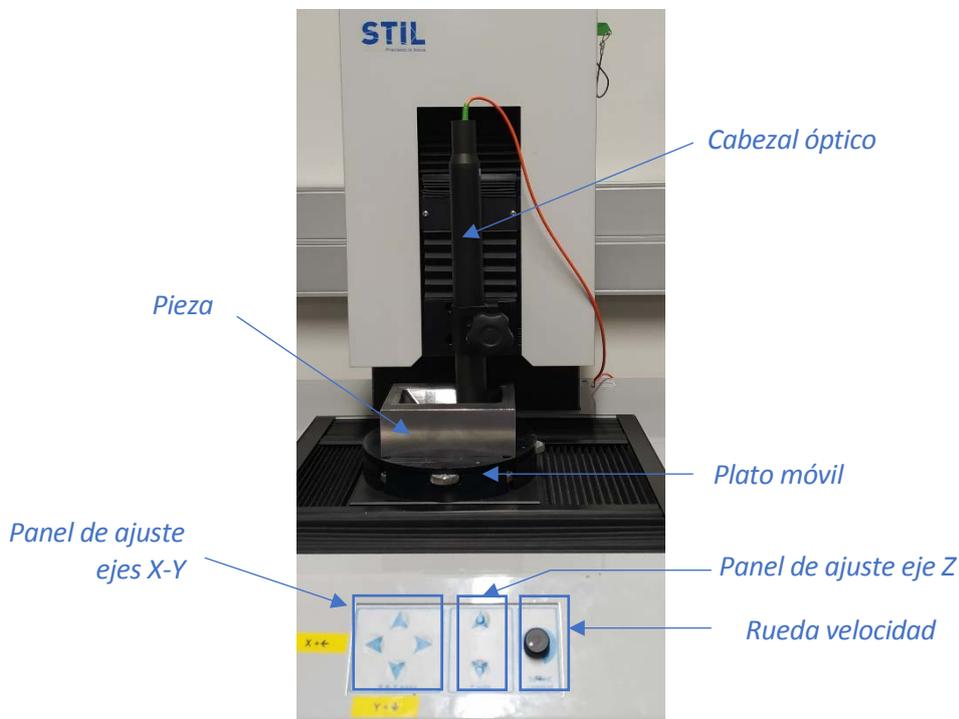


Figura 15.- Partes del rugosímetro óptico usado para la medición de las muestras.

Como se observa en la figura anterior, el rugosímetro óptico consta de distintas partes que permiten poder hacer una medición mucho más ajustada de la calidad superficial del objeto.

Por un lado, el cabezal óptico es el encargado de emitir el rayo de luz hasta la superficie y de medir el tiempo de retorno de esta, este puede regularse mediante los botones referentes al eje Z, pudiendo ajustar su altura en referencia a la pieza.

Por otro lado, el plato móvil es el encargado de permitir el movimiento de la pieza en los ejes X e Y, permitiendo seleccionar correctamente la sección a analizar. El movimiento se activa, igual que en el caso del cabezal, con el panel de ajuste referente a dichos ejes.

Por último, el rugosímetro óptico dispone de una rueda de regulación de la velocidad, siendo recomendable usar velocidades altas para hacer movimientos bruscos cuando se esté a distancias lejanas de la superficie a evaluar, y velocidades lentas cuando se esté cerca.

En este caso, el rugosímetro óptico va vinculado a un ordenador que dispone del programa adecuado por el cual se establecerán los parámetros iniciales y por el que podrá verse el perfil

evaluado. La ventaja de este tipo de rugosímetro es que te permite obtener una representación 3D de la superficie medida.

Igual que en el caso del perfilómetro, la superficie a evaluar debe estar lo más plana posible de modo que no pierda el enfoque y no se pierdan puntos en el análisis.

Para iniciar la medida, primero deberá ajustarse correctamente la distancia del cabezal óptico en referencia a la pieza mediante el uso del panel de ajuste y, posteriormente, predeterminar las longitudes de medición (eje de movimiento rápido y lento, y longitudes de evaluación y *step*) que se quieren usar durante la toma de datos dentro del programa.

2.2. Descripción del proceso de estudio

2.2.1. Proceso de Bruñido

Se define pues el proceso de **bruñido** como una operación tecnológica que se aplica tras el mecanizado y que tiene como objetivo mejorar el acabado superficial de una pieza mediante la deformación plástica de la superficie. Reduciendo las irregularidades presentes en ella y provocando, a su vez, una reducción de la rugosidad superficial de esta (véase la **Figura 16** a modo ejemplo). Dicho proceso puede aplicarse tanto en superficies planas como en superficies de geometría compleja, como es el caso de estudio de este proyecto.

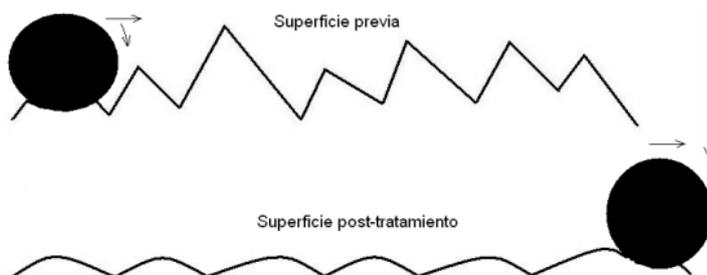


Figura 16.- Esquema representativo del proceso de deformación plástica de las crestas de las irregularidades de una superficie mecanizada. [2]

En la **Figura 16**, se muestran dos imágenes. En la parte superior se muestra la superficie previa al acabado superficial, es decir, la superficie obtenida tras el proceso de mecanizado por arranque de viruta. Como se puede observar, cuando se trata de un proceso de este tipo, siempre se obtienen superficies con crestas marcadas provocadas por las plaquitas o filos de la herramienta de trabajo. Por otro lado, en la parte inferior de la figura se puede ver el acabado por deformación plástica, donde se

suavizan las crestas provocadas por la herramienta anterior, mejorando la rugosidad superficial del elemento.

Así pues, si se quiere trabajar con el proceso de bruñido, es necesario conocer muy bien las características tanto del material a deformar plásticamente como del acabado superficial que se quiere obtener. Esto se verá influenciado por diferentes parámetros: la fuerza que se le aplique a la bola, la velocidad de avance de la herramienta, el paso lateral y/o la estrategia de mecanizado. Cada uno combinado correctamente puede aportar una gran diferencia entre acabados obteniendo mejores o peores valores de rugosidad. Por lo que seguir un correcto procedimiento para el bruñido puede marcar la diferencia entre obtener, o no, los resultados deseados, provocando daños irreversibles en la pieza que conllevan el descarte del elemento y, en consecuencia, pérdida de tiempo y dinero.

2.2.2. Procedimiento para el bruñido de superficies complejas

En el caso del bruñido de superficies complejas como moldes y matrices, el objetivo es obtener un acabado superficial igual o mejor al que se obtiene mediante el pulido manual. Dicho acabado suele dejar superficies con un nivel de rugosidad muy bajo, lo que, a su vez, aporta mayor calidad superficial y duración del elemento. Por ello, como se ha comentado anteriormente, seguir un correcto procedimiento de bruñido puede marcar la diferencia entre obtener, o no, las características superficiales deseadas.

Este procedimiento consta de las siguientes etapas:

1. **Realización de la curva de calibración de la herramienta:** es necesario que toda herramienta que vaya a usarse haya pasado previamente por esta primera fase en la que se determina su precarga. Esto permite traducir la fuerza aplicada sobre la herramienta a desplazamiento del muelle interior a partir de la ley de Hooke (**Eq. 12**)

$$F_m = k \cdot x_1 + F_0 \quad (\text{Eq. 14})$$

Donde x_1 representa el desplazamiento total del muelle, F_0 es la precarga del mismo y k su constante. Con lo que, una vez medida la precarga del muelle, sabiendo los otros dos factores, se puede obtener la fuerza real con la que se bruñirá la superficie [12].

2. **Preparación del CAM de la pieza a mecanizar:** tras calibrar la herramienta, debe realizarse el diseño CAM del primer mecanizado de la pieza. En esta segunda fase, la calidad superficial de la pieza será alta, por ello debe realizarse el siguiente paso.
3. **Preparación del CAM de bruñido:** este segundo CAM permite definir la estrategia con la que se realizará el bruñido de la pieza, reduciendo la rugosidad hasta el nivel deseado. Según la estrategia que se escoja se obtendrán mejores o peores resultados

4. **Detección del “cero” pieza:** consiste en detectar los límites de mecanizado de la pieza a trabajar. Esto se hace con la ayuda de un elemento llamado “bailarina” el cual está formado por dos cilindros macizos concéntricos, en cuanto la parte inferior detecta colisión, se pierde la concentricidad haciendo ver al operario que ha tocado uno de los límites. Se repite el proceso para cada eje (X e Y). Véase **Figura 17**.

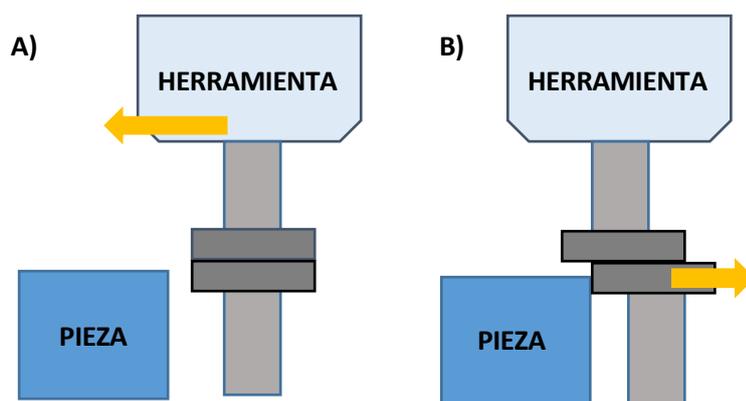


Figura 17.- (A) Bailarina en estado original, (B) Bailarina tras detectar colisión con la pieza.

5. **Mecanizado previo de la pieza:** en este primer proceso de mecanizado debe dejarse un excedente de material en el elemento para el siguiente proceso de súper-acabado. Generalmente se hará uso de una o varias herramientas hasta llegar a las dimensiones finales, generalmente se hará uso de una herramienta de corte tipo fresa de bola.
6. **Mecanizado de súper-acabado:** en esta fase se acaba de reducir el material sobrante mediante la herramienta de bruñido correspondiente. A diferencia de la fase anterior, en este caso no se corta material, sino que se presiona, como se ha comentado en puntos anteriores.
7. **Inspección visual de la zona bruñida:** para comprobar que no haya rayaduras a simple vista que puedan alterar notablemente los resultados. En caso afirmativo, puede repetirse el proceso de súper-acabado para acabar de perfeccionar la superficie en cuestión.
8. **Inspección con Rugosímetro:** donde, finalmente, se mide la rugosidad superficial de la pieza mecanizada y se determina su calidad.

2.3. Descripción de la herramienta usada

Como se ha comentado con anterioridad, la herramienta que se ha usado en este proyecto es muy similar a una herramienta de bruñido con bola común, con la única diferencia que, en vez de disponer

de una bola con cierto movimiento de rotación en la punta, se compone por una fina barra acabada en punta redondeada. Dicha herramienta está compuesta por un cuerpo principal que, junto con una serie de piezas internas y elementos acoplados en su exterior, conforman el circuito hidráulico de funcionamiento de la misma como se muestra en la siguiente figura.

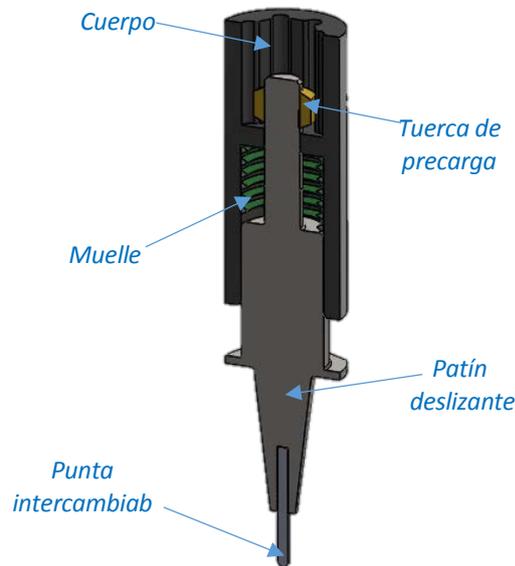


Figura 18.- Vista de sección del conjunto de la herramienta de puntas intercambiables.

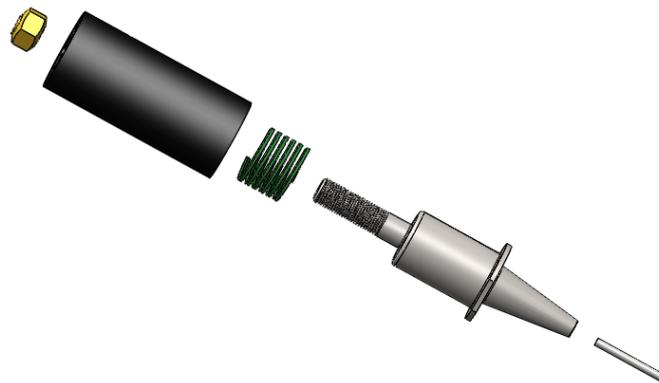


Figura 19.- Vista explosionada del conjunto de la herramienta de puntas intercambiables.

2.3.1. Partes de la herramienta

De este modo, la herramienta consta de cinco partes distintas: dos de las cuales (muelle y tuerca de precarga) son elementos estandarizados y tres (cuerpo, patín deslizante y punta intercambiable) son elementos específicamente diseñados y fabricados para este nuevo tipo de herramienta. A continuación, se describen cada una de las partes mencionadas con anterioridad.

2.3.1.1. Cuerpo

El cuerpo (**Figura 20**) es el encargado de alojar el resto de elementos principales que componen el conjunto de la herramienta como: el patín deslizante, el muelle y la tuerca de precarga. Esta pieza ha sido fabricada con acero inoxidable 316L y es la que se encuentra en contacto directo con el portaherramientas que se monta en el centro de mecanizado.

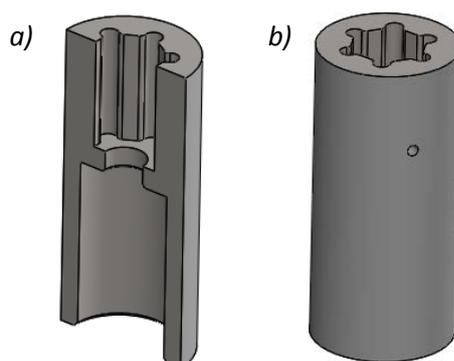


Figura 20.- Vista parcial (a) y completa (b) del cuerpo de la herramienta.

2.3.1.2. Patín deslizante

El patín deslizante (**Figura 21**) es el que se encarga de transmitir la fuerza elástica proporcionada por el muelle a la punta de la herramienta. Este, es insertado directamente en el cuerpo de la herramienta y queda totalmente sujeto con la ayuda de la tuerca de precarga que se encuentra en el extremo contrario al de la punta. El patín deslizante, igual que el cuerpo, ha sido fabricado con acero inoxidable 316L.

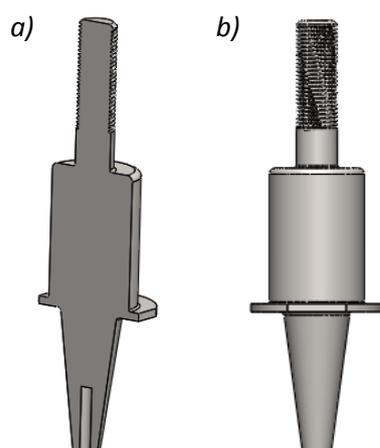


Figura 21.- Vista parcial (a) y completa (b) del patín deslizante de la herramienta.

El patín y el cuerpo deben tener un juego ligero entre sí, de modo que este pueda deslizarse por el cuerpo de la herramienta i transmitir correctamente la fuerza a la punta. Del mismo modo, la unión entre el patín deslizante y la punta de la herramienta debe ser con juego nulo, asegurando desplazamientos nulos en cualquier eje.

2.3.1.3. Punta intercambiable

Como se ha visto con anterioridad, en el patín deslizante encontramos la punta intercambiable () de la herramienta encargada de bruñir la superficie. Esta herramienta ha sido diseñada con este tipo de punta con la finalidad de que, en caso de producirse algún daño o desgaste en dicha parte, no sea necesario comprar la herramienta entera, sino que solo se requiera de una punta nueva. Esto conlleva una reducción considerable del coste por cambio de herramienta. A su vez, permite el montaje de puntas de distinta longitud.

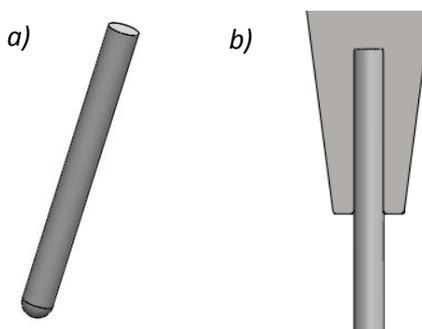


Figura 22.- Punta intercambiable libre (a) e introducida (b) en el patín deslizante de la herramienta.

La punta es introducida en el extremo del patín de modo que la unión entre ambos sea con juego nulo, evitando desplazamientos en cualquiera de los ejes. Para lograrlo, se calienta el agujero en un horno de inducción, el cual es el encargado de dilatarlo y permitir que la punta entre sin problemas. Una vez el agujero vuelve a estar a temperatura ambiente, se genera el juego nulo necesario entre ambos elementos. Lo mismo ocurre en caso de querer extraer la punta, debe dilatarse el agujero previamente en ambos casos.

En este caso, la punta es de metal duro (WC-Co), comúnmente usado para la fabricación de herramienta de corte ya, tras su mecanizado, pueden aplicársele tratamientos térmicos para aumentar su dureza logrando valores superiores a los que presenta la propia pieza a trabajar y asegurando así una mayor resistencia al desgaste.

2.3.1.4. Tuerca y muelle de precarga

Por último, como se ha comentado con anterioridad, tanto el muelle como la tuerca son elementos normalizados, por lo que pueden comprarse prefabricados en cualquier distribuidora de material.

La tuerca tiene como función principal mantener el patín unido al cuerpo a la vez que ajustar y mantener la precarga deseada en cada proceso de mecanizado. Se determina, además, la necesidad de que dicha tuerca sea autoblocante para evitar que la unión se afloje mientras la herramienta trabaja.

El muelle de precarga es el encargado de mantener una fuerza constante durante el proceso de bruñido de la herramienta. Debido a la gran variedad de muelles existente en el mercado, deben tenerse en cuenta con que valores de fuerza de bruñido trabajará la herramienta. En este caso, no se trabajarán con fuerzas superiores a 100N, por lo que el muelle escogido es un muelle blando acorde con la normativa ISO 10243 cuya constante elástica es 20 N/mm.

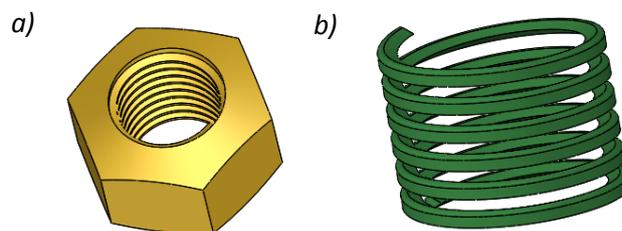


Figura 23.-Tuerca (a) y muelle (b) prefabricados de la herramienta.

3. Ensayos realizados

En este proyecto se han realizado varios ensayos con la finalidad de obtener los parámetros óptimos de mecanizado que proporcionan un mejor acabado superficial en la pieza. Para llevarlo a cabo, se ha dividido en dos partes: ensayos de experimentación y ensayos de análisis. A continuación, se describen los distintos experimentos realizados y los resultados obtenidos en cada caso.

3.1. Experimento 1: Fase de experimentación

Esta primera fase consiste en la realización de varios ensayos mecánicos sobre una pieza de superficie compleja con la herramienta de puntas intercambiables. El procedimiento seguido se detalla a continuación:

3.1.1. Diseño del modelo

Para la realización de los distintos ensayos, ha sido necesario diseñar la pieza a analizar mediante el programa de diseño CAD/CAM FUSION 360 y establecer un modelo de ensayos a realizar sobre esta.

En primer lugar, se establece el modelo de ensayos. Para este proyecto se ha tenido en cuenta un experimento del tipo factorial, lo que consiste en combinar todas las variables presentes en el estudio entre sí y observar cómo influyen en el acabado superficial de la pieza. Las variables y parámetros fijos que se establecen en este proyecto son:

- Variables:
 - Fuerza [F (N)]: tomando valores de 25, 50, 75 y 100 N.
 - Paso lateral [b (mm)]: tomando valores de 0,005, 0,01 y 0,015 mm.
 - Velocidad de giro de la herramienta [n (rpm)]: tomando valores de 30, 300, 600 y 900 rpm.
- Parámetros fijos:
 - Velocidad de avance [Va(mm/min)]: 500 mm/min
 - Dirección de bruñido: perpendicular a la dirección de fresado.
 - Lubricación: los ensayos se han realizado con la superficie lubricada mediante el uso de *TALADRINA*.

Por otro lado, teniendo en cuenta que se quiere saber la calidad superficial que deja la herramienta tras bruñir una superficie compleja, la pieza a trabajar debe contar con dicha característica. Por ello, se decidió realizar los ensayos sobre un bloque de acero AISI 1045 (también llamado acero C45) de dimensiones 100mm x 90mm x 40mm como el que se muestra en la **Figura 24**. Este se somete

inicialmente a un proceso de fresado en la máquina CNC, con el objetivo de obtener una superficie final con una inclinación (de aproximadamente 2 grados) con respecto a la horizontal. De este modo, se obtiene una superficie con cierta complejidad para el su posterior bruñido.

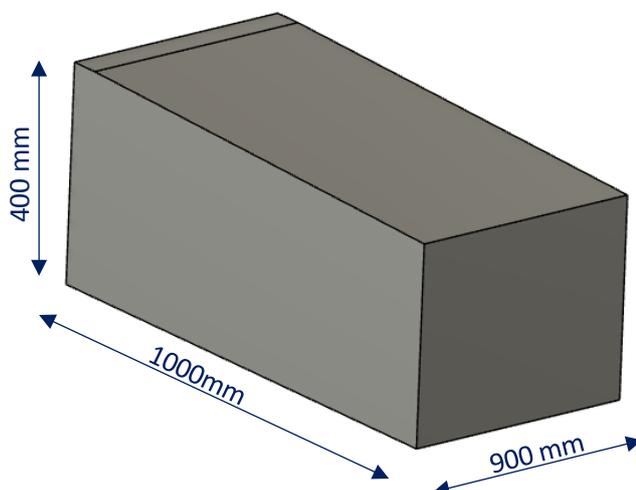


Figura 24.-Bloque a ensayar diseñado en FUSION 360.

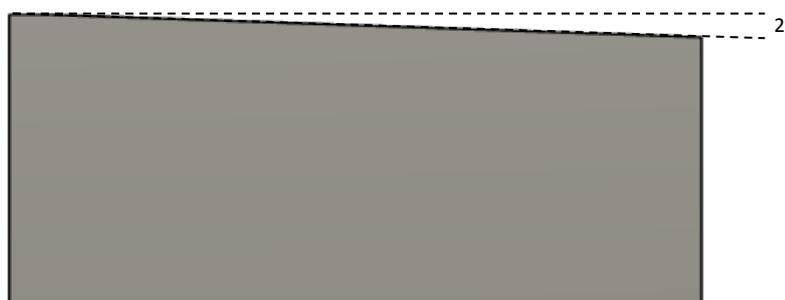


Figura 25.- Bloque a ensayar vista lateral en FUSION 360.

Las dimensiones del bloque a trabajar se han decidido en función del número de muestras a realizar. Teniendo en cuenta el número de variables y parámetros fijos establecidos, se establece un mínimo de 18 muestras de 10mm x 10mm, con una separación de 5 mm entre muestra y muestra, como se puede observar en la figura adjunta a continuación. A cada muestra se le asigna una nomenclatura concreta que facilita su posterior análisis.

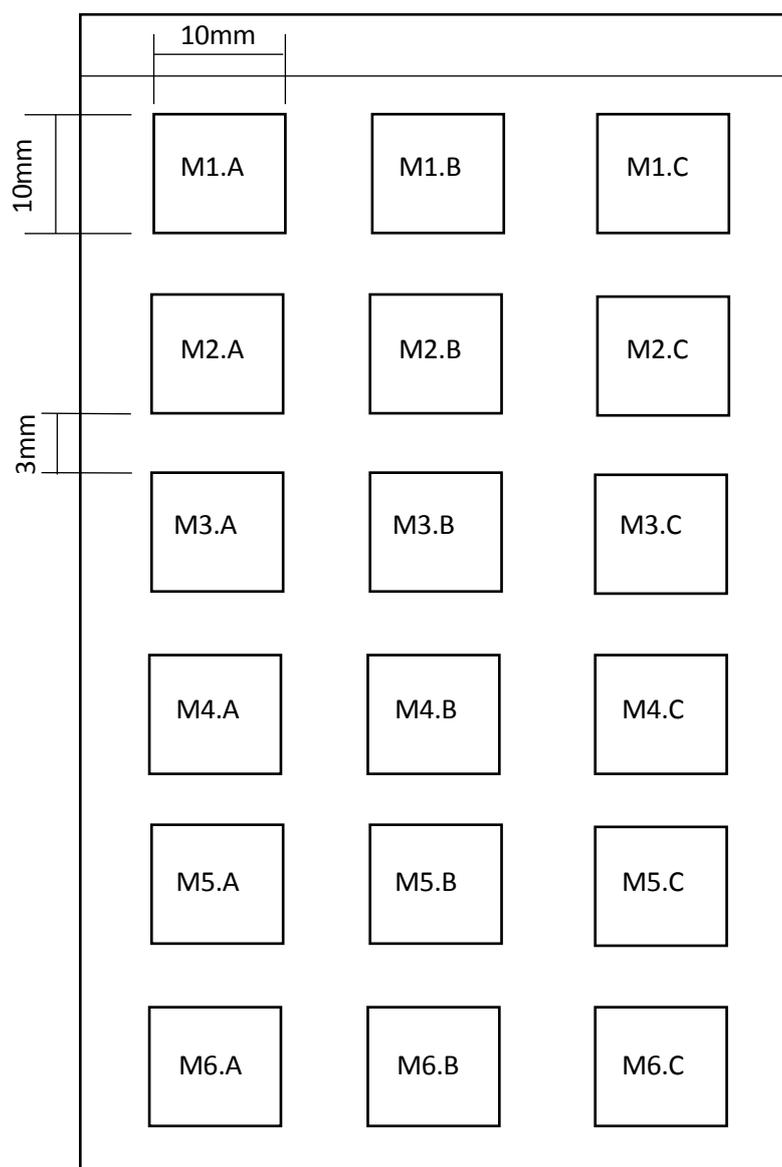


Figura 26.-Disposición, nomenclatura y descripción de las muestras.

Las condiciones de bruñido de las muestras de la **Figura 26**, se describen más detalladamente en la siguiente tabla:

Tabla 3.- Descripción condiciones de bruñido muestras.

Muestra*	F (N)	n (rpm)	b (mm)
M1.A	50	30	0.005
M1.B	50	1	0.01
M1.C	50	1	0.015
M2.A	50	30	0.005
M2.B	50	30	0.01
M2.C	50	30	0.015
M3.A	100	30	0.015
M3.B	75	30	0.015
M3.C	50	30	0.015
M4.A	50	600	0.015
M4.B	25	600	0.015
M4.C	25	300	0.015
M5.A	75	600	0.015
M5.B	50	300	0.015
M5.C	25	900	0.015
M6.A	100	600	0.015
M6.B	50	300	0.015
M6.C	50	900	0.015

* En todos los casos se mantienen los parámetros fijos descritos con anterioridad: $V_a=500\text{mm/min}$, dirección de bruñido perpendicular al fresado y superficie de trabajo lubricada.

3.1.2. Ejecución del modelo planteado

FUSION 360 es una herramienta o plataforma de software de modelado 3D, CAD/CAM y de fabricación, que permite diseñar tanto piezas simples como un conjunto mecánico. A su vez permite la simulación de distintos procesos de fabricación como mecanizado por torno o fresa, o fabricación aditiva [13]. Por lo que, antes de iniciar con el proceso de mecanizado en la máquina CNC, se han diseñado las distintas muestras en FUSION 360 acorde con el modelo de ensayo establecido y con el objetivo de reducir riesgos en el mecanizado real.

De este modo, se generan las distintas muestras en el programa, estableciendo el número de procesos, tipo de herramienta a utilizar en cada caso y metodología de mecanizado a seguir, junto con velocidades de giro, avance, etc.

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para la simulación de una muestra ejemplo:

1. En primer lugar, se realiza un fresado de desbaste sobre la superficie a bruñir. Se diseña el proceso de modo que la superficie final sea una superficie con dos grados de inclinación. Para ello, se establecen los distintos parámetros y el tipo de herramienta a utilizar. En este caso, la herramienta usada es una fresa de bola de diámetro 10mm.

Tras definir el proceso, se genera la simulación en el programa y se comprueba que no se produzca ningún tipo de error. Para ello, FUSION 360 permite delimitar la pieza a tratar y la bancada con la finalidad de poder informar de posibles colisiones, reportados con puntos rojos, de la herramienta con la máquina. A su vez, permite ver el tiempo aproximado que se tarda en realizar dicha operación.

2. Tras la simulación, si no se produce ningún error, se procede a descargar el código del proceso para pasarlo a la máquina CNC y reproducirlo sobre la pieza real.
3. Una vez fresada la superficie, deben diseñarse las muestras a bruñir. Para ello, se crean las distintas huellas sobre la pieza procesada en el mismo programa como se muestra en la **Figura 27**. En este caso, aparte del tipo de herramienta y procesado, deberá establecerse el perfil sobre el que se querrá trabajar y la dirección de bruñido. Esto es muy importante, ya que, bruñir en la misma dirección en la que se ha realizado el fresado, no conllevaría ninguna mejora en la superficie. Es el bruñido realizado perpendicularmente al fresado el que permite suavizar los picos generados por el proceso anterior.

Para todos los procesos de bruñido se ha establecido una herramienta de bola de diámetro 3mm debido a la similitud con la en los ensayos.

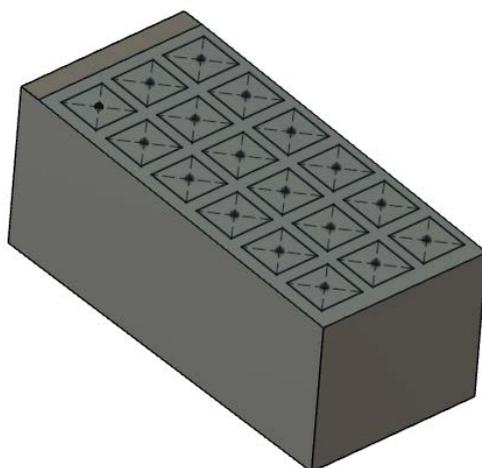


Figura 27.- Muestras generadas en el programa CAD/CAM FUSION 360.

4. Igual que en el caso anterior, se simula el proceso y se descarga el código necesario para que la máquina CNC pueda ejecutar el programa y generar las distintas muestras.
5. Tras acabar cada sesión de mecanizado, debe embadurnarse la superficie de la pieza con aceite o algún tipo de lubricante que no contenga oxidantes, con la finalidad de evitar la aparición de óxido en las muestras.

En el apartado *Anexo B2* se describen los distintos pasos, a modo de guía, para establecer los parámetros de cada una de las muestras y generar la simulación.

Por último, debe destacarse que debido a problemas con la propia máquina CNC, la cual dejó de estar operativa durante los últimos meses de ejecución del proyecto, se redujo el número de muestras a realizar de 18 a 13 (de la muestra M1.A hasta la M5.C). A continuación, se adjunta una imagen de las distintas muestras bruñidas.



Figura 28.- Muestras de 10x10mm bruñidas con la herramienta de puntas intercambiables.

3.1.3. Evaluación de la calidad superficial de las muestras

Para la evaluación de la calidad superficial de cada una de las muestras, se ha hecho uso del rugosímetro óptico.

Tanto en el caso del rugosímetro óptico como en el perfilómetro, en primer lugar, se debe limpiar la superficie a analizar para eliminar cualquier rastro de impurezas y/o aceite. La presencia de impurezas en la superficie, como pueden serlo el óxido o restos de lubricante, conllevarían la pérdida de puntos o valores en la medida, y se obtendrían valores alterados de rugosidad. Por ello, se realiza una limpieza exhaustiva, primero con agua y jabón, y después con alcohol y agua destilada.

Una vez limpia la superficie, se procede a encender el rugosímetro. Para ello, debe encenderse primero el aparato y, después, el ordenador vinculado a este. Para poder medir las muestras correctamente, la superficie debe estar completamente plana, ya que, al tratarse de un elemento óptico que trabaja con un puntero láser, la presencia de variaciones de altura puede producir cierto desenfoque de la pieza y, igual que en el caso anterior, perder puntos en la medida. Por ello, es necesario el uso de una base niveladora, como las que se muestran en la figura adjunta a continuación, que permita colocar la superficie inclinada de modo horizontal, pudiendo medir correctamente cada una de las muestras.



Figura 29.- Piezas diseñadas para nivelar las muestras a medir.

Por otro lado, como se ha comentado con anterioridad, cuando se trabaja con rugosímetros, deben establecerse ciertos parámetros. En el caso del rugosímetro óptico, se establecen en la propia pantalla de software del programa y son los siguientes:

- **Rapid Axis (Eje rápido):** como su nombre indica, se trata del eje en el que se toma la medida rápida, es decir, el eje en el cual el objetivo va a evaluar longitudinalmente la superficie.
- **Slow Axis (Eje lento):** se trata del movimiento lateral del objetivo, en la dirección perpendicular a las marcas de bruñido.
- **Scan Length (Longitud de escaneo):** se trata de las distancias de escaneo que se quieren evaluar, tanto en la dirección del eje X e Y.
- **Scan Step (Salto de escaneo):** se define como la distancia paralela entre escaneos en el eje rápido.

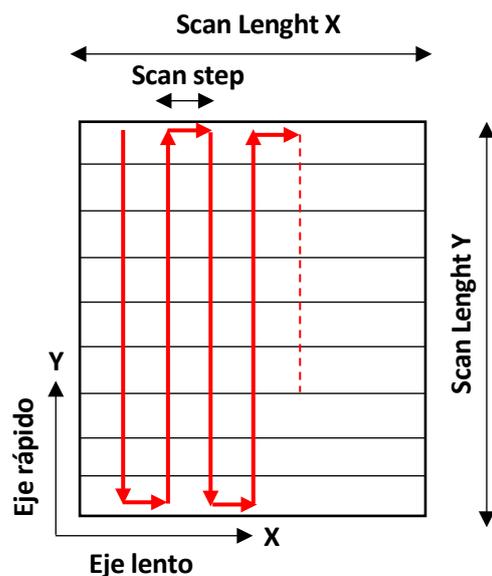


Figura 30.- Esquema de parámetros de medida de la rugosidad de una muestra.

Sensor connection	Sensor configuration	Active sensors	Access Level
Surface			
Rapid axis	Y	Slow axis	X
Scan length :	1000 μm	Scan length :	1000 μm
Scan step :	1 μm	Scan step :	5 μm
Number of points :	1001	Number of profiles :	201
Move direction :	<input type="radio"/> Forward <input type="radio"/> Backward	Move direction :	<input type="radio"/> Forward <input type="radio"/> Backward
Scan mode :	Constant speed		
Speed :	300 $\mu\text{m/s}$		

Figura 31.- Parámetros establecidos en el programa de escaneo de superficie.

Para mayor información sobre el funcionamiento y uso del rugosímetro óptico consultar el 2.1.3 *Rugosímetro* Rugosímetro de este documento.

3.1.4. Resultados

Tras el análisis de cada una de las muestras, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.- Resultados de rugosidades obtenidos con el rugosímetro óptico.

Muestra	F (N)	n (rpm)	b (mm)	Sz (μm)	Sa (μm)	Ssk (μm)	Sku (μm)	Sq (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)
M1.A	50	30	0,005	12,540	1,335	-0,089	2,687	1,655	0,619	2,487	0,704
M1.B	50	30	0,01	10,200	1,308	-0,174	2,575	1,606	1,211	4,651	1,362
M1.C	50	30	0,015	7,352	0,903	0,012	2,603	1,108	0,601	3,183	0,732
M2.A	50	30	0,005	8,350	1,067	0,067	2,650	1,318	0,786	3,878	0,927
M2.B	50	30	0,01	11,58	0,987	0,063	2,847	1,223	0,941	4,423	1,081
M2.C	50	30	0,015	7,659	1,068	0,011	2,375	1,288	0,472	2,580	0,566
M3.A	100	30	0,015	13,91	2,055	0,342	2,350	2,457	0,435	4,066	0,638
M3.B	75	30	0,015	12,36	1,441	0,235	3,045	1,789	0,475	3,027	0,591
M3.C	50	30	0,015	9,424	0,998	0,101	2,728	1,237	0,326	2,107	0,424
M4.A	50	600	0,015	8,280	1,001	-0,179	2,867	1,240	0,474	2,590	0,587
M4.B	25	600	0,015	5,452	0,597	0,124	3,005	0,748	0,346	1,726	0,419
M4.C	25	300	0,015	9,721	1,017	0,114	2,733	1,259	0,779	3,508	0,899
M5.C	25	900	0,015	6,230	0,609	0,357	3,112	0,763	0,332	2,193	0,407

- Variación de la rugosidad en función de la fuerza aplicada sobre la superficie

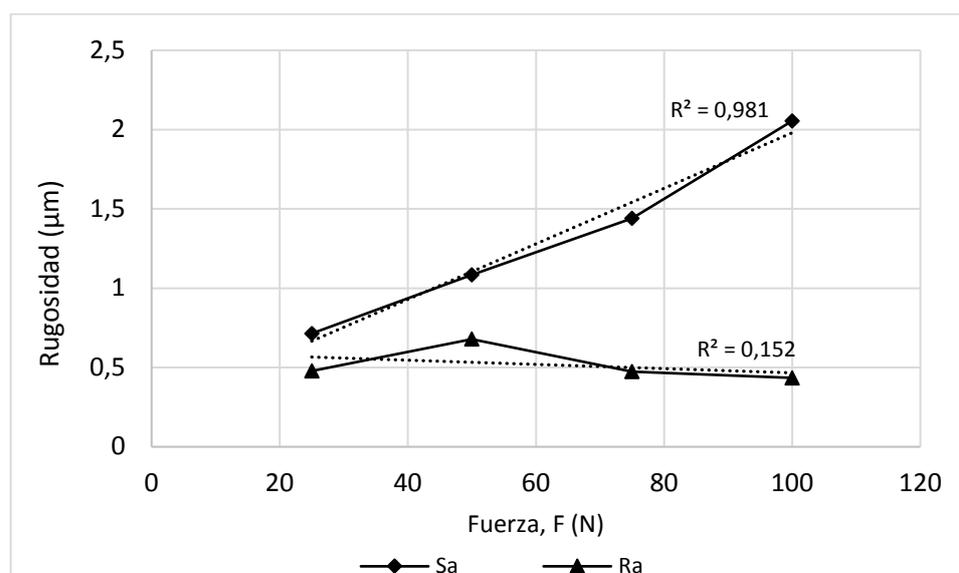


Figura 32.- Representación gráfica de la variación de Ra y Sa en función de la fuerza aplicada sobre la superficie.

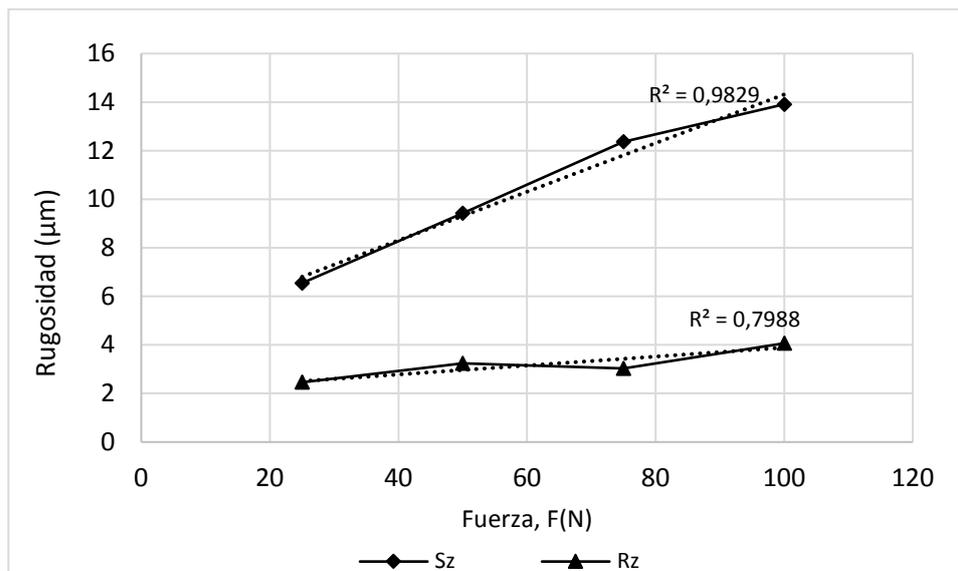


Figura 33.-Representación gráfica de la variación de Rz y Sz en función de la fuerza aplicada sobre la superficie

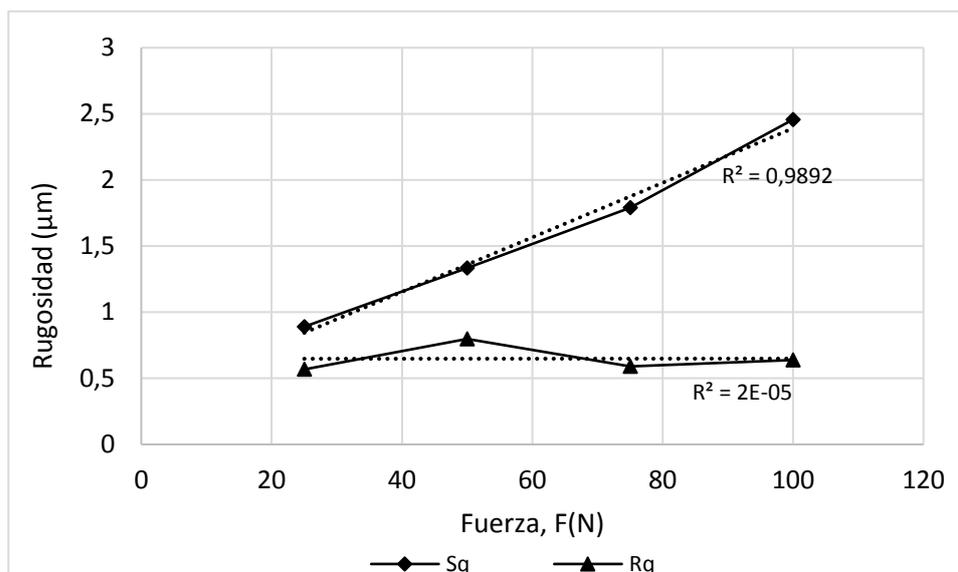


Figura 34.-Representación gráfica de la variación de Rq y Sq en función de la fuerza aplicada sobre la superficie

- Variación de la rugosidad en función de la velocidad de rotación de la herramienta.

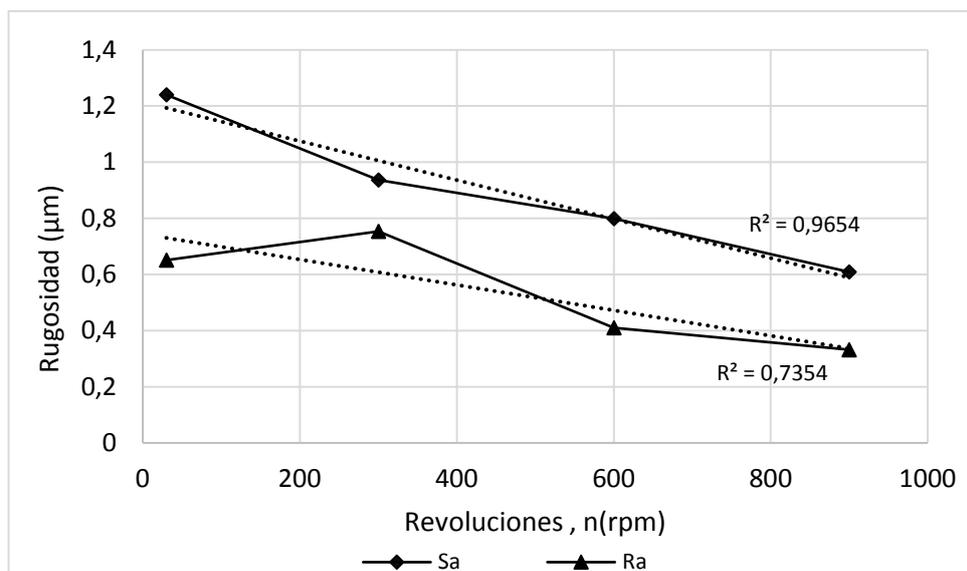


Figura 35.-Representación gráfica de la variación de Ra y Sa en función de la velocidad de rotación de la herramienta.

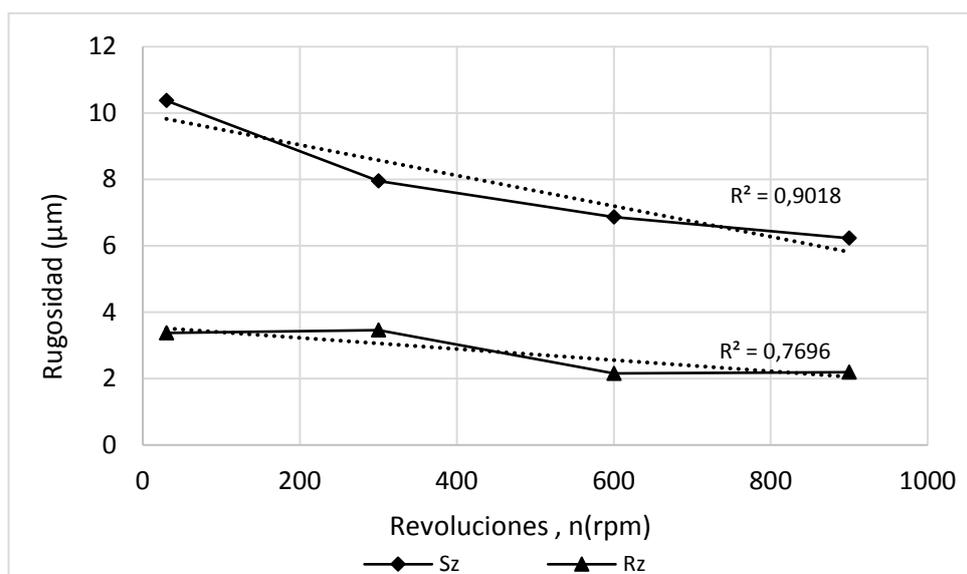


Figura 36.-Representación gráfica de la variación de Rz y Sz en función de la velocidad de rotación de la herramienta.

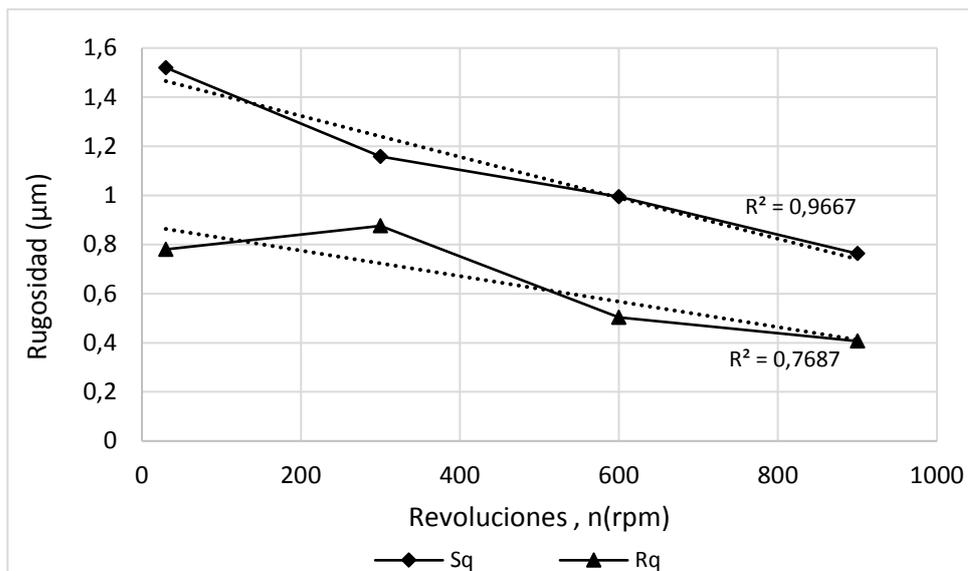


Figura 37.-Representación gráfica de la variación de Rq y Sq en función de la velocidad de rotación de la herramienta.

- Variación de la rugosidad en función del paso lateral.

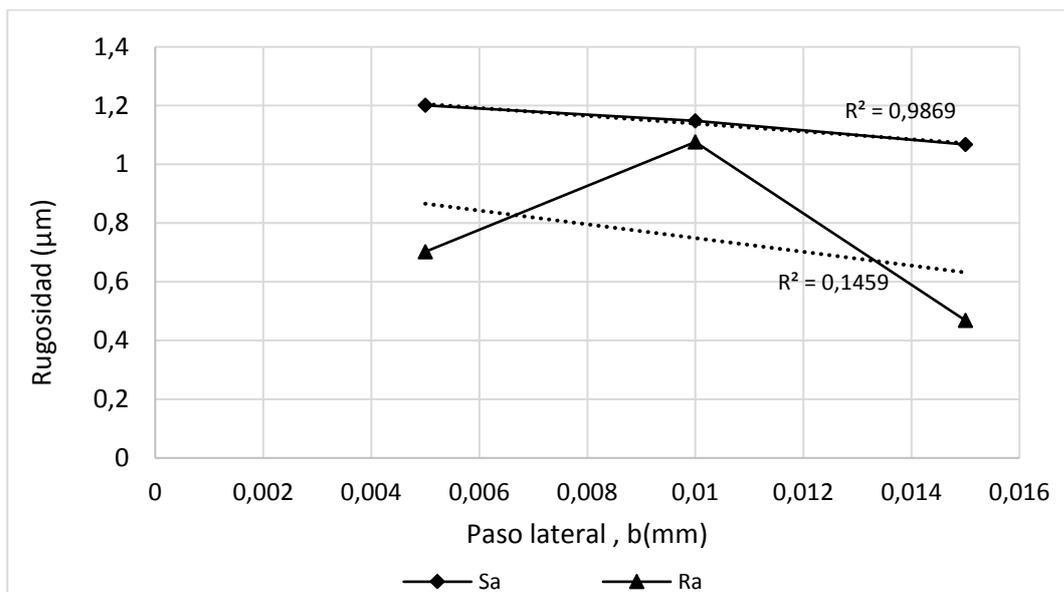


Figura 38.-Representación gráfica de la variación de Ra y Sa en función de la velocidad del paso lateral.

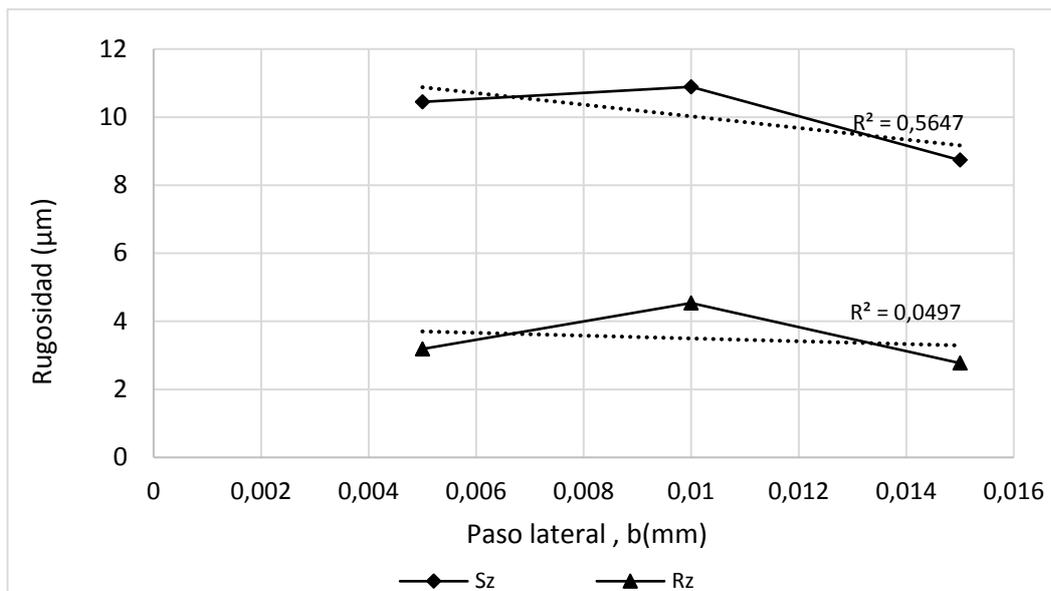


Figura 39.-Representación gráfica de la variación de Rz y Sz en función del paso lateral.

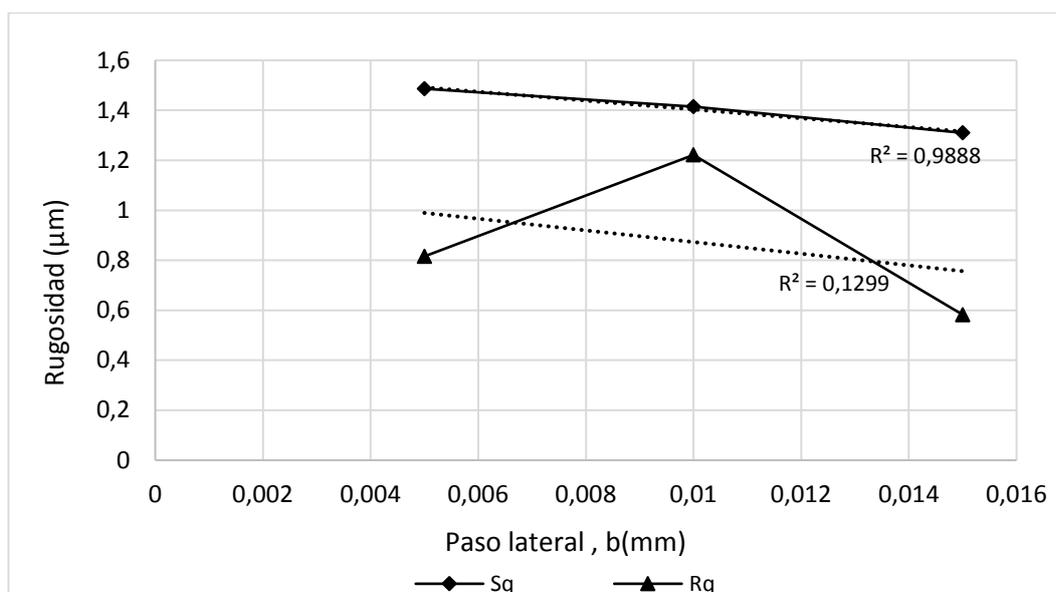


Figura 40.-Representación gráfica de la variación de Rq y Sq en función del paso lateral.

3.1.5. Discusión de resultados

Como se puede ver en los gráficos anteriores, la rugosidad superficial de cada muestra varía en función de las condiciones de bruñido aplicadas en el mecanizado.

Por lo que refiere a la variación de la rugosidad en función de la fuerza de bruñido aplicada sobre la superficie (Figuras 30, 31 y 32), se observa que a medida que se aumenta la fuerza, la rugosidad

superficial empeora. Esto puede ser debido a que, en muchas ocasiones, al sobrepasar la fuerza necesaria para provocar la deformación plástica de la superficie y mejorar el acabado superficial, se genera una deformación mucho mayor y, por lo tanto, mayor diferencia entre picos y valles.

Ocurre lo contrario cuando se trata de la velocidad de rotación de la herramienta durante el proceso, a mayor velocidad de rotación, se obtienen valores inferiores de rugosidad. Ambos parámetros, S y R, muestran la misma tendencia frente a la variación de rpm's e indican que es preferible trabajar a velocidades altas de rotación si se quiere obtener un mejor acabado superficial (véase **Figuras 33, 34 y 35**). El problema de trabajar con velocidades altas es que conllevan un mayor desgaste de la herramienta en menor tiempo.

Por último, por lo que refiere al paso lateral de la herramienta, no se obtienen valores determinantes en el acabado superficial, no pudiendo remarcar si un mayor o menor paso lateral conlleva mejoría en la rugosidad de las muestras. Como puede verse en los tres gráficos adjuntos en el apartado anterior, los datos presentan un error bastante notable, lo que genera la necesidad de realizar más ensayos y comprobar si realmente el paso lateral puede, o no, ser influyente en el acabado superficial de una pieza.

3.2. Experimento 2: Análisis

Esta segunda fase, a diferencia del experimento 1, consiste únicamente en el análisis de distintas muestras que se realizaron con la herramienta de puntas intercambiable en una empresa externa "Centre de Formació Pràctica (CFP)". Se hizo así debido a la necesidad de uso de una fresadora que permitiera movimiento en 5 ejes al mecanizar la pieza, puesto que la máquina CNC de la que se dispone en el taller de la universidad UPC-EEBE solo permite el movimiento en 3 ejes, no pudiendo inclinar la herramienta en ningún momento.

El procedimiento seguido se detalla a continuación:

3.2.1. Descripción del ensayo

Igual que en el experimento 1, en primer lugar, se diseñó una pieza que permitiera poner a prueba la nueva herramienta de cara a la fase de experimentación. Por ello, dicho elemento se caracteriza por tener varias superficies inclinadas y esféricas que generan una superficie compleja interesante.

Como se comenta en el punto anterior, los ensayos fueron realizados en una empresa externa a la universidad. Cada muestra fue ensayada en condiciones distintas.

El objetivo de realizar los ensayos en una empresa externa, ajena al lugar de trabajo donde se estaba realizando el proyecto, era poder comparar el acabado final de la pieza en función de si se está trabajando con una máquina que permite el movimiento en 3 ejes o en 5. Por lo tanto, todos los ensayos fueron diseñados con el objetivo de comprobar cuáles son las condiciones de bruñido óptimas (que aporta un mejor acabado superficial en la pieza), y cuáles son las pésimas, tanto cuando se bruñe con una máquina de 3 ejes como de 5.

3.2.2. Diseño del modelo

Como se puede observar en las distintas figuras adjuntas a continuación, se trata de una pieza de superficie compleja, con inclinaciones y redondeos, lo que permite poder ensayar las muestras en distintas condiciones.

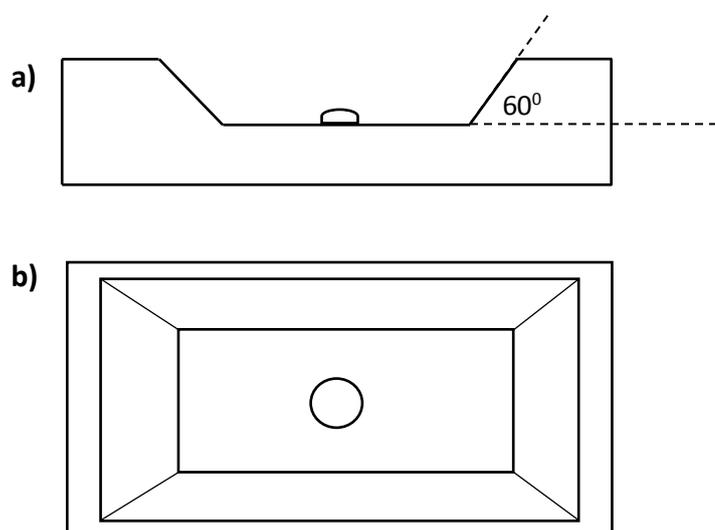


Figura 41.- Pieza analizada. a) Vista perfil, b) Vista planta.

De este modo, se han realizado un total de 7 ensayos que, debido a la complejidad superficial de la pieza, permite obtener hasta 11 tipos de muestra distintos. Las condiciones de bruñido para cada una de las muestras, se detallan a continuación:

- Variables:
 - Inclinación de la herramienta: (a) perpendicular a la base de la pieza, (b) perpendicular a la superficie de trabajo (90°) y (c) con una inclinación de 4° con respecto a la horizontal. Véase **Figura 42**.
 - Centro de mecanizado: bruñido en centro de mecanizado de (d) 3 ejes o (e) 5 ejes. Véase **Figura 43**.

- Parámetros fijos:

- Velocidad de giro de la herramienta [n (rpm)]: 10 rpm.
- Fuerza de bruñido [F(N)]: 90N
- Pasada lateral [b(mm)]: 0,25mm
- Velocidad de avance [Va(mm/min)]: 1000 mm/min
- Con lubricación: Taladrina activa

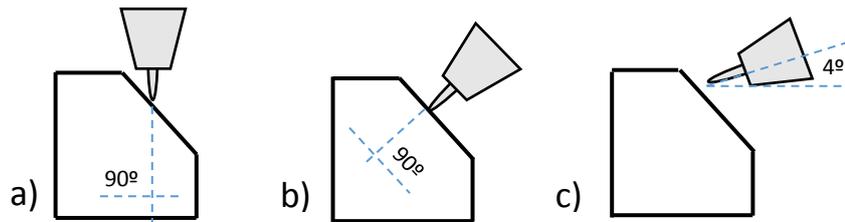


Figura 42.- Posición de bruñido de la herramienta según las condiciones (a), (b) y (c).

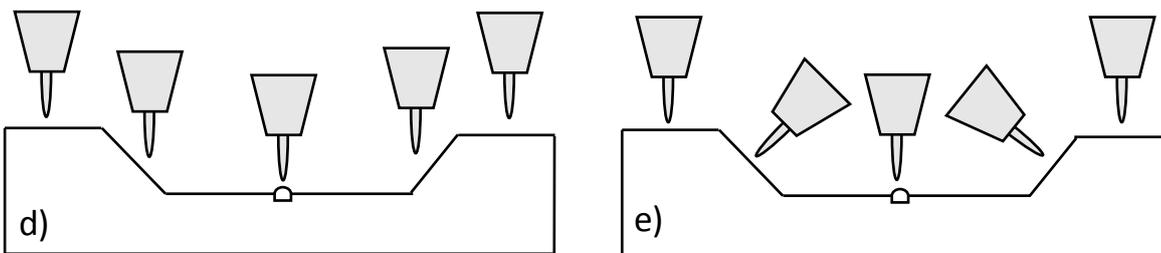


Figura 43.- d) Herramienta funcionando con 3 ejes, e) Herramienta funcionando con 5 ejes.

Por lo que, sabiendo las condiciones de bruñido que se han aplicado en cada uno de los ensayos, se obtienen las siguientes muestras:

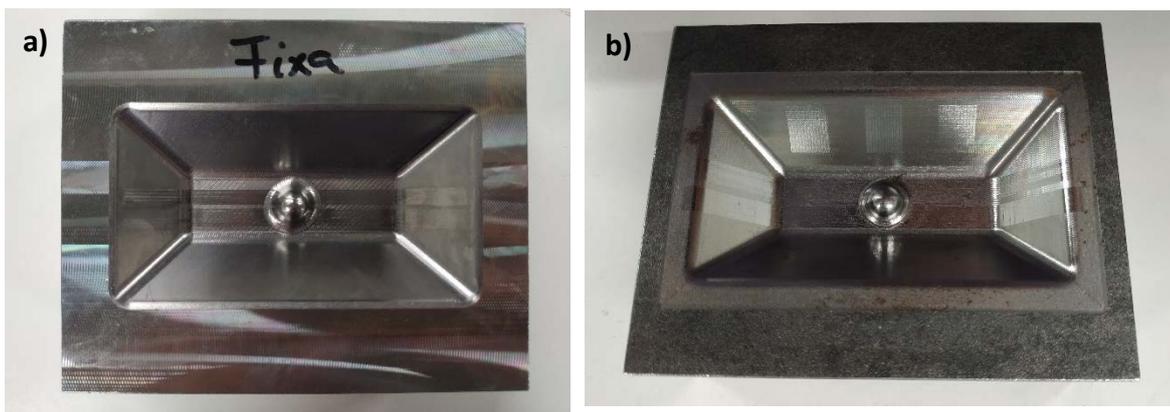


Figura 44.- Muestras en pieza mecanizada: a) Vista frontal, b) Vista dorsal.

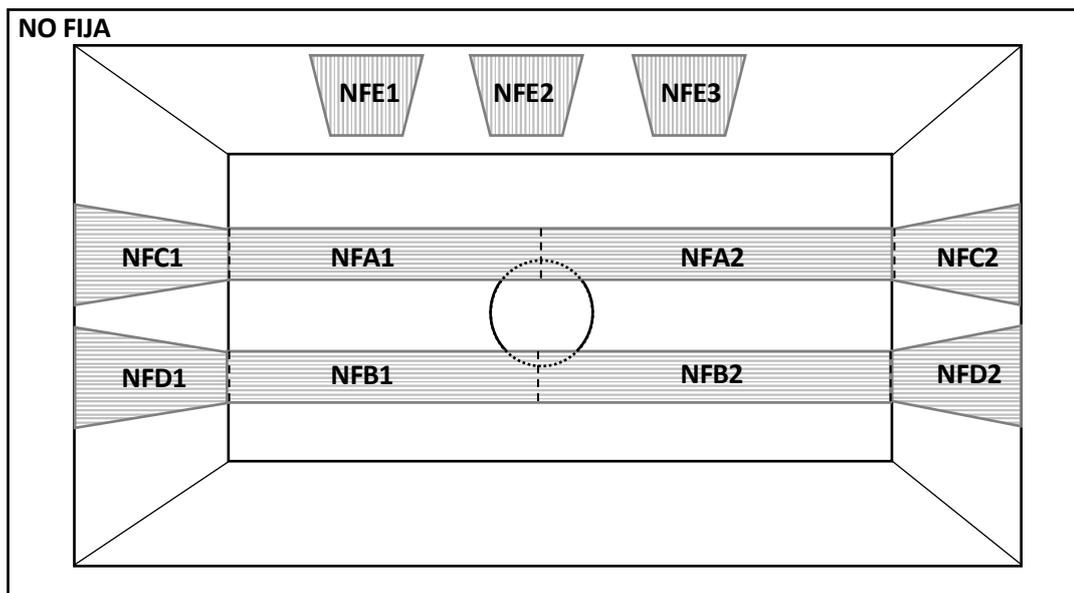


Figura 45.- Dibujo esquemático de muestras bruñidas en dorsal de la pieza.

Teniendo en cuenta que todas las muestras que pueden verse en la **Figura 45** han sido bruñidas con unas condiciones fijas (descritas con anterioridad) y, otras, variables. A continuación, se muestra una tabla con la descripción de las condiciones no fijas para cada caso:

Tabla 5.- Descripción de condiciones de bruñido para el experimento 2.

Muestra*	Posición de la herramienta
NFA1	Perpendicular al plano horizontal de la pieza.
NFA2	Fresadora de 3 ejes / Configuración (a) + (d).
NFB1	Perpendicular a la superficie de trabajo.
NFB2	Fresadora de 5 ejes / Configuración (b) + (e).
NFC1	Perpendicular al plano horizontal de la pieza.
NFC2	Fresadora de 3 ejes / Configuración (a) + (d).
NFD1	Perpendicular a la superficie de trabajo.
NFD2	Fresadora de 5 ejes / Configuración (b) + (e).
NFE1	Perpendicular al plano horizontal de la pieza. Fresadora 3 ejes / Configuración (a).
NFE2	Perpendicular a la superficie de trabajo. Fresadora 5 ejes / Configuración (b) + (e).
NFE3	Inclinada 4º respecto a la horizontal. Fresadora 5 ejes / Configuración (c) + (e).

* En todos los casos se mantienen los parámetros fijos descritos con anterioridad: $F=90N$, $Va=1000mm/min$, $n=10rpm$, $b=0,25mm$ y superficie de trabajo lubricada.

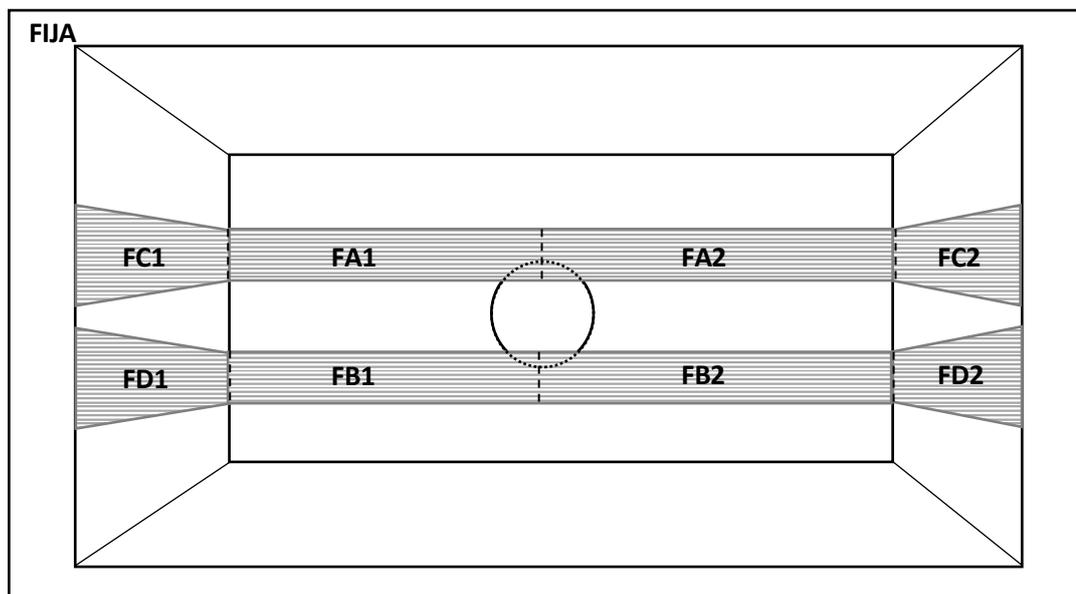


Figura 46.- Dibujo esquemático de muestras bruñidas en frontal de la pieza.

Lo mismo para la Figura 46. A continuación, se muestra la tabla con la descripción de las condiciones no fijas para este segundo caso:

Tabla 6.- Condiciones de bruñido variables del experimento 2.

Muestra*	Posición de la herramienta
FA1	Perpendicular al plano horizontal de la pieza.
FA2	Fresadora de 3 ejes / Configuración (a) + (d).
FB1	Perpendicular a la superficie de trabajo.
FB2	Fresadora de 5 ejes / Configuración (b) + (e).
FC1	Perpendicular al plano horizontal de la pieza.
FC2	Fresadora de 3 ejes / Configuración (a) + (d).
FD1	Perpendicular a la superficie de trabajo.
FD2	Fresadora de 5 ejes / Configuración (b) + (e).

* En todos los casos se mantienen los parámetros fijos descritos con anterioridad: $F=90N$, $V_a=1000\text{mm}/\text{min}$, $n=10\text{rpm}$, $b=0,25\text{mm}$ y superficie de trabajo lubricada.

3.2.3. Evaluación de la calidad superficial de las muestras

Para evaluar la calidad superficial de las muestras, en este caso, se han usado dos tipos de rugosímetro. En primer lugar, el rugosímetro óptico para aquellas muestras que se encuentran en la parte central de la pieza, es decir: NFA, NFB, FA y FB; y, en segundo lugar, el perfilómetro para aquellas con cierta inclinación como: NFC, NFD, FC, FD y NFE. Esto es debido a las dimensiones de la propia pieza y la disposición de las muestras en ella, las que se encuentran en la parte central permiten cierto

movimiento del objetivo para medir la superficie, pero en el caso de las zonas inclinadas, el rugosímetro no dispone de espacio suficiente para evaluarlas correctamente (véase **Figura 47**). Por ello, es necesario el uso del perfilómetro en el resto de zonas, ya que permite medir las muestras más rápidamente y con menor grado de dificultad.

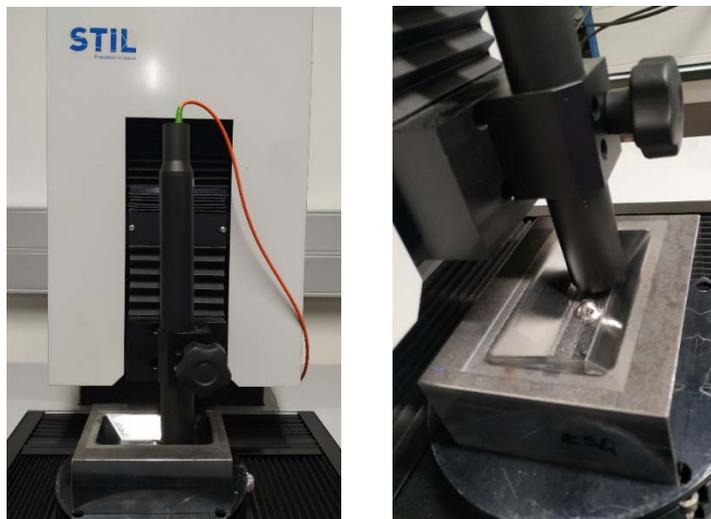


Figura 47.-Rugosímetro óptico en funcionamiento.

Las muestras centrales se miden del mismo modo que en el experimento 1. Por lo que refiere al procedimiento en la medida con el rugosímetro de contacto, se describe a continuación:

El perfilómetro, a diferencia del rugosímetro óptico, debe montarse previamente antes de poder ser usado. En primer lugar, debe enchufarse el aparato a la red eléctrica y conectarse mediante el cable USB al ordenador que va a usarse para visualizar los resultados. Es recomendable el uso del ordenador para el análisis de las muestras ya que el programa permite generar directamente una hoja de resultados en la que se adjunta el perfil 2D de la rugosidad medida.

Tras conectarse a la red eléctrica, se procede a colocar el brazo del rugosímetro en el eje deslizante, el que permite ajustar posteriormente la distancia entre la cabeza del perfilómetro y la muestra a medir. Como se ha comentado con anterioridad, para poder medir correctamente la rugosidad superficial de la muestra, el palpador debe estar en contacto en todo momento con la superficie, en caso contrario, la pantalla mostrara el mensaje “Fuera de rango”. Es importante tener mucho cuidado e ir lentamente cuando se esté ajustando la altura del palpador en distancias cortas, ya que, aunque se trabaje con una punta de diamante, se trata de un elemento sensible a los golpes y fácilmente dañable.

Igual que en el caso anterior, es necesario el uso de bases niveladoras para trabajar con superficies horizontales y poder obtener resultados factibles.



Figura 48.- Perfilómetro en funcionamiento vista planta.



Figura 49.- Perfilómetro en funcionamiento vista perfil.

Antes de iniciar la medida, deben establecerse los siguientes parámetros:

- **Cut-off (λ_c):** el valor de *cut-off*, como se ha comentado con anterioridad, se establece en función de la rugosidad que muestra la superficie, si el (λ_c) se encuentra fuera del rango de rugosidades establecido, se reajusta al adecuado. En este caso, se trabaja con rugosidades $0,02\mu\text{m} < R_a < 1\mu\text{m}$, por lo que se trabaja con un valor de (λ_c) de 0,25mm.
- **Nº de Cut-off:** se mantiene constante e igual a 5.
- **Velocidad de evaluación:** velocidad en la que se mueve el palpador. En este caso se establece una velocidad de 0,5 mm/s

Para iniciar la medida, se presiona el botón START. Si en la pantalla se muestra el aviso de “Fuera de rango” como en la **Figura 50**, se debe reajustar la distancia entre la superficie y el palpador, y volver a medir. Una vez comprobado que el palpador está en contacto con la muestra durante todo el recorrido, se procede a dar la orden de iniciar la medida desde el ordenador, lo que permite obtener el gráfico 2D de la superficie.

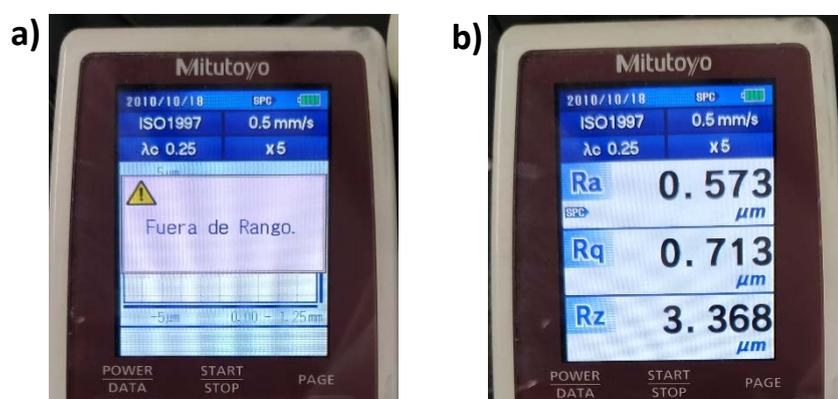


Figura 50.- (a) Aviso de pérdida de contacto con la superficie (fuera de rango), (b) Medición realizada correctamente

3.2.4. Resultados

A continuación, se muestran los resultados de rugosidad obtenida tras la medición:

Tabla 7.- Resumen de resultados de rugosidad obtenidos en la medición con el rugosímetro óptico y perfilómetro.

Muestra*	Ra (μm)		Rz (μm)		Rq (μm)		Rsk (μm)		Rku (μm)	
	Media	Error	Media	Error	Media	Error	Media	Error	Media	Error
NFA (3E) ⁺	1,938	0,019	18,395	4,315	2,764	0,119	-0,447	1,482	7,481	2,809
NFB (5E) ⁺	1,242	0,204	7,239	1,126	1,554	2,894	0,143	0,286	2,695	0,232
NFC (3E)	0,492	0,098	2,493	0,467	0,604	0,122	0,497	0,259	2,840	0,527
NFD (5E)	0,368	0,063	1,916	0,200	0,464	0,065	0,175	0,245	3,059	0,874
NFE1 (P)	0,463	0,154	2,522	0,866	0,575	0,172	0,248	0,298	3,147	0,403
NFE2 (90°)	0,487	0,053	2,617	0,347	0,610	0,075	0,213	0,126	2,787	0,219
NFE3 (4°)	0,412	0,036	2,332	0,265	0,520	0,046	0,057	0,285	2,909	0,255
FA (3E)	0,971	0,005	4,917	0,007	1,159	0,017	0,256	0,208	2,203	0,116
FB (5E)	0,916	0,226	5,606	1,242	1,130	0,021	0,721	0,073	3,185	0,021
FC (3E)	0,613	0,073	3,320	0,407	0,779	0,086	0,588	0,265	3,224	0,332
FD (5E)	0,339	0,053	1,885	0,272	0,420	0,062	0,073	0,216	2,777	0,274

* Para cada muestra con la abreviación: 3E=bruñida con la fresadora de 3 ejes, 5E=bruñida con la fresadora de 5 ejes, P=bruñido perpendicular a la base de la pieza, 90°=bruñido perpendicular a la superficie de trabajo y 4°= bruñido a 4° de inclinación con respecto a la horizontal.

+ Las muestras NFA y NFB han sido desestimadas para el estudio debido a la incoherencia de resultados y que se deberían haber repetido las mediciones.

Tabla 8.- Tabla comparativa de resultados obtenidos con la fresadora de 3 y 5 ejes.

Bruñido en configuración (d) – 3 ejes					Bruñido en configuración (e) – 5 ejes						
FA		FC			FB		FD				
Medición (μm)	Error	Medición (μm)	Error	Medición (μm)	Error	Medición (μm)	Error	Medición (μm)	Error		
Ra	0,971	0,063	Ra	0,613	0,073	Ra	0,916	0,226	Ra	0,339	0,053
Rz	4,917	0,007	Rz	3,320	0,407	Rz	5,606	1,242	Rz	1,885	0,272
Rq	1,159	0,017	Rq	0,779	0,086	Rq	1,130	0,021	Rq	0,420	0,062
Rsk	0,256	0,208	Rsk	0,588	0,265	Rsk	0,721	0,073	Rsk	0,073	0,216
Rku	2,203	0,116	Rku	3,224	0,332	Rku	3,185	0,021	Rku	2,777	0,274
NFC		NFE1			NFD		NFE2				
Medición (μm)	Error	Medición (μm)	Error	Medición (μm)	Error	Medición (μm)	Error	Medición (μm)	Error		
Ra	0,492	0,098	Ra	0,463	0,154	Ra	0,368	0,063	Ra	0,487	0,053
Rz	2,493	0,467	Rz	2,522	0,866	Rz	1,916	0,200	Rz	2,617	0,347
Rq	0,604	0,122	Rq	0,575	0,172	Rq	0,464	0,065	Rq	0,610	0,075
Rsk	0,497	0,259	Rsk	2,840	0,527	Rsk	0,175	0,245	Rsk	0,213	0,126
Rku	0,248	0,298	Rku	3,147	0,403	Rku	3,059	0,874	Rku	2,787	0,219

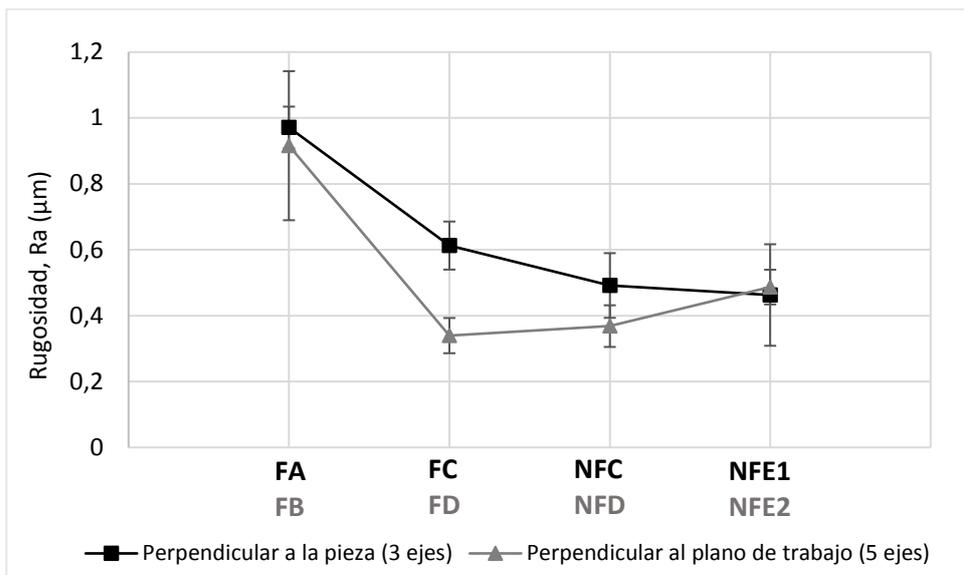


Figura 51.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Ra en la fresadora de 3 y 5 ejes.

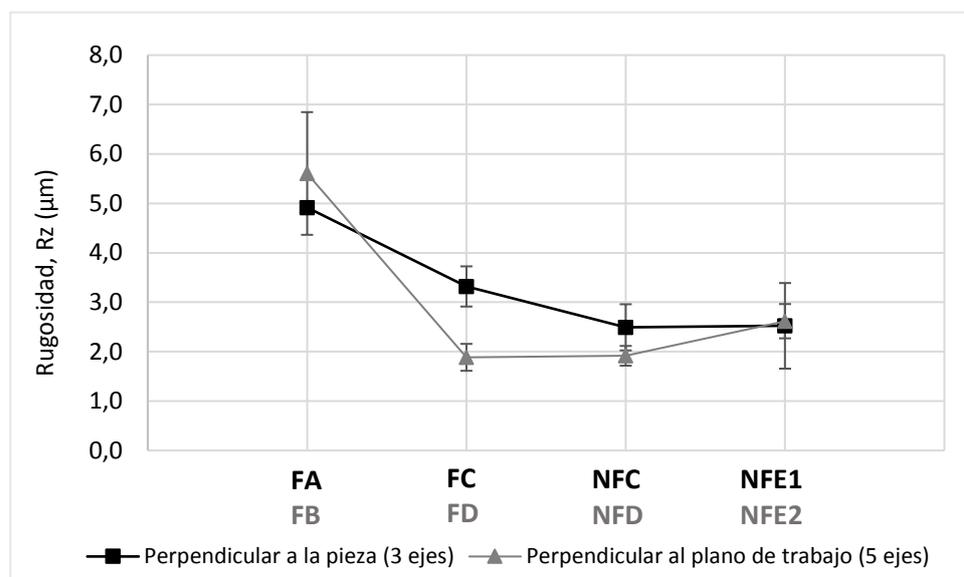


Figura 52.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Rz en la fresadora de 3 y 5 ejes.

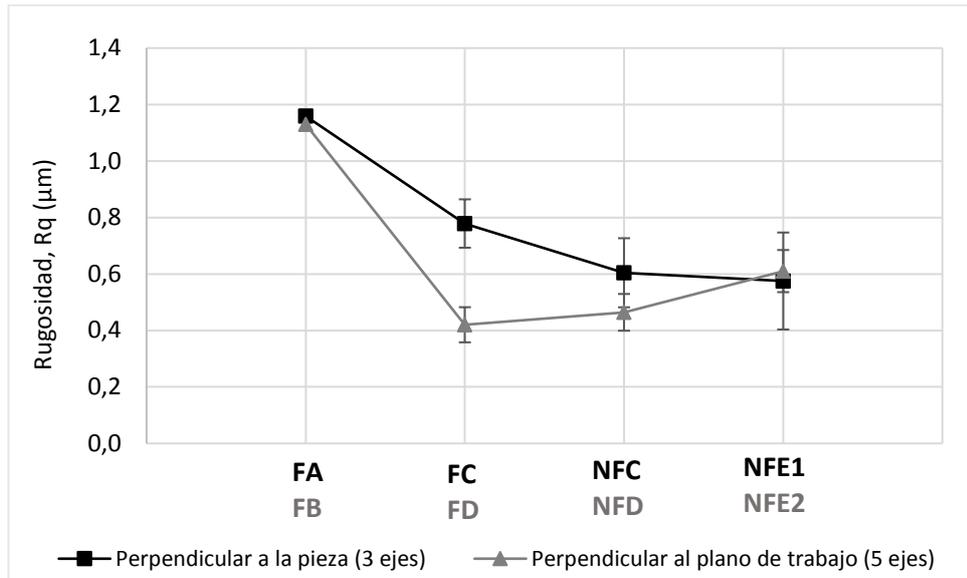


Figura 53.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Rq en la fresadora de 3 y 5 ejes.

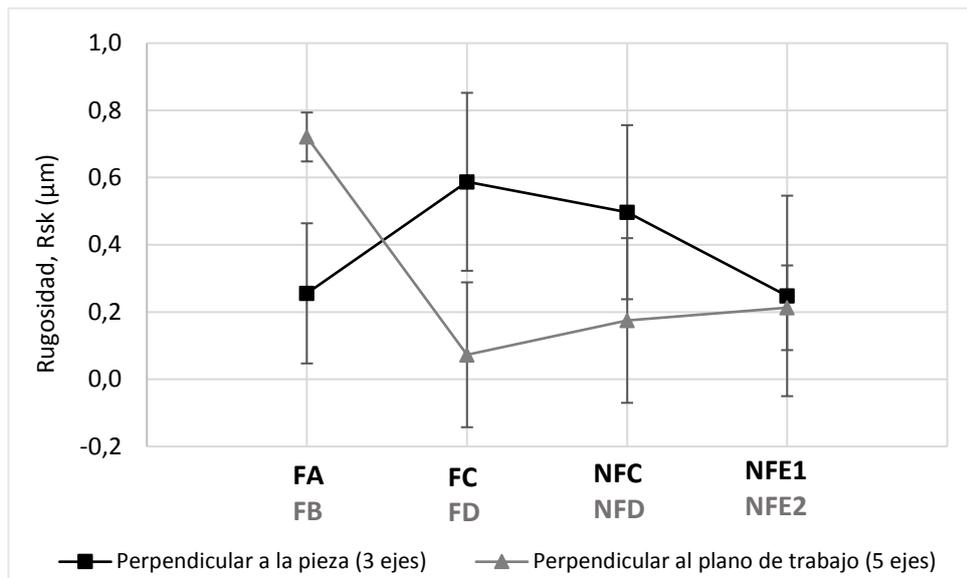


Figura 54.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Rsk en la fresadora de 3 y 5 ejes.

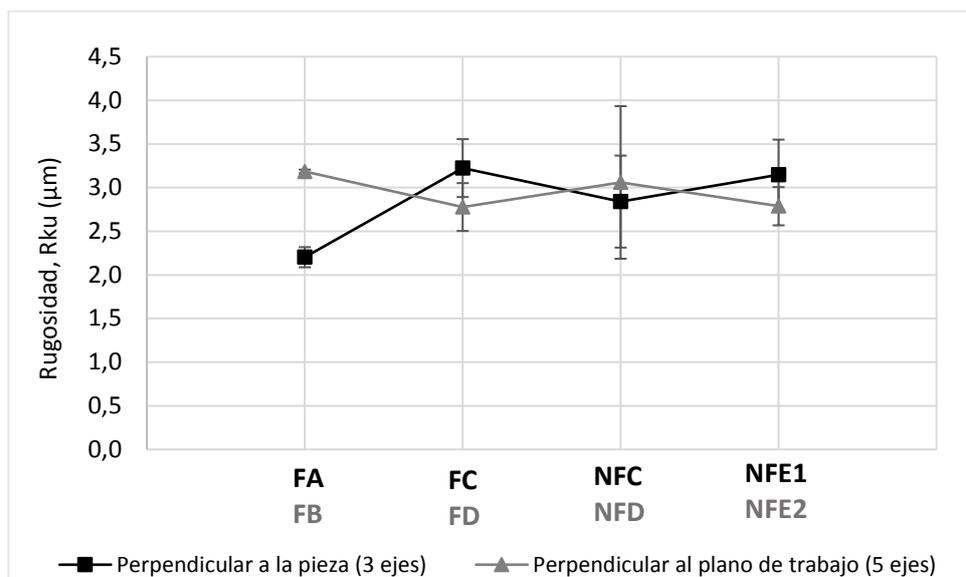


Figura 55.- Gráfico comparativo de los resultados obtenidos de Rku en la fresadora de 3 y 5 ejes.

3.2.5. Discusión de resultados

En primer lugar, en la **Tabla 7** se encuentran las medias de los distintos resultados de rugosidad encontrados junto con su desviación normal. En ella puede verse que para cada muestra bruñida existen valores de rugosidad bastante dispares, sobre todo en las muestras NFA y NFB, para las que se obtiene valores de $1\mu\text{m} < Ra < 2\mu\text{m}$ y para las que debería haberse reajustado (según la **Tabla 2** adjunta en el apartado 2.1.3 Rugosímetro de este documento) el valor de *cut-off* (λ_c) a 0,8 mm en vez de 0,25. Por ello, los valores de dichas muestras han sido considerados como “no válidos” y no ha sido contabilizados para realizar los gráficos.

Por otro lado, los distintos gráficos adjuntos, muestran las diferencias de acabado superficial encontradas en función si la superficie ha sido bruñida con una fresadora de 3 ejes o de 5. En ellos puede verse como se obtienen mejores resultados cuando se trabaja con una máquina de 5 ejes.

Del mismo modo, si nos centramos en la Ra (**Figura 51**), podemos ver que comparando las líneas obtenidas para un caso u otro, existen puntos muy separados entre sí (como es el caso de las muestras FC y FD) y muy juntos (como es el caso de FA y FB) esto es debido a que cuando se trabaja con la fresadora de 3 ejes la fuerza aplicada sobre la superficie no se mantiene constante a lo largo del proceso, ya que, al trabajar en las zonas con inclinación, se genera un vector de fuerzas. Dicho vector hace que la fuerza aplicada en las zonas inclinadas sea inferior a la establecida para el proceso. Por ello, si se comparan FA (bruñida con 3 ejes) y FB (bruñida con 5 ejes) se obtienen valores muy similares, ya que se trata de las muestras horizontales y que, en ambos casos, son bruñidas perpendicularmente a la superficie. En cambio, si se comparan las muestras FD y FC, se observa una clara diferencia entre rugosidades. En este caso cuando se bruñe con 3 ejes (muestra FC) el proceso se realiza con cierto

ángulo sobre la muestra, recibiendo menor fuerza de bruñido que cuando se trabajara perpendicularmente a la superficie, como es el caso de la muestra FD realizada con la fresa de 5 ejes. La **Figura 52** y **Figura 53**, siguen la misma tendencia que en el caso descrito. Por lo que trabajar con una fresa de 5 ejes será favorable cuando se requieran rugosidades bajas.

Por último, se adjuntan los gráficos referentes a Skewness (Rsk) y Kurtosis (Rku) (**Figura 54** y **Figura 55** respectivamente) donde se obtienen valores razonables, ya que los valores Rsk se mantiene relativamente cercanos a 0, mientras que Rku se mueve alrededor de los $3\mu\text{m}$.

3.3. Resumen de resultados

En este apartado se resumen en forma de tabla la mejor combinación de parámetros obtenida en cada uno de los experimentos.

Tabla 9.- Resumen mejores valores de rugosidad obtenidos en el experimento 1.

Muestra	F (N)	n (rpm)	b (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Ssk (μm)	Sku (μm)
M5.C	25	900	0,015	0,332	2,193	0,407	0,357	3,112
M4.B	25	600	0,015	0,346	1,726	0,419	0,124	3,005

*Los valores que se muestran en esta tabla son comparables cuando se trabaje sobre una pieza de acero 1045, con una inclinación de 2° , en las condiciones ensayadas.

Tabla 10.- Resumen mejores valores de rugosidad obtenidos en el experimento 2.

Muestra	F (N)	n (rpm)	b (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)	Rsk (μm)	Rku (μm)
FD (5E)	90	10	0,25	0,339	1,885	0,420	0,073	2,777
NFD (5E)	90	10	0,25	0,368	1,916	0,464	0,175	3,059

*Los valores que se muestran en esta tabla son comparables cuando se trabaje con piezas de acero 1045 y bajo las mismas condiciones de trabajo que en los ensayos.

4. Análisis del impacto ambiental

Existen cuatro aspectos fundamentales que caracterizan el impacto ambiental de este proyecto: el consumo energético de las distintas máquinas usadas, la reutilización de las muestras, el desgaste de las herramientas y la gestión de los residuos generados a lo largo de la ejecución del trabajo. A continuación, se analizan y describen cada uno de los factores que se han tenido en cuenta.

El consumo energético de las máquinas va asociado directamente con el uso de la fresadora CNC disponible en el taller, con la que se han bruñido las distintas muestras, así como con el uso del rugosímetro óptico, puesto que son las dos herramientas que más se han usado a lo largo del proyecto. Se trata de un tipo de consumo inevitable debido a que dichas máquinas son las encargadas de sustentar toda la parte práctica de este trabajo y, sin ellas, no habría muestras que analizar. Por ello, es necesario optimizar al máximo los procesos de mecanizado a realizar. Del mismo modo, es necesario destacar que las salas de trabajo no disponen de luz natural, por lo que cuentan con iluminación artificial y ventilación ininterrumpida, esto conlleva un gasto energético adicional.

En cuanto a las muestras, se trata de dos bloques de acero 1045. Este tipo de acero es fácilmente reutilizable y una vez usado para su principal objetivo en este proyecto, puede ser reutilizado en otro trabajo, pudiéndose cortar con otras dimensiones y volviéndolo a ensayar sin problemas. También existe la posibilidad de desecharlo a una empresa encargada de gestionar este tipo de residuos y que puedan devolverlo a la vida útil.

El desgaste de las herramientas usadas es otro elemento a tener en cuenta cuando se habla del impacto medioambiental de este proyecto. En este caso, no se ha llegado a desechar ninguna punta de bruñido, aun así, estas están hechas de metal duro, un material difícilmente reciclable y muy costoso (medioambientalmente hablando) de fabricar debido a la cantidad de CO₂ que desprende a la atmósfera y la energía que requiere para su fabricación. Por eso, con la finalidad de reducir al máximo el número de puntas desechadas, igual que en el caso anterior, es necesario optimizar cuanto se pueda el proceso de mecanizado, evitando un desgaste innecesario de la herramienta.

Por último, a lo largo del proyecto, se han generado varios tipos de residuos debidos al mecanizado de las piezas. Aunque el bruñido se trate de un proceso que no conlleva pérdida de material por arranque de viruta, requiere de un sistema de refrigeración y lubricación como lo es el uso de *Taladrina*. Se trata de una mezcla de agua y aceites que, tras su uso, vuelve al depósito para ser reutilizada. Aun así, tras un uso reiterado, esta pierde sus propiedades y debe desecharse. En ese caso, conviene deshacerse adecuadamente de dicho líquido, ya que se trata de un residuo catalogado como peligroso, provocando graves daños medioambientales en caso contrario.

5. Conclusiones

En este proyecto se ha analizado la calidad superficial que deja una nueva herramienta de bruñido de puntas intercambiables sobre una pieza de características complejas con la finalidad de encontrar los parámetros óptimos de funcionamiento cuando se trabaja con acero AISI 1045. A continuación, se presentan las conclusiones que se han podido extraer de este estudio:

(1) Se ha logrado establecer un proceso de estudio de súper-acabados usando una nueva herramienta de bruñido que ha proporcionado unos resultados factibles y acordes a lo esperado.

(2) Tras realizar y analizar los distintos ensayos descritos en este proyecto, se demuestra que la herramienta es capaz de dejar acabados superficiales con valores de R_a inferiores a $0,6\mu\text{m}$ cuando se trata de una superficie compleja de acero AISI 1045. Por lo contrario, la calidad superficial empeora cuando se trabaja en superficies planas (no complejas) obteniendo valores superiores a $0,8\mu\text{m}$, por lo que no se recomienda su uso cuando se requieran rugosidades inferiores a dicho valor de R_a .

(3) Del experimento 1 se concluye que: la herramienta trabaja mejor a mayores velocidades de revolución ($n > 600\text{rpm}$), obteniendo valores mayores de R_a que cuando se trabaja con velocidades inferiores. Por lo contrario, a mayores valores de fuerza, peores valores de rugosidad. Este último factor queda pendiente de acabar de analizar más profundamente, ya que no se pudo proseguir correctamente con los experimentos hasta determinar los parámetros óptimos. Por lo que refiere al paso lateral de la herramienta, no se destaca como factor determinante en el acabado final de la pieza.

(4) Del experimento 2 se concluye que: se obtienen mejores acabados superficiales cuando se trabaja con superficies complejas y con una fresadora de 5 ejes. Siendo el caso más favorable el de la muestra NFD con $R_a = 0,368\mu\text{m}$, situada en una zona con cierta inclinación y bruñida de forma perpendicular al plano de trabajo con la fresadora de 5 ejes, configuración (b) más (e). Para los casos en que se usa una fresadora de 3 ejes, se concluye que cuando se trabaja en superficies complejas se obtienen valores similares a los obtenidos con la fresadora de 5 ejes, siendo el caso más favorable NFC con $R_a = 0,492\mu\text{m}$. Sin embargo, cuando se está tratando con superficies planas, los resultados que se obtienen pueden categorizarse de “no aceptables” cuando se buscan calidades superficiales con $R_a < 0,8\mu\text{m}$, siendo el caso más favorable el de la muestra FA con $R_a = 0,971\mu\text{m}$.

(5) Se considera que la tecnología de bruñido es capaz de proporcionar súper-acabados en moldes y matrices de geometría compleja siempre que se use la herramienta con la configuración adecuada tal y como se comenta con anterioridad.

(6) Debido a una clara falta de recursos (a causa de la rotura y mantenimiento de maquinaria) y de tiempo no ha sido posible encontrar los parámetros óptimos de trabajo de la herramienta, aunque si

existen varios parámetros que mejoran drásticamente la calidad superficial de la pieza como se ha comentado en puntos anteriores. Por ello, se considera que esta nueva herramienta debería ser objeto de otro proyecto que permitiera continuar con la investigación y cumplir con dicho objetivo.

6. Análisis económico

En este capítulo se desglosan los costes asociados a este proyecto. En él, se consideran las horas de trabajo dedicadas a la realización y estudio de las muestras, redacción de informe y costes vinculados al material y maquinaria usada, así como de software y subcontratación externa para la realización de las muestras del experimento 2.

Tabla 11.- Presupuesto aproximado de este proyecto.

Concepto	Precio Unitario	Cantidad	Total (€)
Mano de obra			
Ingeniero Junior	30 €/h	540	16.200,00
Ingeniero Senior	50 €/h	50	2.500,00
Técnico Junior CAM	40 €/h	10	400,00
Técnico Laboratorio	30 €/h	60	1.800,00
Operario CNC	25 €/h	20	500,00
Subcontratación de técnico CNC en CFP	30 €/h	10	300,00
Coste total de mano de obra			21.700,00
Material			
Barra de Acero C45 (400x900x1000)	50 €/ud.	1	50,00
Barra de Acero C45 (125x80x70)	50 €/ud.	1	50,00
Herramienta de fresa bola Ø10mm	150 €/ud.	1	150,00
Herramienta de bruñido Ø3mm	130 €/ud.	1	130,00
Subtotal material			380,00
Coste aproximado por el uso de material tipo: taladrina, elementos de limpieza de la muestra, etc. (5%)			19,00
Coste total de material			399,00
Amortización de los equipos/maquinaria			
Fresadora CNC	70,00 €/h	20	1.400,00
Rugosímetro óptico	55,00 €/h	25	1.375,00
Perfilómetro	35,00 €/h	10	350,00
KISTLER	15,00 €/h	5	75,00
Coste total de amortización			3.200,00
Software (Licencias)			
Fusion 360	503,00 €/ud.	1	503,00
SolidWorks	6.600,00 €/ud.	1	6.600,00
Microsoft Office	99,00 €/ud.	1	99,00
Climatron CAM	10.000,00 €/ud.	1	10.000,00
Coste total de Software			17.202,00
Coste neto del proyecto			35.299,00
IVA (21%)			7.412,79
COSTE TOTAL			42.711,79

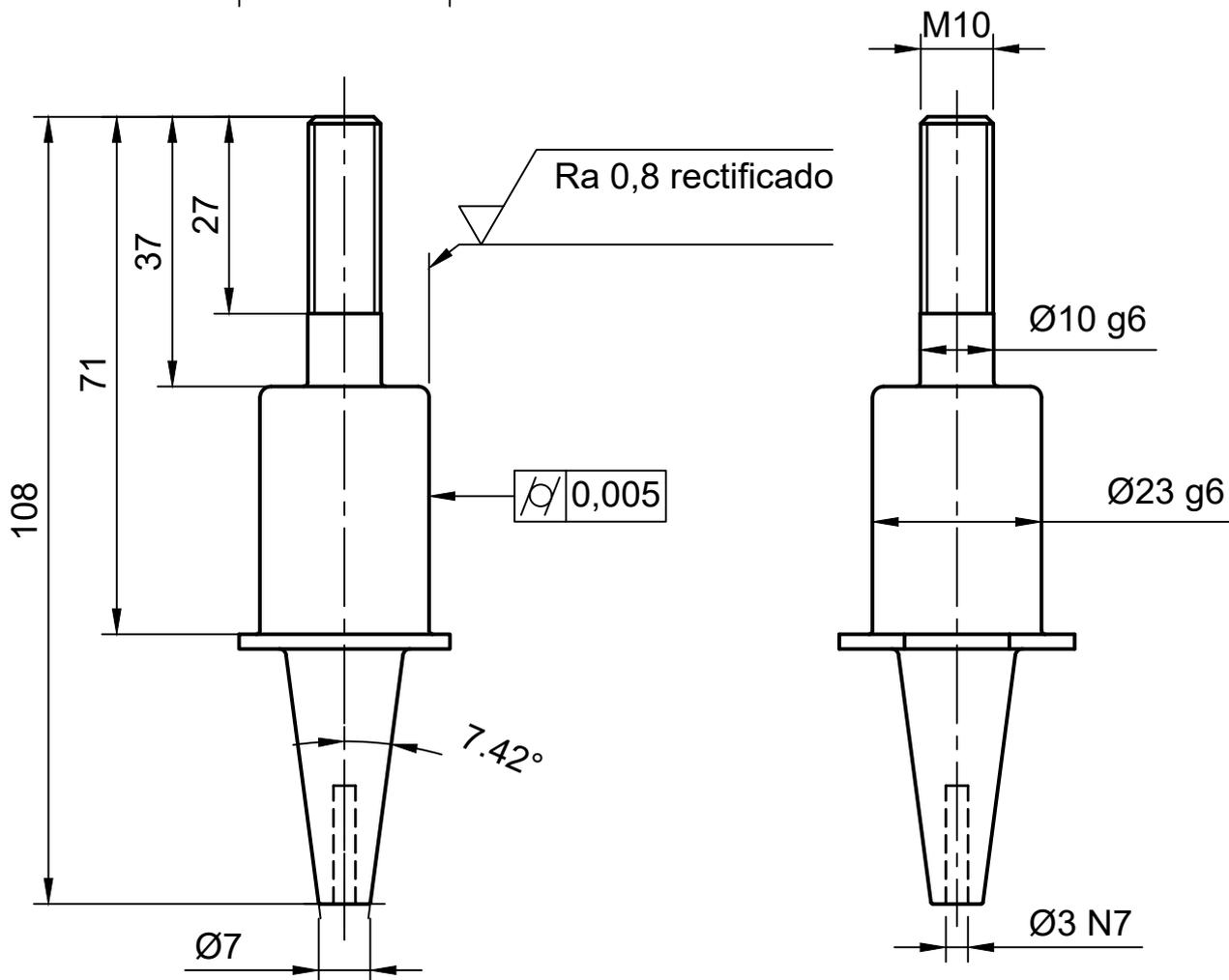
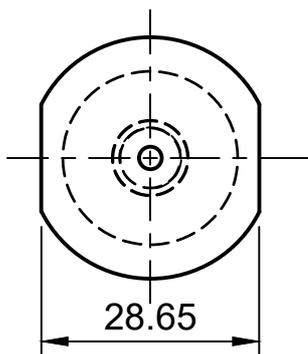
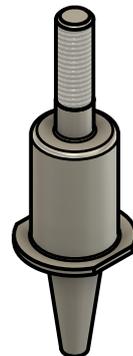
Bibliografía

- [1] J. A. Travieso Rodríguez, H. A. González Rojas, G. Gómez Gras, A. E. Nápoles Alberro, and A. J. Sánchez Egea, "Influencia del proceso de bruñido con bola sobre la dureza y las tensiones residuales en el aluminio A92017," 2012.
- [2] J. A. Travieso Rodríguez, "Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas, aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola)," Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2010.
- [3] R. Jerez-mesa, J. A. Travieso-rodríguez, G. Gómez-gras, and J. Llumà-fuentes, "Efectos del bruñido con bola acustoplástico sobre la integridad superficial de Ti6Al4V.," A: Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. "XXII CNIM - Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica," 2018.
- [4] A. S. Andretich, "Tecnología Mecánica," [En línea], Disponible en: <https://es.slideshare.net/andresandretich/mecanizado-con-y-sin-arranque-de-virutas>, [Accedido: 26-Octubre-2021].
- [5] "NEOLOGIQ Machining Intelligently," [En línea], Disponible en: <https://www.iscarib.es/Products.aspx/countryid/14/ProductId/12112> , [Accedido: 28-Octubre-2021].
- [6] "Conformacion Por Arranque De Viruta," Universidad Carlos III de Madrid, 2020.
- [7] "Mecanizado sin arranque de viruta: ¿qué es y qué usos tiene?," [En línea], Disponible en: <https://ferrosplanes.com/mecanizado-sin-arranque-de-viruta-que-es-y-que-usos-tiene/> , [Accedido: 03-Noviembre-2021].
- [8] J. A. Travieso Rodríguez, "Tema 2: Metrología y Calidad," Slides Teoría de la asignatura de Fabricación, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- [9] J. Marqués Salvador, "Trabajo de final de grado Grado en Ingeniería Mecánica Herramienta para súper-acabado de moldes y matrices para inyección," Trabajo de Final de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2019.
- [10] "Medición de la rugosidad superficial: Parámetros," [En línea], Disponible en: [https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=009](https://www.olympus-ims.com/es/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=009), [Accedido: 11-Octubre-2021].
- [11] R. Fort, M. Álvarez de Buergo, C. Vázquez-Calvo, and L. S. Gómez-Villalba, "Análisis de la microrugosidad mediante técnicas portátiles: aplicaciones y casos de estudio en patrimonio," Artículo en La Ciencia y el Arte IV. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio, Instituto de Geociencias, pág.198-216, 2012.
- [12] C. F. Oriol and M. G. Manel, "Rediseño y puesta a punto de una herramienta de bruñido con bola para torno.," Trabajo de Final de Grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.

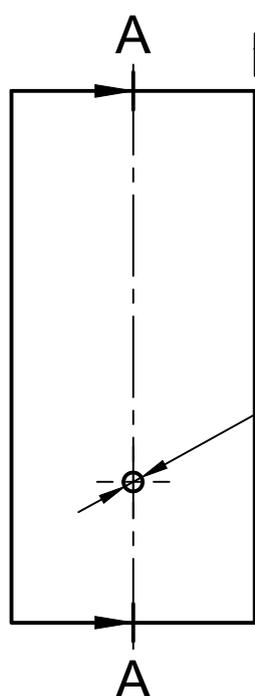
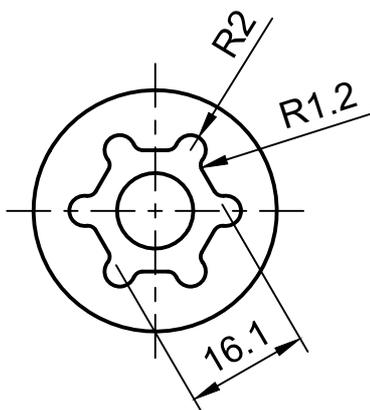
- [13] AUTODESK, "FUSION 360. Software CAD, CAM, CAE y PCB integrado.," [En línea], Disponible en: <https://www.autodesk.es/products/fusion-360/overview>, [Accedido: 29-Noviembre-2021].

Anexo A. Planos de la herramienta.





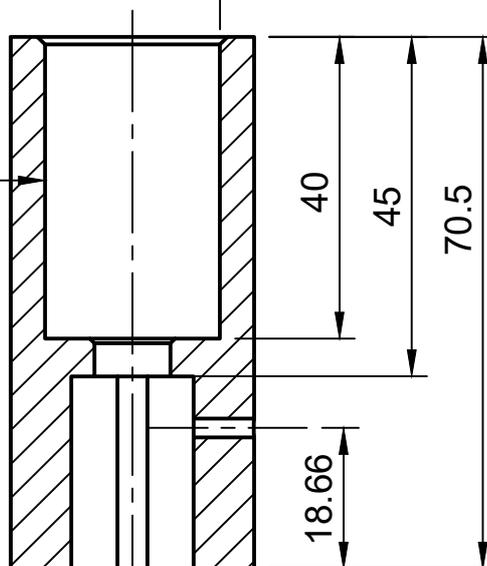
Dept.	Technical reference	Created by Jordi Marqués 20/01/2020	Approved by	
		Material 1.2344/X40CrMoV5-1	Document status	
		Title slider central	General tolerances Tolerancias generales acorde con IT7 ISO 286-2 . Ra general 1.6	
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/1



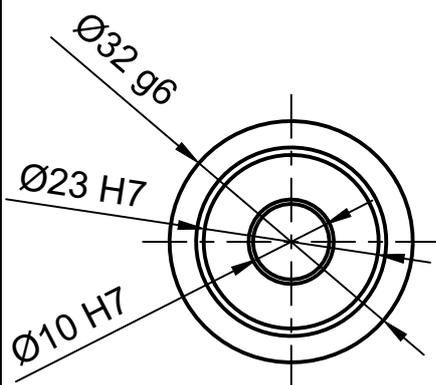
Ra 0,8 Rectificado

\sqrt{R} 0,005

$\varnothing 2.5$



A-A (1:1)



Dept.	Technical reference	Created by Jordi Marqués 20/01/2020	Approved by	
		Material 1.2344/X40CrMoV5-1	Document status	
		Title cilindro base 32x20x50,5 v13	General tolerances Tolerancias generales acorde con IT7 ISO 286-2 . Ra general 1.6	
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/1

Anexo B. FUSION 360.

B1. Guía para la Instalación de FUSION 360

En esta guía anexa se describen los pasos a seguir para el diseño de una muestra cualquiera y su posterior simulación en el programa y extracción del código para su uso en la máquina CNC.

1. El programa FUSION 360 dispone de dos tipos de licencia: una disponible para cualquier tipo de usuario que quiera disponer de dicho software (pagando) y otra gratuita para estudiantes que dispongan de una cuenta vinculada a una entidad colaboradora. Para descargar la versión gratuita, será necesario acceder al siguiente [link](#) (si el enlace directo no funciona, vaya a la siguiente dirección: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/personal>).
2. Una vez aquí se debe crear una cuenta Autodesk que os permitirá iniciar sesión en el programa. Para ello, se debe clicar en la esquina superior derecha de la pantalla e iniciar sesión como se ve en la imagen a continuación.

The image shows two parts of the Autodesk web interface. On the left is the 'Iniciar sesión' (Login) page, which has a text input for 'Correo electrónico' (Email) containing 'name@example.com' and a blue 'SIGUIENTE' (Next) button. Below the button is a link that says '¿NUEVO EN AUTODESK? CREE UNA CUENTA' (New to Autodesk? Create an account), where 'CREE UNA CUENTA' is circled in red. A red arrow points from this link to the 'Crear cuenta' (Create account) form on the right. The 'Crear cuenta' form is titled 'Crear cuenta' and has the Autodesk logo in the top right. It contains several input fields: 'Nombre' (Name) and 'Apellido' (Surname) as separate boxes; 'Correo electrónico' (Email) with the value 'nombre.apellido@estudiantat.upc.edu' and a blue checkmark; 'Confirmar correo electrónico' (Confirm email) with the same value and checkmark; and 'Contraseña' (Password) with a masked input field. Below these fields is a checkbox that is checked, with the text 'Acepto las condiciones de uso de Autodesk y confirmo la declaración de privacidad.' (I accept the Autodesk terms of use and confirm the privacy declaration). At the bottom of the form is a blue 'CREAR CUENTA' (Create account) button.

Figura 56.- Pantalla de inicio de sesión / crear cuenta en Autodesk.

3. Una vez creada la cuenta, Autodesk se mandará un código a la dirección de correo facilitada con el objetivo de verificar la cuenta. Solo es necesario seguir las indicaciones que Autodesk y el correo facilitan.

- Tras verificar vuestra identidad, se abrirá una nueva pestaña en la que se tendrá que acabar de completar vuestra información. Como la que se muestra a continuación:

Complete your Fusion 360 for personal use download

* First Name	* Last Name
<input type="text"/>	<input type="text"/>
* Country	* Zip/Postal Code
<input type="text" value="Spain"/>	<input type="text"/>
* Phone	* Email
<input type="text"/>	<input type="text"/>

I agree to the Autodesk [Terms of Use](#) and acknowledge its [Privacy Statement](#).

I would like to opt-in to receive Industry News, Trends, Events, and Offers from Autodesk. (You can [unsubscribe](#) at any time).

NEXT →

This site is protected by reCAPTCHA and the Google [Privacy Policy](#) and [Terms of Service](#) apply.

Figura 57.- Ficha de datos personales para completar la instalación.

Acto seguido se os mostrará el link de descarga:

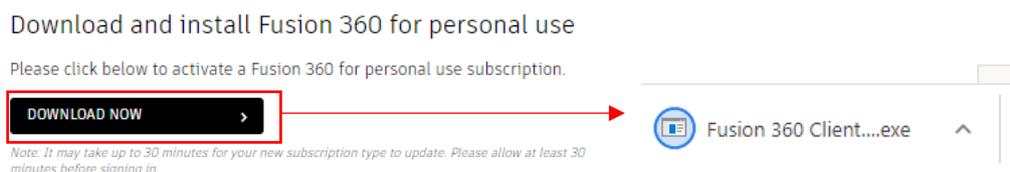


Figura 58.- Pestaña para la descarga de FUSION 360.

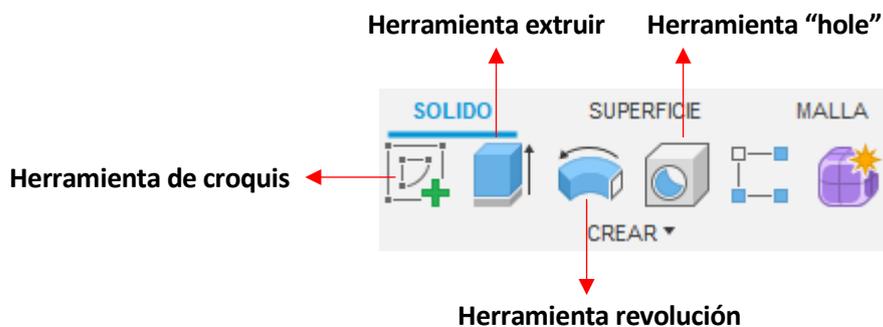
- Una vez descargado el enlace, es necesario ejecutarlo. Abrid el programa. Será necesario iniciar sesión con la cuenta creada con anterioridad y configurar la instalación. Esto puede llevar unos minutos. Una vez facilitados los datos, FUSION 360 ya estará operativo.

B2. Guía para la simulación del programa

FUSION 360 dispone de varias herramientas que permiten diseñar el modelo a mecanizar y establecer los distintos parámetros para su simulación y posterior mecanizado. A continuación, se describen los pasos seguidos para el diseño de las muestras.

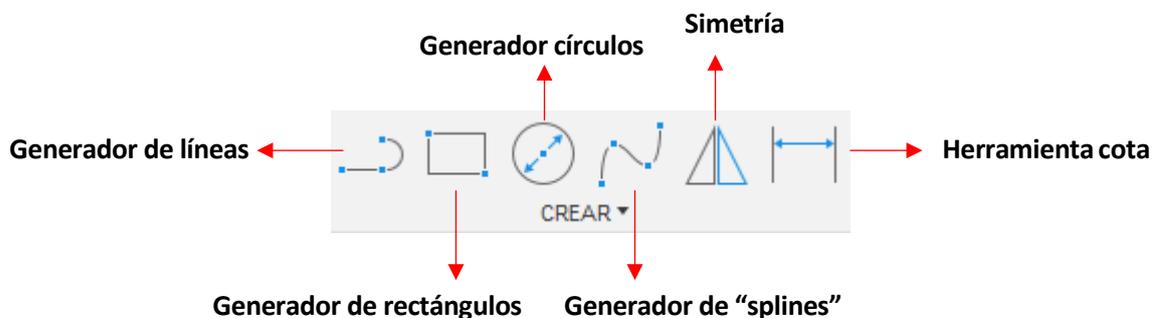
- **Creación del bloque en bruto inicial**

En la parte superior de la pantalla encontramos varias herramientas (véase figura adjunta) que permiten diseñar en 2D un elemento y poder generar la versión 3D del mismo.



En este caso, se han usado la herramienta croquis para generar el croquis 2D de la base de la pieza y la herramienta “extruir” para darle volumen al elemento.

Una vez seleccionada la herramienta de croquis, es necesario determinar el plano en el que se quiere trabajar. Se disponen de las siguientes herramientas de croquis:



En este caso, debido a la simplicidad del elemento, se ha usado únicamente el elemento generador de rectángulos. El procedimiento se adjunta a continuación:

1. Se crea el croquis 2D del bloque en el plano seleccionado y ajustando las medidas con la opción “cota”. Para obtener los resultados esperados, se debe diseñar el bloque final que queremos obtener, no el bloque en bruto inicial.

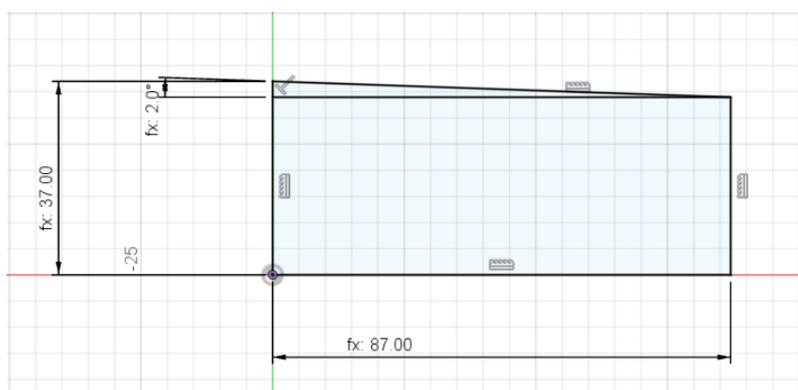


Figura 59.- Croquis 2D de la vista lateral del bloque de acero 1045 a mecanizar.

2. Se extruye el perfil mediante la herramienta extruir, hasta obtener una figura en 3D con las dimensiones establecidas en el diseño de ensayos como se muestra en la imagen adjunta.

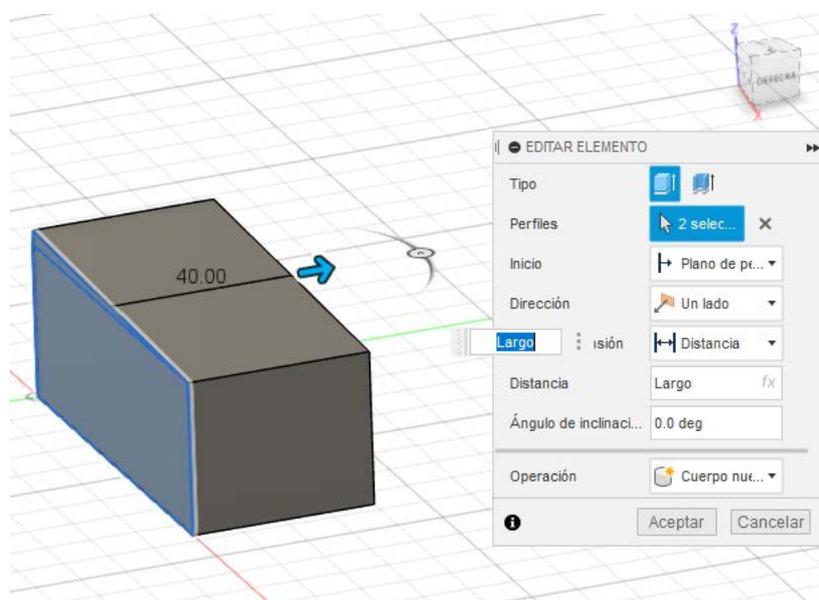


Figura 60.- Extrusión de los perfiles 2D generados.

Como puede verse en la imagen, es necesario seleccionar los perfiles que se quieren tratar y definir hasta que profundidad se quiere extruir el elemento. **Importante:** la opción “Operación” debe estar marcada con la pestaña de “Cuerpo nuevo”.

3. Para poder maniobrar mejor las distancias en la máquina CNC, es necesario crear un punto de referencia plano que facilite establecer las coordenadas iniciales des de las cuales iniciara y finalizará el proceso de mecanizado. Por ello, se debe generar un corte para reducir parte del material en la zona más alta de la pieza.

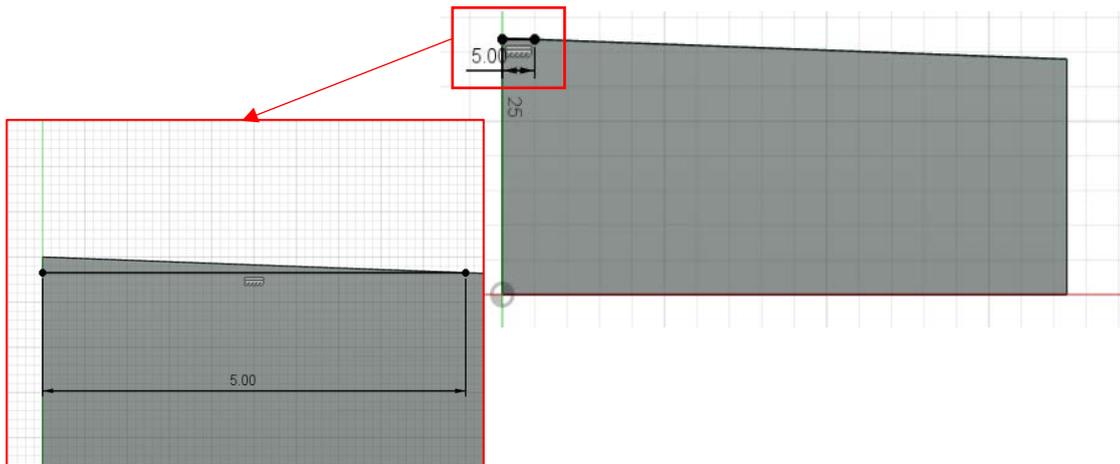


Figura 61.- Croquis para extraer y aplanar parte del material de la pieza.

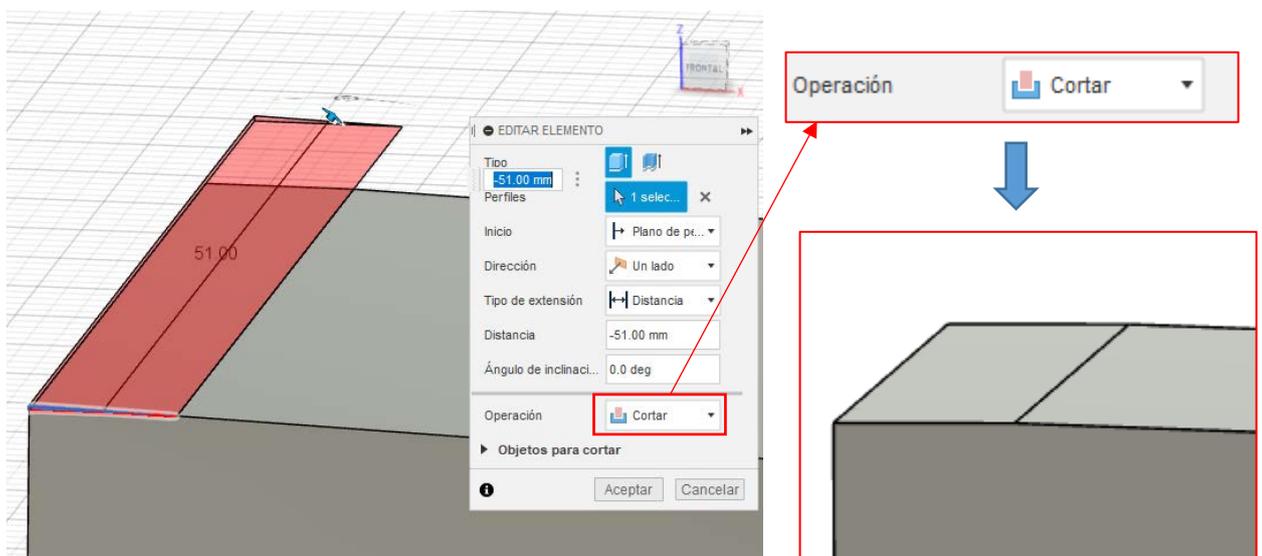


Figura 62.- Extrusión corte del croquis generado.

4. Generar el patrón de la muestras que se bruñirán posteriormente. Se realiza un croquis inicial a partir del cual se genera un patron rectangular. Para crear el croquis, se selecciona el plano inclinado como plano de trabajo.

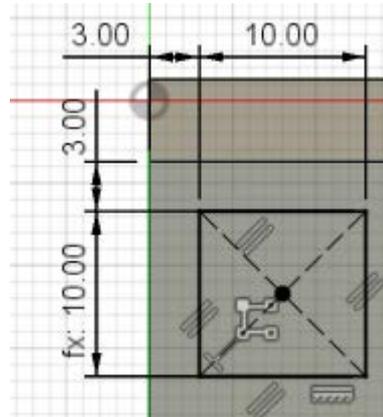


Figura 63.- Croquis de muestra individual.

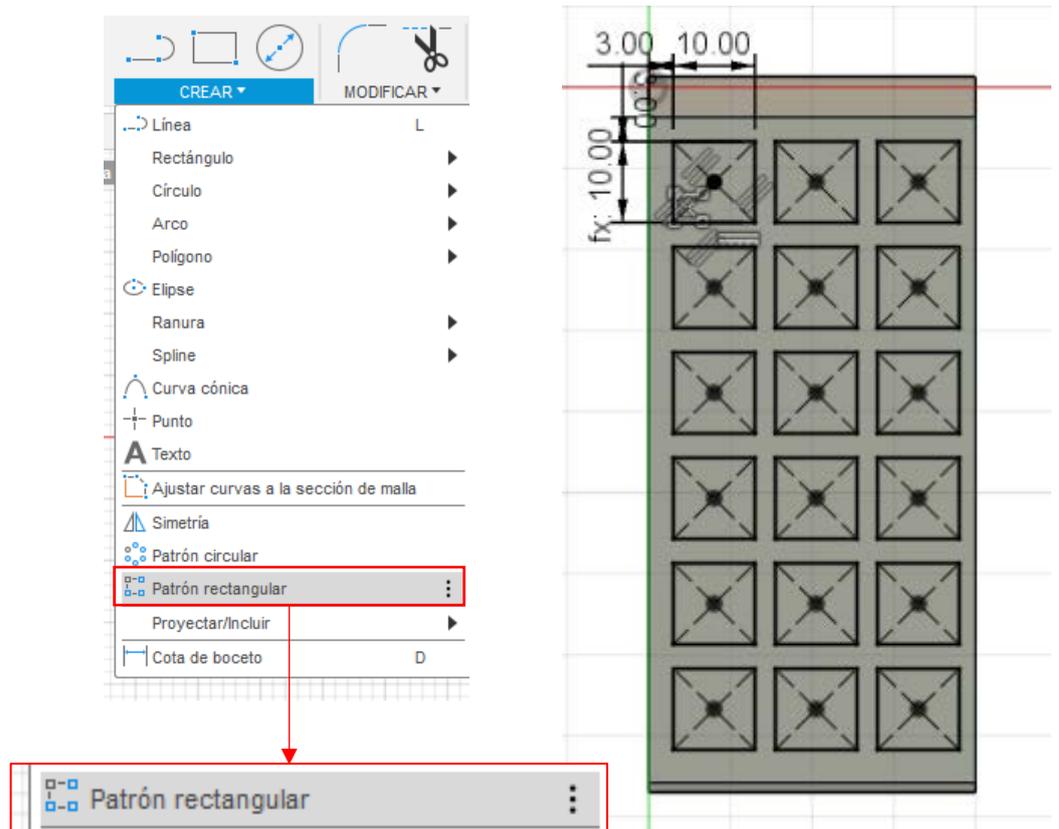


Figura 64.- Diseño del patrón de muestras a bruñir.

- **Simulación del fresado de la pieza**

Para iniciar con el proceso de simulación, es necesario cambiar de modo de trabajo en el FUSION 360 mediante la pestaña de “Diseño”.

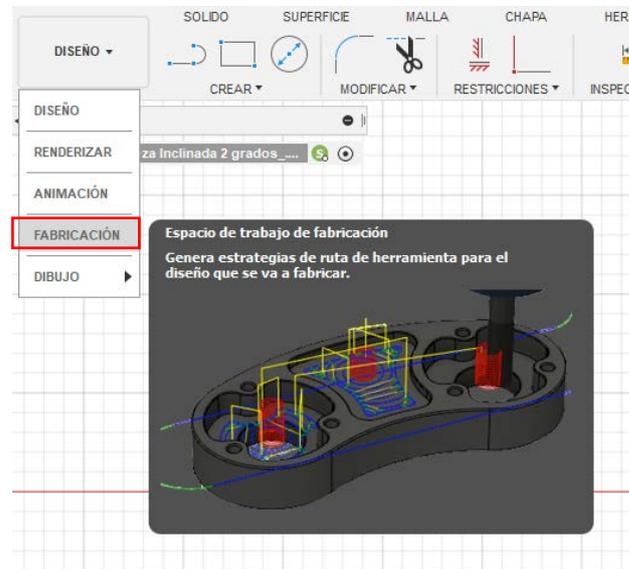


Figura 65.- Cambio a pestaña de fabricación.

Una vez cambiado al modo de fabricación, se procede a simular tanto la fase de fresado como la bruñido, cada una por separado. Se usan en todo momento estrategias de mecanizado de tipo 3D debido a la naturalidad de la pieza.

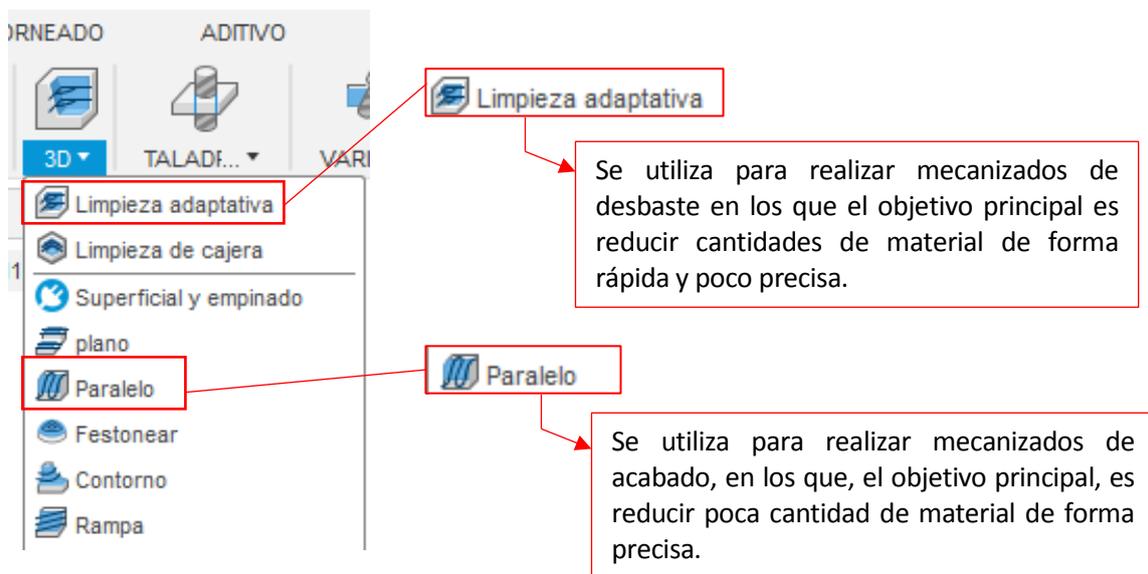


Figura 66.- Descripción de estrategias usadas en el proyecto.

1. Se realiza un fresado de desbaste de la pieza hasta obtener las dimensiones finales deseadas mediante la herramienta de limpieza aditiva. Esto, nos permite reducir el material sobrante hasta obtener la superficie inclinada.

Para ello, es necesario establecer distintos parámetros: herramienta a utilizar, velocidad de giro, de avance, superficie de trabajo, etc. Para determinar una herramienta, es necesario implementarla en el programa previamente, como se describe a continuación:

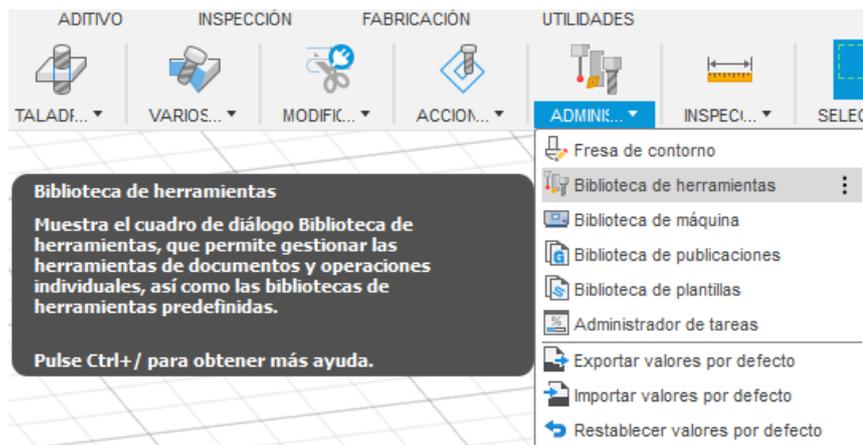


Figura 67.- Pestaña "Administrar Biblioteca de Herramientas".

Dentro de biblioteca de herramientas, se añade una nueva herramienta con las características correspondientes a esta.

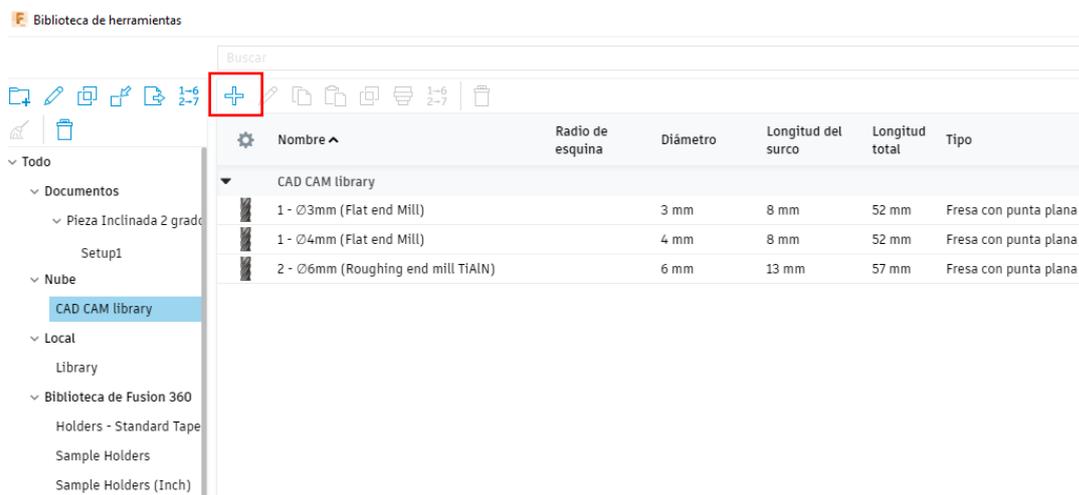


Figura 68.- Pantalla de insertar nueva herramienta.

Nueva herramienta

Fresado



Perforación de agujero



Torneado

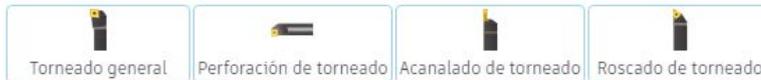


Figura 69.- Pliego de herramientas disponibles en FUSION 360.

Biblioteca de herramientas

CAD CAM library / 3 - Ø10mm (Fresa con punta de bola)

General | **Cortador** | Eje | Soporte | Datos de corte | Posprocesador

Tipo	Fresa con punta de bola
Unidad	Milímetros
Rotación del eje en sentido hor...	<input checked="" type="checkbox"/>
Número de acanaladuras	3
Material	HSS
Geometría	
Diámetro	10 mm
Diámetro del eje	10 mm f_x
Longitud total	50 mm
Longitud por debajo del soporte	50 mm
Longitud del saliente	30 mm
Longitud del surco	20 mm

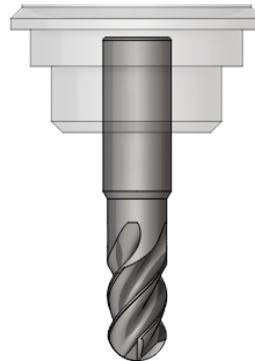


Figura 70.- Ficha técnica de la herramienta seleccionada para el mecanizado.

Los datos técnicos y de funcionamiento de la herramienta se obtienen de las fichas técnicas asociadas a cada “broca” que vienen dadas en la propia página web del elemento. Una vez completada la ficha técnica de la herramienta, ya podrá seleccionarse en el programa.

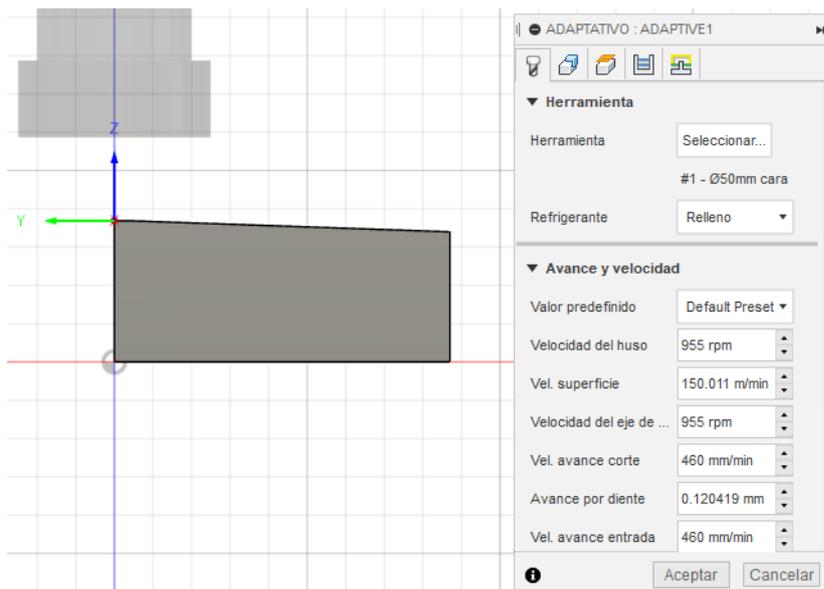


Figura 71.- Pantalla para establecer la herramienta de fresado.

Se deben establecer también los límites de mecanizado de la pieza y herramienta. Por ello, se establecen los siguientes parámetros: altura de retracción de la herramienta, parte superior del material (en bruto), de la herramienta, etc., como se muestra a continuación:

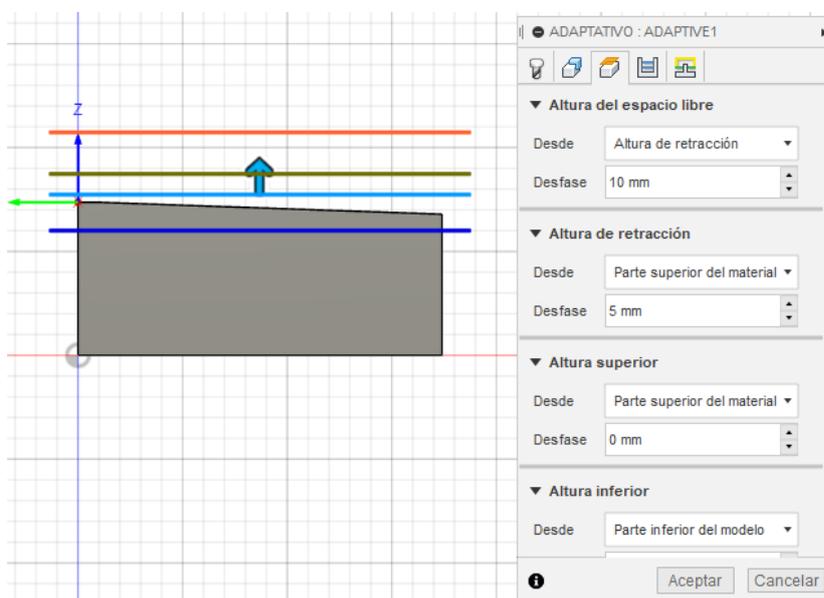


Figura 72.- Pantalla para establecer los límites de trabajo.

Una vez establecidos los parámetros, se simula la acción para comprobar que no se produce ningún error.

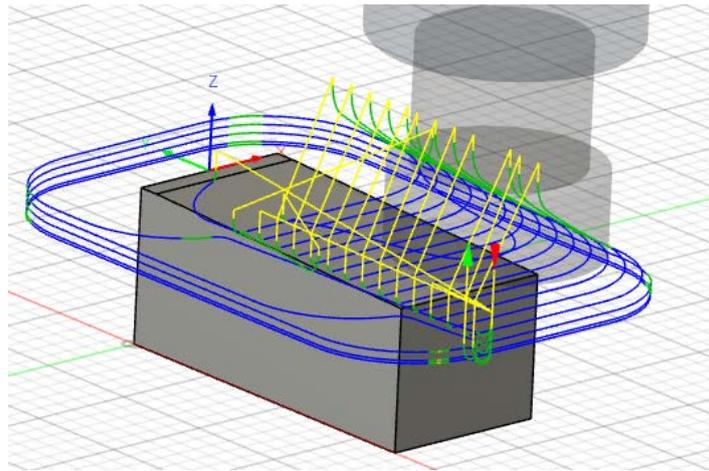


Figura 73.- Simulación del proceso de fresado de desbaste.

Se repite el procedimiento anterior para el acabado de acabado.

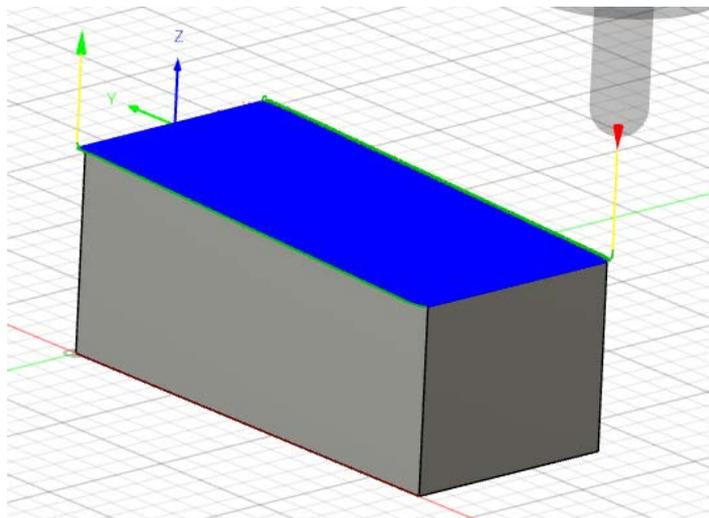
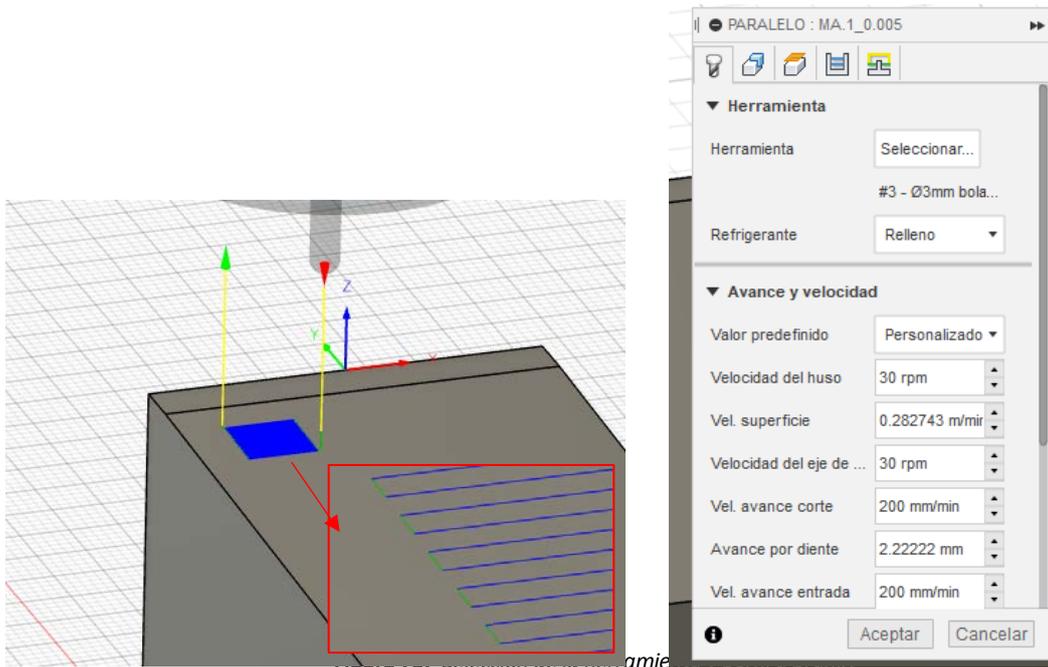


Figura 74.- Simulación del proceso de fresado de acabado.

- **Simulación del bruñido de las muestras**

Para el bruñido de las muestras seguimos el mismo procedimiento que en los casos anteriores, pero la estrategia usada en este caso es la “paralelo” mencionada con anterioridad. Para ello, igual que en el caso del fresado, se selecciona el perfil sobre el cual se quiere realizar el bruñido.

Se debe establecer también la herramienta de bruñido adecuada, en este caso usaremos una herramienta de bola de 3mm de diámetro.



Además, en este caso se debe tener en cuenta que el proceso de bruñido debe hacerse perpendicular al proceso de fresado, dato que debe constatar en el programa. A su vez, cada muestra tiene un paso lateral distinto y también debe señalarse.

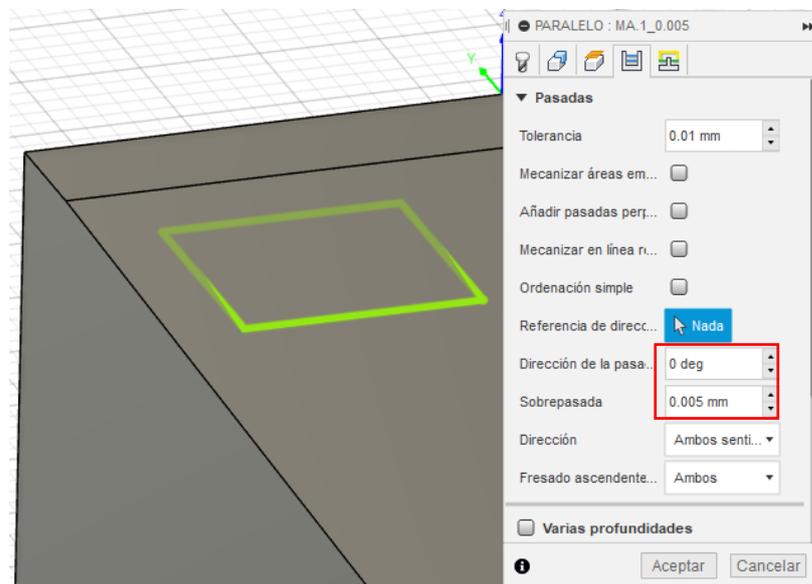


Figura 76.- Pantalla para establecer la dirección de bruñido y paso lateral.

Una vez generada la simulación de cada una de las muestras, es necesario descargar el código de mecanizado que deberá copiarse en una unidad *drive* para pasarla a la fresadora CNC, quien ejecutará el código. Para ello, es necesario hacer *click* derecho sobre el *setup* (simulación) generado y

seleccionar la opción “Ejecutar postprocesamiento posterior”. Se abrirá una pestaña en la que se debe nombrar el archivo y señalar en que carpeta quiere guardarse (véase figura adjunta).

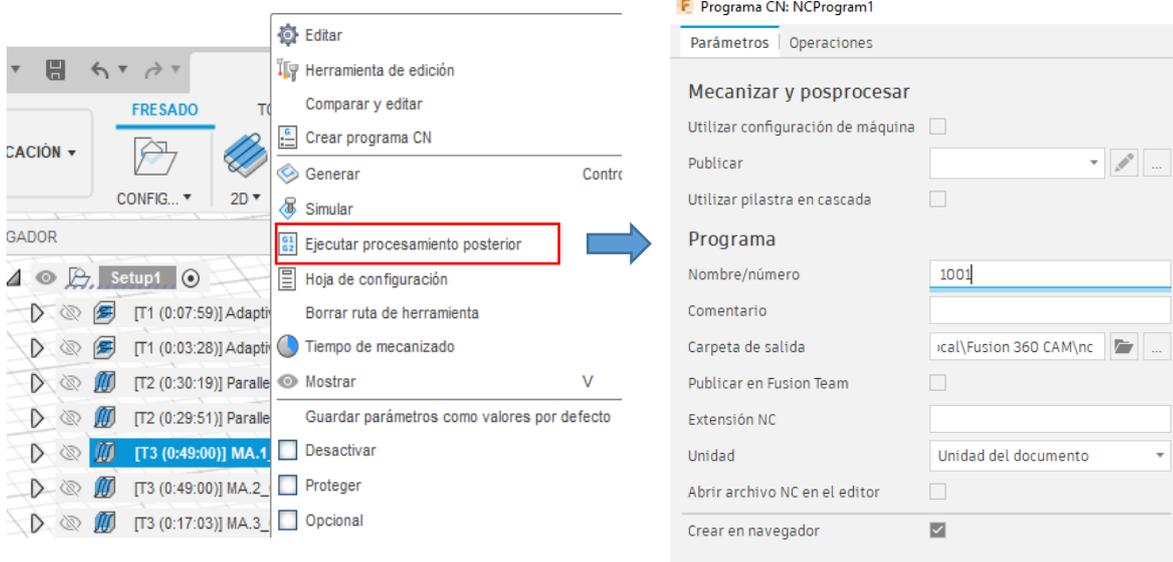


Figura 77.- Herramienta de postproceso del código asociado a un setup.

Es necesario seleccionar también, el lugar donde quiere ejecutarse o, como se muestra en la figura anterior, “Publicar”. En este caso, la máquina de la que dispone en el taller es una fresadora FAGOR, por lo que se hace lo siguiente:

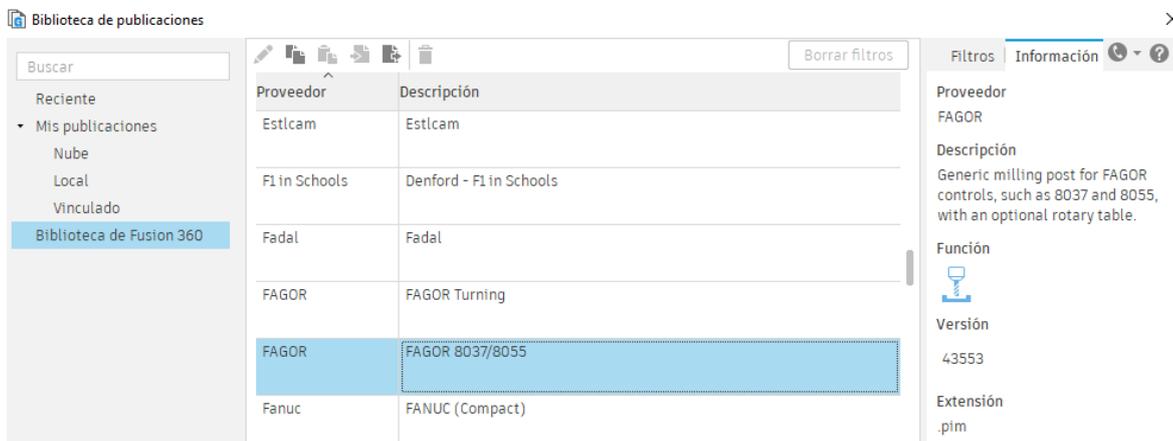


Figura 78.- Pestaña de selección de máquina a la que se quiere enviar el código.

Una vez seleccionada la máquina, se procede a descargar el documento, este se guardará en formato notas (.pim).

