



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación

# TRABAJO FIN DE GRADO

## **FABRICACIÓN DE PLAQUITAS DE CORTE METÁLICAS MEDIANTE TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN ADITIVA**

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: Héctor González Martínez

Tutor: Dra. María Jesús Martín Sánchez

Cotutor: Dr. Francisco de Sales Martín Fernández

MÁLAGA, 7 de noviembre de 2022



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



Escuela de Ingenierías Industriales

TRABAJO FIN DE GRADO

Fabricación de plaquitas de corte metálicas mediante tecnología de fabricación aditiva

*Manufacturing of metallic cutting inserts using additive manufacturing technology*

Héctor González Martínez

Málaga, a 7 de noviembre de 2022





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## RESUMEN

---

La evolución de las herramientas de corte para torneado ha cambiado la necesidad de estar afilando constantemente una barra entera de acero o tener que estar cortando y soldando partes de esta barra, por cambiar un elemento de la barra mediante un tornillo de forma rápida. Esto ha sido posible gracias a la aparición de las plaquitas de corte intercambiables o insertos y los portaplaquitas o portainsertos sobre los que se fijan.

El cambio del paradigma ha supuesto un ahorro de material, ya que ya no se cambia toda la barra, sino que se cambia solo una pequeña parte. Además, también ha supuesto un ahorro significativo de tiempo para el operario, puesto que simplemente tiene que cambiar un pequeño elemento que está sujeto por un tornillo, no realizar ningún mecanizado sobre la herramienta.

La mayoría de los insertos son fabricados mediante pulvimetalurgia de carburos con la ayuda de un aglomerante metálico. Además, posteriormente muchos llevan aplicado un tratamiento de recubrimiento como puede ser el de deposición química en fase de vapor de un carburo, una alúmina o un nitruro.

Debido a que se dispone del sistema de fabricación aditiva metálica Metal X, basado en la tecnología de fabricación aditiva por difusión atómica, surge la inquietud de poder estudiar la fabricación de herramientas con este sistema. De ahí nace el presente Trabajo Fin de Grado, que se centra en el desarrollo de insertos mediante fabricación aditiva metálica para su estudio como técnica de fabricación alternativa a las tradicionales.

Una vez seleccionado qué tipo de ensayo es el más adecuado, junto con la elección de la herramienta a emplear y la aleación sobre la que se va a realizar, se ha diseñado una réplica de la plaquita de corte comercial y se ha fabricado con el sistema Metal X.

Posteriormente, se han seleccionado los valores de los parámetros de corte del ensayo mediante un estudio preliminar que ha permitido acotar el rango de dichos valores. El conjunto de ensayos se ha realizado con los dos tipos de insertos sobre probetas de aluminio, en condiciones secas y lubricadas para poder comparar su comportamiento mecánico frente a los mecanizados.

Por último, gracias al tratamiento de datos que contemplan diversos parámetros de estudio con los que analizar la respuesta mecánica de las herramientas de fabricación aditiva metálica, tanto desde un enfoque absoluto analizando sus propiedades como de forma comparativa frente a herramientas obtenidas por procedimientos de fabricación convencionales, se han obtenido las conclusiones de este estudio.

De esta manera, este trabajo abre una nueva línea de investigación relacionada con la fabricación de herramientas de corte mediante fabricación aditiva metálica con el sistema Metal X. Así mismo, se establece una metodología para su diseño y fabricación.

**Palabras clave:** fabricación aditiva, herramienta de corte, insertos, Metal X, pulvimetalurgia.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## ABSTRACT

---

The evolution of the cutting tools for turning has changed the need to constantly be sharpening a solid steel bar or having to be cutting and welding parts of this bar by changing an element quickly of the bar using a screw.

The change in paradigm has meant a material saving, since the entire bar is no longer changed. In addition, it has also meant a significant saving of time for the operator. He only has to change a small element that is held by a screw, not perform any machining tool.

Most inserts are manufactured by powder metallurgy of carbide with the aid of a metal bond. In addition, many have subsequently applied a coating treatment such as chemical vapor deposition of a carbide, alumina or nitride.

Due to the availability of the Metal X system of metallic additive manufacturing, based on atomic diffusion additive manufacturing technology, the concern of being able to study the manufacture of tools with this system arises. This is the origin of this Final Degree Project, which focuses on the development of inserts through metallic additive manufacturing for their study as an alternative manufacturing technique to the traditional ones.

Once the most appropriate type of test has been selected, together with the choice of the tool to be used and the alloy on which it is going to be carried out, a replica of the commercial cutting insert has been designed and manufactured with the Metal X system.

Subsequently, the values of the cut-off parameters of the test have been selected through a preliminary study that has allowed the range of said values to be narrowed. The set of tests has been carried out with the two types of inserts on aluminum test pieces, in dry and lubricated conditions, to compare their mechanical behavior with the mechanized ones.

Finally, thanks to the data treatment that contemplates various study parameters with which to analyze the mechanical response of metal additive manufacturing tools, both from an absolute approach analyzing their properties and in a comparative way against tools obtained by conventional manufacturing procedures, the conclusions of this study have been obtained.

In this way, this work opens a new line of research related to the manufacture of cutting tools by metal additive manufacturing with the Metal X system. Likewise, a methodology for its design and manufacture is established.

**Keywords:** additive manufacturing, machining tools, Metal X, powder metallurgy, turning inserts.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



# ÍNDICE GENERAL



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## ÍNDICE

---

### MEMORIA

1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN .....	1
2. MARCO DE REFERENCIA .....	3
2.1. Fundamentos del mecanizado y sus máquinas herramienta .....	3
2.1.1. Torneado de metales .....	4
2.1.1.1. Parámetros de corte .....	5
2.1.1.2. Maquinabilidad .....	5
2.1.1.3. Tipos de viruta .....	6
2.1.2. Herramientas y fluidos de corte .....	7
2.1.2.1. Desgaste y vida de las herramientas de corte .....	8
2.1.2.2. Fluidos de corte .....	9
2.2. Fabricación aditiva .....	11
2.2.1. Clasificación de las máquinas .....	11
2.2.2. Clasificación de los procesos .....	12
2.2.3. Fabricación aditiva metálica .....	17
2.2.3.1. Sistema Metal X .....	19
2.2.4. Inclusión de la fabricación aditiva en las herramientas de corte .....	23
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	25
3.1. Selección del tipo de ensayo, aleación y herramienta de corte .....	26
3.2. Metodología experimental para la elaboración de las plaquitas de corte de fabricación aditiva .....	27
3.2.1. Diseño de las plaquitas de fabricación aditiva .....	28
3.2.1.1. Restricciones de diseño establecidas por Markforged para el sistema Metal X .....	30
3.2.2. Exportación del diseño al software Eiger .....	32
3.2.2.1. Selección del material .....	33
3.2.2.2. Simulación de la impresión .....	34
3.2.3. Impresión de las plaquitas .....	35
3.2.4. Lavado de las plaquitas .....	36
3.2.5. Sinterizado de las plaquitas .....	37
3.3. Metodología experimental para los ensayos .....	39



3.3.1.	Desarrollo del ensayo preliminar .....	39
3.3.1.1.	Definición.....	39
3.3.1.2.	Selección de los parámetros de corte .....	39
3.3.1.3.	Condiciones del ensayo.....	43
3.3.1.4.	Realización.....	43
3.3.1.5.	Conclusiones .....	49
3.3.2.	Desarrollo del ensayo.....	50
3.3.2.4.	Preparación de las probetas .....	54
3.3.2.5.	Realización del ensayo.....	56
3.3.2.6.	Toma de datos .....	59
3.3.2.7.	Hojas de datos.....	66
3.3.2.8.	Subsanación de errores producidos durante la realización del ensayo	71
4.	RESULTADOS.....	73
4.1.	Análisis de la herramienta .....	73
4.2.	Análisis de la viruta .....	77
4.3.	Análisis térmico.....	80
4.4.	Análisis de las desviaciones microgeométricas.....	90
5.	CONCLUSIONES .....	99
6.	LÍNEAS FUTURAS.....	103
7.	Bibliografía.....	105

## **ANEXOS**

ANEXO A. PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO EN AW-2030

ANEXO B. PROPIEDADES DEL ACERO PARA HERRAMIENTAS H13 DE MARKFORGED

ANEXO C. HOJAS DE DATOS DE LOS ENSAYOS



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Elementos de un torno horizontal. Referencia: (Ingeniería Mecafenix, s.f.) .....	4
Figura 2. Parámetros de corte del torneado. Fuente: (P. Groover, 2007) .....	5
Figura 3. Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte. Fuente: (P. Groover, 2007).....	9
Figura 4. Tipos de materiales en FA. Fuente: (Balbás Calvo, Espinosa, & Dominguez Somonte, 2018) .....	17
Figura 5. Proceso de impresión con el Ultimaker Metal Expansion Kit. Fuente: (SICNOVA Blog, s.f.).....	19
Figura 6. Flujo de operaciones para obtener una pieza con el sistema Metal X. ....	21
Figura 7. Esquema de la metodología experimental del presente proyecto. ....	25
Figura 8. Planos de la plaquita DCMT 11T308-14 IC20. Fuente: (ISCAR eCatalog, s.f.) .....	28
Figura 9. Entorno de SOLIDWORKS. ....	29
Figura 10. Representación del tamaño mínimo de las .....	31
Figura 11. Representación del voladizo. ....	31
Figura 12. Representación del diámetro mínimo de agujeros. ....	31
Figura 13. Representación de las características mínimas de grabaciones. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.).....	32
Figura 14. Plaquita situada en la bandeja de impresión del programa Eiger. ....	33
Figura 15. Simulación de la impresión de la plaquita capa a capa. ....	35
Figura 16. Tabla de valores de parámetros de corte de cuchillas para torneado de acero rápido.....	40
Figura 17. Tabla de los valores recomendados por ISCAR para barras soldadas. Fuente: (ISCAR eCatalog, s.f.).....	41
Figura 18. Representación gráfica de las dimensiones en la probeta a lo largo de la evolución del ensayo. ....	57
Figura 19. Pantalla principal del programa Pix-Connect. ....	60
Figura 20. Configuración del programa Pix-Connect. ....	61
Figura 21. Pantalla principal del programa Pix-Connect con las configuraciones realizadas para la toma de datos.....	62
Figura 22. Puesto de medición de rugosidades. De izquierda a derecha: Ordenador portátil, Rugosímetro portátil, Soporte con husillo, Calzo en V, Ordenador de sobremesa. ....	63
Figura 23. Representación de las zonas de medida de rugosidad sobre la probeta. ....	64
Figura 24. Pantalla principal del programa SurfTest SJ USB Communication Tool Ver5.006. ....	65
Figura 25. Condiciones de medida en el programa SurfTest SJ USB Communication Tool Ver5.006. ....	65
Figura 26. Perfil de perfil rugosidad de una medida generado por el programa SurfTest. .	66
Figura 27. Imagen tomada de la grabación de un ensayo lubricado. ....	90
Figura 28. Gráfica de Ra para volores de $Vc = 45,24 m/min$ , $Fz = 0,1 mm/rev$ , $Ap = 1 mm$ .....	91



Figura 29. Gráfica de Rz a lo largo de la probeta para $Vc = 45,24 \text{ m/min}$ , $Fz = 0,1 \text{ mm/rev}$ , $Ap = 1 \text{ mm}$ .....	92
Figura 30. Gráfica de Ra a lo largo de la probeta para $54,03 \text{ m/min}$ , $Fz = 0,1 \text{ mm/rev}$ , $Ap = 1 \text{ mm}$ .....	93
Figura 31. Gráfica de Rz a lo largo de la probeta para $54,03 \text{ m/min}$ , $Fz = 0,1 \text{ mm/rev}$ , $Ap = 1 \text{ mm}$ .....	93
Figura 32. Gráfica de Ra a lo largo de la probeta para $Vc = 45,24 \text{ m/min}$ , $Fz = 0,15 \text{ mm/rev}$ , $Ap = 1 \text{ mm}$ .....	94
Figura 33. Gráfica de Rz a lo largo de la probeta para $Vc = 45,24 \text{ m/min}$ , $Fz = 0,15 \text{ mm/rev}$ , $Ap = 1 \text{ mm}$ .....	95
Figura 34. Gráfica de Ra para $Vc = 54,03 \text{ m/min}$ , $Fz = 0,15 \text{ mm/rev}$ , $Ap = 1 \text{ mm}$ .....	95
Figura 35. Gráfica de Rz para $Vc = 54,03 \text{ m/min}$ , $Fz = 0,15 \text{ mm/rev}$ , $Ap = 1 \text{ mm}$ .....	96
Figura 36. Diagrama resistencia a la tracción-deformación del acero H13 según su procedencia y tratamiento térmico. Fuente: (Markforged Materials, s.f.) .....	3
Figura 37. Microestructura del H13 de Markforged sinterizado. Fuente: (Markforged Materials, s.f.) .....	4



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1. Proceso de torneado. Fuente: (Mecánicas MECAL, S.L.U., s.f.) .....	3
Ilustración 2. Herramientas de corte. A) herramienta de corte hecha de acero rápido (una sola pieza) B) parte cortante de acero rápido soldada a tope C) placa cortante sobrepuesta soldada D) placa cortante sujeta al portaherramientas. Fuente: (Contreras, 2016) .....	8
Ilustración 3. Operación de mecanizado con aplicación de fluido de corte.....	10
Ilustración 4. Impresora HP Jet Fusion 5200 a la izquierda e impresora Ultimaker S3 a la derecha.....	11
Ilustración 5. Pieza fabricada mediante tecnología WAAM. Fuente: (NIPPON GASES, s.f.) .	17
Ilustración 6. Primera pieza metálica realizada mediante la técnica SLS. Fuente: (Balbás Calvo, Espinosa, & Dominguez Somonte, 2018).....	18
Ilustración 7. Sistema de impresión Metal X de Markforged. De izquierda a derecha: horno de sinterizado, impresora, lavadora. Fuente: (Markforged Printers, s.f.) .....	20
Ilustración 8. Representación de la plaquita de corte perteneciente al estudio de Universidad de Bohemia Occidental. Fuente: (Sýkora & Kroft, 2021). .....	23
Ilustración 9. Plaquita de corte DCMT 11T308-14 IC20 del fabricante ISCAR. Fuente: (ISCAR eCatalog, s.f.).....	27
Ilustración 10. Plaquita modelada en vista isométrica superior e inferior respectivamente. ....	29
Ilustración 11. Plaquita modelada en vista alzado y perfil respectivamente. ....	29
Ilustración 12. Plaquita modelada en vista superior y vista inferior respectivamente.....	30
Ilustración 13. Simulación en el programa Eiger de la impresión de las plaquitas en la bandeja de la impresora.....	35
Ilustración 14. Preparación de los filamentos de la impresora. ....	35
Ilustración 15. Plaquitas de corte en verde tras la finalización de la impresión. ....	36
Ilustración 16. Llenado del centro de lavado del equipo Metal X. ....	36
Ilustración 17. Introducción en el horno de sinterizado de la bandeja que contiene las plaquitas de corte. ....	38
Ilustración 18. Plaquitas de corte impresas.....	38
Ilustración 19. Primera probeta ensayada.....	44
Ilustración 20. Segunda probeta ensayada. ....	46
Ilustración 21. Tercera probeta ensayada.....	47
Ilustración 22. Cuarta probeta ensayada. ....	48
Ilustración 23. Cajas de plaquitas de corte.....	52
Ilustración 24. De izquierda a derecha, representación del tocho de barra, probeta preparada para ensayar y probeta ensayada.....	54
Ilustración 25. Sierras de cinta disponibles en el taller.....	54
Ilustración 26. Eliminación de las rebabas en los extremos de los tochos. ....	55
Ilustración 27. Mecanizado del talón a una probeta. ....	55
Ilustración 28. Realización de un contrapunto.....	56



Ilustración 29. A la izquierda se muestra un tocho de barra y a la derecha una probeta lista para ensayar.....	56
Ilustración 30. Torno Pinacho S-90/180 durante la realización del ensayo.....	57
Ilustración 31. Taladrina usada en los ensayos.....	58
Ilustración 32. Sistema de lubricación torno Pinacho S-90/180.....	58
Ilustración 33. Posición de la cámara térmica en el torno.....	59
Ilustración 34. Probeta situada en el calzo en V. ....	63



## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Geometría de la viruta I. ....	6
Tabla 2. Geometría de la viruta II. ....	7
Tabla 3. Principios de funcionamiento de los procesos de fabricación aditiva. ....	12
Tabla 4. Relación de la terminología inglesa con la española. ....	13
Tabla 5. Propiedades de la impresora del sistema Metal X. Fuente: (Markforged Printers, s.f.) ....	22
Tabla 6. Propiedades de la lavadora del sistema Metal X. Fuente: (Markforged Printers, s.f.) ....	22
Tabla 7. Propiedades del horno de sinterizado del sistema Metal X. Fuente: (Markforged Printers, s.f.) ....	23
Tabla 8. Designación de la aleación de aluminio empleada. ....	26
Tabla 9. Composición de la aleación de aluminio empleada. ....	26
Tabla 10. Rango de valores de los parámetros de corte aconsejados por el fabricante para la plaquita de corte DCMT 11T308-14 IC20. ....	27
Tabla 11. Valores de los parámetros reprogramados en el plano de la Figura 4. Fuente: (ISCAR eCatalog, s.f.). Edición: Propia. ....	28
Tabla 12. Valores del tamaño mínimo de las piezas finales. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.) ....	31
Tabla 13. Valores del ángulo mínimo. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.) ....	31
Tabla 14. Valores de del diámetro mínimo de agujeros. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.) ....	31
Tabla 15. Valores de las características mínimas de grabaciones. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.) ....	32
Tabla 16. Parámetros de impresión seleccionados en Eiger. ....	33
Tabla 17. Masa de las plaquitas impresas antes y después del lavado. ....	37
Tabla 18. Posibles valores de velocidades de avance del torno Pinacho S90/180. ....	41
Tabla 19. Posibles valores de velocidades de corte del torno Pinacho S90/180. ....	41
Tabla 20. Conversión de algunos valores de velocidad de corte de m/min a rpm. ....	42
Tabla 21. Parámetros de corte de partida para la primera probeta. ....	43
Tabla 22. Velocidad de corte en rpm de la primera probeta. ....	44
Tabla 23. Palancas del torno Pinacho S-90/180 para la primera probeta. ....	44
Tabla 24. Parámetros de corte finales de la primera probeta. ....	44
Tabla 25. Parámetros de corte de partida para la segunda probeta. ....	45
Tabla 26. Velocidad de corte en rpm de la segunda probeta. ....	45
Tabla 27. Palancas del torno Pinacho S-90/180 para la segunda probeta. ....	45
Tabla 28. Parámetros de corte finales de la primera probeta. ....	45
Tabla 29. Parámetros de corte de partida para la tercera probeta. ....	46
Tabla 30. Velocidad de corte en rpm de la tercera probeta. ....	46
Tabla 31. Palancas del torno Pinacho S-90/180 para la tercera probeta. ....	46



Tabla 32. Parámetros de corte finales de la tercera probeta.....	46
Tabla 33. Parámetros de corte de partida para la cuarta probeta.....	47
Tabla 34. Velocidad de corte en rpm de la cuarta probeta.....	47
Tabla 35. Palancas del torno Pinacho S-90/180 para la cuarta probeta.....	48
Tabla 36. Parámetros de corte finales de la cuarta probeta.....	48
Tabla 37. Cuadrante latino para determinar el número de ensayos.....	50
Tabla 38. Velocidad de corte de partida en m/min.....	51
Tabla 39. Velocidad de corte de partida en rpm.....	51
Tabla 40. Palancas de velocidad de corte en el torno Pinacho S-90/180.....	51
Tabla 41. Velocidad de corte final.....	51
Tabla 42. Palancas de velocidad de avance en el torno Pinacho S-90/180.....	51
Tabla 43. Longitudes básicas de muestreo de rugosidad para la medición de Ra, Rz y $r_{punta}$ . Fuente: (ISO 4288:1996 Especificación geométrica de productor (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial, 1996). Edición: Propia.....	64
Tabla 44. Micrografía de las herramientas de corte previo a ser empleadas en los ensayos. .....	74
Tabla 45. Herramientas de corte empleadas en los ensayos.....	76
Tabla 46. Viruta recogida durante los ensayos.....	78
Tabla 47. Micrografía de la viruta del ensayo ENAW2030_TN_D40_L160_HCM_C $\alpha$ _P2CP_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R1.....	79
Tabla 48. Micrografía de la viruta del ensayo ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P3CN_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R1.....	79
Tabla 49. Micrografía de la viruta del ensayo ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P3SN_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R2.....	80
Tabla 50. Diagramas de temperatura tiempo de los distintos ensayos para $V_c =$ $45,24\text{ m/min}$ , $F_z = 0,1\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	82
Tabla 51. Diagramas de temperatura tiempo de los distintos ensayos para $V_c =$ $54,03\text{ m/min}$ , $F_z = 0,1\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	85
Tabla 52. Diagramas de temperatura tiempo de los distintos ensayos para $V_c =$ $45,24\text{ m/min}$ , $F_z = 0,15\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	87
Tabla 53. Diagramas de temperatura tiempo de los distintos ensayos para $V_c =$ $54,03\text{ m/min}$ , $F_z = 0,15\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	89
Tabla 54. Valores de Ra para $V_c = 45,24\text{ m/min}$ , $F_z = 0,1\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	91
Tabla 55. Valores de Rz para $V_c = 45,24\text{ m/min}$ , $F_z = 0,1\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	92
Tabla 56. Valores de Ra para $54,03\text{ m/min}$ , $F_z = 0,1\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	92
Tabla 57. Valores de Rz para $54,03\text{ m/min}$ , $F_z = 0,1\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	93
Tabla 58. Valores de Ra para $V_c = 45,24\text{ m/min}$ , $F_z = 0,15\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	94
Tabla 59. Valores de Rz para $V_c = 45,24\text{ m/min}$ , $F_z = 0,15\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	94
Tabla 60. Valores de Ra para $V_c = 54,03\text{ m/min}$ , $F_z = 0,15\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	95
Tabla 61. Valores de Rz para $V_c = 54,03\text{ m/min}$ , $F_z = 0,15\text{ mm/rev}$ , $A_p = 1\text{ mm}$ .....	96
Tabla 62. Composición química en porcentaje en peso de la aleación EN AW-2030.....	1
Tabla 63. Propiedades mecánicas de la aleación EN AW-2030.....	1
Tabla 64. Propiedades físicas de la aleación EN AW-2030.....	1



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



Tabla 65. Composición química en porcentaje en peso del acero para herramientas H13 de Markforged..... 3

Tabla 66. Propiedades mecánicas de los distintos aceros H13. Fuente: (Markforged Materials, s.f.) ..... 4



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## ABREVIATURAS

---

**ADAM:** Atomic Diffusion Additive Manufacturing

**AM:** Additive manufacturing

**ANSI:** American National Standards Institute

**$A_p$ :** Penetración

**FA:** Fabricación aditiva

**FFF:** Fused Filament Fabrication

**$F_z$ :** Velocidad de avance

**Ra:** Rugosidad media aritmética

**Rz:** Rugosidad máxima

**SLA:** Stereolithography

**SOM:** Microscopía óptica estereoscópica

**UNS:** Unified numbering system

**$V_c$ :** Velocidad de corte

**WAAM:** Wire Arc Additive Manufacturing

**3D:** Tridimensional



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



# MEMORIA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## 1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

---

El objetivo de este proyecto es la elaboración de plaquitas de corte metálicas mediante tecnología de fabricación aditiva para, posteriormente, evaluar su comportamiento en procesos de mecanizado. En concreto, el estudio se llevará a cabo para plaquitas de corte para torno y se evaluarán mecanizando probetas de una aleación de aluminio.

La motivación de este proyecto surge debido a que el grupo de investigación ADVANCED MANUFACTURING ENGINEERING (TEP969) de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga cuenta con un equipo de fabricación aditiva metálica, en concreto, con el sistema Metal X de Markforged. Lo que generó la búsqueda de campos de aplicación o nuevas investigaciones a llevar a cabo con él.

Tradicionalmente, las herramientas de corte para torno se fabricaban de forma entera en diversas aleaciones de acero. Posteriormente, se evolucionó a la elaboración por separado de un conjunto de dos elementos. Por un lado, un nuevo elemento llamado portaherramientas y, por el otro, las herramientas que van situadas sobre este. Estas herramientas son conocidas como plaquitas de corte o insertos y la mayoría se llevan a cabo mediante un proceso de pulvimetalurgia de carburos metálicos. La rápida evolución de la fabricación aditiva con metales ha permitido que se planteen posibles nuevas técnicas de elaboración frente a las tradicionales. Actualmente, son mínimas las líneas de investigación que se centran en la manufactura de herramientas de corte mediante fabricación aditiva.

Para llevar a cabo el proyecto, será necesario establecer una metodología experimental tanto para elaborar las plaquitas de corte de fabricación aditiva, como para desarrollar los ensayos que sirvan para evaluar el resultado. Finalmente se realizará un análisis de las probetas mecanizadas, de las plaquitas de corte empleadas y de la viruta generada durante el mecanizado. Para así valorar el grado de satisfacción del proceso y realizar una comparativa respecto a las plaquitas de corte comerciales. Para ello, se contará con un torno Pinacho S-90/180, con el equipo de fabricación aditiva, anteriormente mencionado, con una cámara térmica Optris y un rugosímetro Mitutoyo. Además de las máquinas y herramientas situadas en la nave-taller del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación necesarias para llevar a cabo la preparación de las probetas.

Con este proyecto, se pretende investigar el empleo de nuevas tecnologías de fabricación de herramientas de corte frente a las tradicionales y ver qué posibilidades ofrece el sistema Metal X en el desarrollo de estas. Pudiendo llegar a ser el proyecto inicial de una línea de análisis para el grupo de investigación mencionado anteriormente.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## 2. MARCO DE REFERENCIA

---

En este capítulo se aborda la búsqueda bibliográfica de los dos pilares fundamentales del presente proyecto, que son la fabricación aditiva y el mecanizado de metales y sus máquinas-herramienta.

### 2.1. Fundamentos del mecanizado y sus máquinas herramienta

La sustracción de material como un medio de manufactura se remonta a la prehistoria, cuando los humanos aprendieron a tallar la madera y a esculpir piedras para hacer elementos de caza y labranza.

La aparición de las máquinas herramienta modernas se relaciona estrechamente con la Revolución Industrial y la máquina de vapor de James Watt, datada alrededor de 1763 en Inglaterra. Uno de los problemas a los que tuvo que hacer frente fue a la operación de perforación del cilindro, ya que tenía que ser lo suficientemente precisa como para prevenir que el vapor se escapara alrededor del pistón. John Wilkinson desarrolló una máquina perforadora con una rueda movida por agua en torno a 1775, la cual permitió a Watt construir su máquina de vapor. Esta máquina perforadora es reconocida frecuentemente como la primera máquina herramienta de la historia.

Los procesos de mecanizado se basan en la retirada de material de la superficie de una pieza de trabajo mediante la producción de virutas. El material se elimina gracias a la ayuda de una herramienta de corte con el fin de generar la forma deseada. Hay muchas clases de operaciones de mecanizado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta configuración geométrica y textura superficial. Los tres procesos de mecanizado más extendidos son el torneado, el taladrado y el fresado. (P. Groover, 2007)



*Ilustración 1. Proceso de torneado. Fuente: (Mecánicas MECAL, S.L.U., s.f.)*

El mecanizado presenta numerosas ventajas:

- Se puede emplear en una amplia variedad de materiales. Prácticamente todos los metales se pueden mecanizar, al igual que los polímeros. Si embargo materiales frágiles y duros como las cerámicas presentan dificultades, por ello se hace uso de otro tipo de mecanizados como es el mecanizado abrasivo.
- Se puede usar para generar cualquier forma geométrica regular. Variando la trayectoria y el tipo de herramienta se pueden crear geometrías irregulares. Combinando varias operaciones de mecanizado en serie se pueden conseguir formas de gran complejidad.
- El mecanizado puede producir dimensiones con tolerancias muy estrechas, siendo uno de los procesos más precisos.
- El mecanizado es capaz de generar acabados superficiales muy tersos, llegando a las micras.

Sin embargo, también tiene ciertas desventajas como pueden ser:

- El mecanizado lleva consigo un desperdicio de material en forma de viruta. Aunque esta después pueda reciclarse, el material removido implica un desperdicio.
- El mecanizado, en general, toma más tiempo en realizar una pieza que otros procesos como la fundición o el forjado.

### 2.1.1. Torneado de metales

El torneado es un proceso de mecanizado en el cual una herramienta de una sola punta remueve material de la superficie de una pieza de trabajo cilíndrica en rotación; la herramienta avanza linealmente en una dirección paralela al eje de rotación. El torneado se lleva a cabo tradicionalmente en una máquina herramienta conocida como torno, la cual suministra la potencia para mecanizar la pieza a una velocidad de rotación determinada, con un avance de la herramienta y profundidad de corte específicos (P. Groover, 2007).



Figura 1. Elementos de un torno horizontal. Referencia: (Ingeniería Mecafenix, s.f.)

#### 2.1.1.1. Parámetros de corte

Para realizar una operación de torneado se requiere el movimiento relativo de la pieza de trabajo y de la herramienta. El movimiento de giro de la pieza se da a unas ciertas revoluciones, parámetro conocido como velocidad de corte. Además, la herramienta debe moverse lateralmente a través de la pieza de trabajo. Este movimiento se realiza de forma mucho más lenta y es conocido como avance. El parámetro de corte restante es la penetración de la herramienta de corte dentro de la superficie original de la pieza de trabajo, llamado profundidad. Este conjunto de parámetros también es conocido como parámetros de corte. El resultado final del proceso depende de la configuración de estos, y a su vez la configuración de estos depende del material de trabajo y del material de la herramienta de corte.

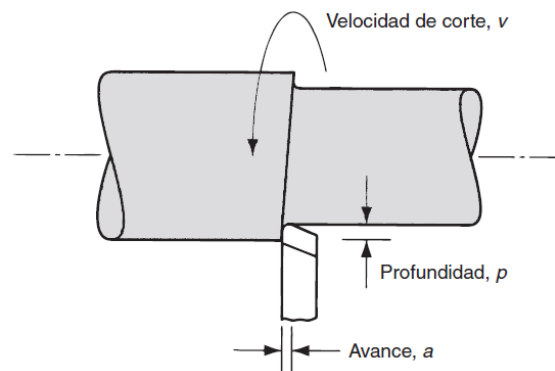


Figura 2. Parámetros de corte del torneado. Fuente: (P. Groover, 2007)

#### 2.1.1.2. Maquinabilidad

Las propiedades del material de trabajo tienen una influencia notable sobre el éxito de la operación de mecanizado. Estas propiedades y otras características del trabajo se resumen a menudo en el término maquinabilidad. Con maquinabilidad se denota la facilidad relativa con la que puede mecanizarse un material usando las herramientas y las condiciones de corte adecuadas.

Los criterios que se emplean para evaluar la maquinabilidad son los siguientes:

- El acabado superficial de la parte mecanizada.
- La vida útil de la herramienta.
- La fuerza y potencia requeridas.
- El nivel de dificultad de control de la viruta.

Debido a la dificultad de cuantificar estos criterios es complicado poder llegar a establecer relaciones que definan la maquinabilidad de forma cuantitativa. Por ello, normalmente se considera que la vida útil de la herramienta y la rugosidad superficial son los factores más importantes (P. Groover, 2007).

El aluminio generalmente presenta una buena maquinabilidad, aunque los grados más suaves tienden a formar borde acumulado que produce un acabado superficial de baja calidad. Por lo tanto, se recomiendan altas velocidades de corte, así como ángulos grandes de ataque y de alivio. Las aleaciones forjables de aluminio con alto contenido de silicio y las aleaciones de aluminio fundido suelen ser abrasivas, de ahí que requieran materiales más duros para herramientas.

### 2.1.1.3. Tipos de viruta

La viruta formada durante el mecanizado tiene unas características que están relacionadas con el material de trabajo, el material de la herramienta, los filos de corte, la posición de estos y los parámetros y condiciones de corte. Para cualquier conjunto de condiciones, la formación de la viruta permanecerá sin cambios a menos que uno de los factores mencionados anteriormente cambie. Puesto que todo mecanizado bajo las mismas condiciones produce el mismo tipo de viruta, la observación de la viruta es útil para evaluar el mecanizado que se esté realizando, pudiendo ser un indicativo del estado de la herramienta. A continuación, se muestran dos tablas que resumen la clasificación de las virutas en base a su geometría de acuerdo con la norma ISO 3685:1993.




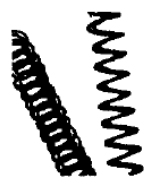







Geometría de la viruta			
1. Planas	2. Tubulares	3. Espirales	4. Helicoidales
1.1. Largas 	2.1. Largas 	3.1. Planas 	4.1. Largas 
1.2. Cortas 	2.2. Cortas 	3.2. Cónicas 	4.2. Cortas 
1.3. Enmarañadas 	2.3. Enmarañadas 		4.3. Enmarañadas 

Tabla 1. Geometría de la viruta I.

Fuente: (ISO 3685:1993 Tool-life testing with single-point turning tools, 1993). Edición: Propia.








Geometría de la viruta			
5. Helicoidales cónicas	6. Arqueadas	7. Fragmentadas	8. Aciculares
5.1. Largas 	6.1. Conectadas 		
5.2. Cortas 	6.2. Sueltas 		
5.3. Enmarañadas 			

Tabla 2. Geometría de la viruta II.

Fuente: (ISO 3685:1993 Tool-life testing with single-point turning tools, 1993). Edición: Propia.

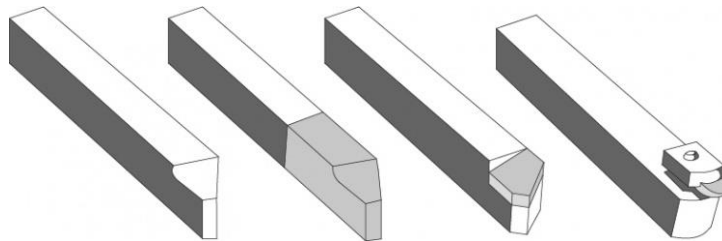
### 2.1.2. Herramientas y fluidos de corte

La selección de la herramienta de corte para una operación de torneado es uno de los factores más importantes, debido a que la herramienta es sometida a un ambiente muy agresivo con elevadas temperaturas, elevados esfuerzos de contacto y a un gran rozamiento herramienta-viruta a lo largo de la superficie mecanizada.

Según el método de fabricación de la herramienta se clasifican en:

- Herramientas enterizas. Se fabrican en una sola pieza de un mismo material en forma de barra. El filo de corte se encuentra en el extremo.
- Herramientas compuestas. Se clasifican en tres subgrupos.
  - Fabricadas con distintos materiales. Generalmente el vástago es de acero para construcciones y la parte cortante de acero rápido. Ambas partes se unen mediante soldadura a tope.
  - Placa soldada. El vástago es de acero y la parte cortante de acero rápido o carburo de wolframio o tungsteno en forma de pequeña pastilla o placa soldada. La soldadura de cada herramienta requiere tiempo y destreza. La placa soldada puede volver a afilarse cuando sea necesario a lo largo de su vida útil.

- Placa intercambiable. Constan de un mango o portaherramientas capaz de reutilizarse en innumerables ocasiones, en el que alternativamente pueden montarse y desmontarse pequeñas pastillas o placas intercambiables denominadas insertos o plaquitas de corte. Son compuestos cerámicos generalmente de forma triangular, cuadrada, rómbica o redonda. Los insertos están diseñados para intercambiarse o rotarse a medida que cada filo de corte se desgaste. Al final de su vida útil se descartan, por lo que no requieren de afilado.



*Ilustración 2. Herramientas de corte. A) herramienta de corte hecha de acero rápido (una sola pieza) B) parte cortante de acero rápido soldada a tope C) placa cortante sobrepuesta soldada D) placa cortante sujeta al portaherramientas. Fuente: (Contreras, 2016)*

#### 2.1.2.1. Desgaste y vida de las herramientas de corte

La vida de la herramienta de corte se define como la longitud de tiempo de mecanizado en el cual se puede usar la herramienta. Una forma de definir la vida de la herramienta consiste en permitir su operación hasta que ocurra una falla catastrófica (P. Groover, 2007). Existen tres formas posibles de falla en una herramienta de corte:

- Falla por fractura. Esto ocurre cuando la fuerza de corte que actúa en la punta de la herramienta es excesiva.
- Falla por temperatura. Ocurre cuando la temperatura de corte es demasiado alta para el material de la herramienta, causando ablandamiento en la punta, deformación plástica y pérdida de filo en el borde.
- Desgaste gradual. El desgaste gradual del borde cortante ocasiona pérdida de la forma de la herramienta, reducción en la eficiencia del corte, desgaste acelerado conforme la herramienta se deteriora y por último falla final de la herramienta en una manera similar a la falla por temperatura. El desgaste gradual ocurre principalmente en dos lugares de la herramienta de corte, por una parte, en la cara de incidencia y por otra en la cara de desprendimiento.

Los mecanismos que generan desgaste en el contacto herramienta-viruta y herramienta-pieza son la abrasión, la adhesión, la difusión, las reacciones químicas y la deformación plástica (P. Groover, 2007).

A medida que el mecanizado avanza los distintos mecanismos de desgaste producen mayores niveles de desgaste en la herramienta de corte. La relación desgaste-tiempo de mecanizado se muestra en la siguiente figura, que corresponde a un desgaste ideal del filo.

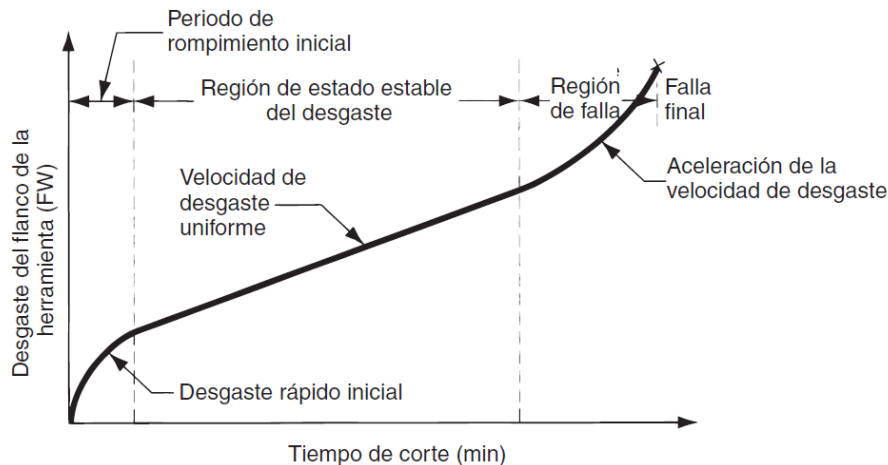


Figura 3. Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte. Fuente: (P. Groover, 2007).

#### 2.1.2.2. Fluidos de corte

Un fluido de corte es un líquido o gas que se emplea en las operaciones de mecanizado para mejorar el desempeño del corte. Los problemas que se pretenden subsanar con su aplicación son los siguientes:

- Reducir la fricción y el desgaste, mejorando así la vida útil de la herramienta y el acabado superficial de la pieza de trabajo.
- Enfriar la zona de corte y fricción, mejorando así la vida útil de la herramienta y reduciendo la temperatura y la distorsión térmica de la pieza de trabajo.
- Reducir las fuerzas y el consumo de energía.
- Retirar las virutas de la zona de corte, evitando que interfieran en el proceso de corte, en particular en operaciones como el taladrado.
- Proteger la superficie mecanizada de la corrosión ambiental.

Según el tipo de mecanizado el fluido de corte necesario puede ser un refrigerante, un lubricante o ambos. La efectividad de los fluidos de corte depende de factores como el tipo de operación de mecanizado, los materiales de la herramienta y de la pieza de trabajo, la velocidad de corte y el método de aplicación (Kalpakjian & Schmid, 2008).



*Ilustración 3. Operación de mecanizado con aplicación de fluido de corte.  
Fuente: (Escuela de Postgrado Industrial, 2022)*

#### Tipos de fluidos de corte:

- Aceites. Incluyendo aceites minerales, animales, vegetales, compuestos y sintéticos, que normalmente se utilizan en operaciones de baja velocidad donde el incremento de la temperatura no es significativo.
- Emulsiones. Son una mezcla de aceite, agua y aditivos, se utilizan por lo general en operaciones de alta velocidad debido a que el incremento de temperatura es significativo. La presencia del agua hace que las emulsiones sean refrigerantes muy eficaces.
- Semisintéticos. Son emulsiones químicas que contienen un poco de aceite mineral diluido en agua y aditivos que disminuyen el tamaño de las partículas de aceite, haciéndolas más eficaces.
- Sintéticos. Son productos químicos con aditivos, diluidos en agua y sin aceite.

Los tres últimos tipos mencionados anteriormente son soluciones acuosas diluidas y reciben el nombre genérico de taladrinas.

Debido a razones ambientales y económicas, desde mediados de la década de los 90 hay una tendencia global a minimizar o eliminar el uso de los fluidos de corte para el trabajo de metales, tendencia que ha derivado en la práctica del mecanizado casi en seco. El mecanizado en seco ha pasado a ser una alternativa viable debido a los importantes avances en las herramientas de corte (Kalpakjian & Schmid, 2008). Por otra parte, el mecanizado en seco conlleva condiciones de trabajo más agresivas que originan un rápido deterioro de las herramientas, así como un aumento de las fuerzas de corte, de la potencia consumida y peores acabados superficiales.

## 2.2. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva (FA) se caracteriza por ser un proceso automatizado para la producción de objetos físicos tridimensionales directamente desde archivos CAD en 3D. El proceso se basa en el principio de fabricación por capas, las piezas se van generando mediante la acumulación y anexión de elementos volumétricos de material. Originalmente a este proceso se le conocía como prototipado rápido y a menudo se sigue utilizando dicho término (Gebhardt, Kessler, & Thurn, 2019).

Concretamente, según la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 la FA es el “proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa a capa, en oposición a métodos de fabricación mediante eliminación de material y de conformado.”



*Ilustración 4. Impresora HP Jet Fusion 5200 a la izquierda e impresora Ultimaker S3 a la derecha.  
Fuente: (Tienda SICNOVA 3D, s.f.)*

La fabricación aditiva tiene su origen en 1983, cuando el ingeniero norteamericano Chuck Hull inventó la estereolitografía. Posteriormente, en 1986 Carl R. Deckard en la Universidad de Texas desarrolla una máquina capaz de imprimir piezas por sinterización selectiva, y más tarde, en concreto a finales de los 80's, Scott Crump inventa la técnica de deposición por hilo fundido.

En combinación con los procesos de fabricación sustractiva como el fresado o el torneado, y los procesos de conformado como la fundición o la forja, la fabricación aditiva representa la tercera columna de todas las tecnologías de producción.

### 2.2.1. Clasificación de las máquinas

Existe una correlación entre la clase de máquina y las piezas que pueden fabricarse por estas máquinas y sus propiedades. En el mercado hay una gran variedad de máquinas para fabricación aditiva. Las diferentes máquinas se pueden dividir en clases, que no están estrictamente vinculadas al proceso de fabricación aditiva empleado.

- Impresoras 3D personales, producen predominantemente maquetas o piezas que no están sujetas a una gran complejidad geométrica y una alta precisión en cuanto a detalles.
- Impresoras 3D profesionales, generan principalmente maquetas o piezas con poca carga, sin embargo, logran una precisión de detalles significativamente mejor en comparación con las impresoras personales. Debido a la precisión de los detalles, las piezas fabricadas por impresoras profesionales a menudo se convierten en piezas finales de alta calidad mediante procesos posteriores.
- Impresoras 3D de producción, se utilizan para la fabricación aditiva de piezas únicas o series pequeñas de diferentes partes y para producir productos finales después de llevar a cabo el posprocesamiento.
- Impresoras 3D industriales, se utilizan para la fabricación aditiva de piezas de alta calidad. Estas impresoras integran (al menos en parte) el posprocesamiento y producen piezas finales.

### 2.2.2. Clasificación de los procesos

La forma en la que se agrupan los procesos de fabricación aditiva puede sufrir ligeros cambios dependiendo de la fuente bibliográfica que se revise. En este caso se ha optado por seguir la clasificación que realiza el libro *3D printing: understanding additive manufacturing* (Gebhardt, Kessler, & Thurn, 2019). El cual diferencia cinco familias en los procesos de fabricación aditiva, que se basan en diferentes métodos para generar una serie de capas sólidas y unir las entre sí.

Generación de capas	Contorneado de la capa	Proceso de FA
Polimerización	Láser, cabezal de impresión	Estereolitografía
Fusión selectiva o sinterizado y resolidificación selectiva	Láser, haz de electrones	Sinterizado por láser Fusión por láser
Pegado selectivo o pegado por aglutinante	Láser, corte, fresado	Fabricación de objetos laminados
Impresión 3D	Cabezal con múltiples boquillas	3DP
Aplicación selectiva de fases térmicamente activas	Extrusor de una boquilla	Modelado por deposición fundida

Tabla 3. Principios de funcionamiento de los procesos de fabricación aditiva.  
Fuente: (Gebhardt, Kessler, & Thurn, 2019). Edición: propia.

La fabricación aditiva es una tecnología relativamente joven, que ha coincidido en el tiempo con la globalización del inglés, además nació en un país de habla inglesa y también es allí donde se llevan a cabo los mayores desarrollos. Por todo ello, para referirse a cualquiera de los procesos de FA la terminología extendida y utilizada es la inglesa.

Nombre en inglés	Abrev. en inglés	Nombre en español
Stereolithography	SLA	Estereolitografía
Selective Laser Sintering	SLS	Sinterizado selectivo por laser
Selective Laser Melting	SLM	Fusión selectiva por láser
Electron Beam Melting	EBM	Fusión por haz de electrones
Laminated Object Manufacturing	LOM	Fabricación de objetos laminados
Three Dimensional Printing	3DP	Impresión en 3D
Fused Deposition Modeling	FDM	Modelado por deposición fundida

Tabla 4. Relación de la terminología inglesa con la española.  
Fuente: (Gebhardt, Kessler, & Thurn, 2019). Edición: propia.

#### ❖ Polimerización

La polimerización selectiva de una resina líquida (de epoxi, acrilato o éter vinílico) mediante radiación ultravioleta se conoce como fotopolimerización. Existen varios procesos que utilizan esta técnica, pero solo se diferencian en la forma en la que generan la radiación ultravioleta y el método de contorneado. Algunos procesos dan como resultado un sólido parcialmente solidificado, lo que se produce es una pieza en verde que requiere de un tratamiento adicional para lograr una pieza completamente curada. El tratamiento adicional se lleva a cabo en una cámara especial llamada horno de curado.

Durante la generación de la pieza, los procesos de polimerización requieren soportes. Estos son necesarios para estabilizar la pieza y evitar deformaciones. Los soportes se añaden al modelo CAD de forma automatizada mediante el programa que se emplee para generar el código de impresión, y se eliminan manualmente después de finalizar la pieza completa. Algunos tipos de soportes (y materiales) se pueden lavar automáticamente mediante dispositivos de limpieza especiales. Las principales tecnologías que utilizan este principio son la estereolitografía, la impresión de polímeros o inyección de polímeros, procesamiento de luz digital y la microestereolitografía.

#### ➤ Estereolitografía

La estereolitografía (SLA) es el proceso de FA más antiguo y hasta el día de hoy el más detallado. Con la ayuda de un rayo láser UV el líquido pasa a un estado sólido por polimerización.

Una máquina de estereolitografía consta de un espacio de construcción (volumen de construcción), lleno con resina líquida (material de construcción) y una unidad de escáner láser, dispuesta en la parte superior, que genera el contorno en la dirección xy (área de construcción). El espacio de construcción contiene la plataforma de construcción móvil, que se puede bajar en la dirección de construcción (dirección z).

La pieza está construida sobre la plataforma. El rayo láser genera el contorno simultáneamente proporcionando la solidificación de cada capa y su conexión con la anterior. El movimiento del rayo láser es dirigido por un escáner láser de acuerdo con los datos del contorno de cada capa. Tan pronto como el rayo láser penetra en la superficie de la resina, se produce una solidificación instantánea por polimerización. Dependiendo de la reactividad y transparencia de la resina, el espesor de la capa puede ser ajustado por la potencia del láser y la velocidad de seguimiento.

El proceso de construcción puede requerir de soportes, lo que limita las opciones para la orientación de la pieza en la cámara de construcción, ya que los soportes dejarán marcas en la superficie de la pieza después de su retirada. Por lo tanto, la orientación debe ser elegida cuidadosamente. Debido a los soportes, las piezas no se pueden apilar entre sí, lo que reduce la densidad de empaque en el espacio de construcción y por lo tanto la productividad. Una vez terminada la pieza, se limpia y finalmente se cura completamente en una cámara de rayos UV (horno de curado). Este paso del proceso es una parte integral del proceso FA, llamado posprocesado. Las piezas completamente curadas se pueden granallar, pulir o barnizar, si es necesario. Los pasos del proceso se denominan acabado, que es una medida independiente de la FA. El tipo y alcance solo dependen de los requisitos del usuario con respecto a las piezas y posibles restricciones en cuanto a su aplicación.

#### ❖ Fusión y sinterizado

La fusión selectiva de polvos plásticos y metálicos que muestran un comportamiento termoplástico y una resolidificación después del enfriamiento es llamada sinterización láser, también conocida como sinterizado selectivo por láser, fusión por láser, o en caso de metal fundición por láser. Los procesos que utilizan un haz de electrones en lugar de un láser se denominan fusión por haz de electrones (EBM). Si la energía se suministra mediante infrarrojos y contorneado por una máscara, el proceso se denomina sinterización selectiva de máscara. Las tecnologías que se basan en este principio son la sinterización selectiva por láser, la fusión selectiva por láser y la fusión por haz de electrones.

#### ➤ Sinterización selectiva por láser

Los términos sinterización por láser y sinterización por láser selectiva (SLS) se utilizan principalmente para máquinas que procesan plásticos.

Las máquinas están formadas por un espacio de construcción lleno de polvo y un escáner láser en la parte superior que genera el contorno xy. La parte inferior del espacio de construcción está diseñada como un pistón móvil que se puede mover en la dirección z. La superficie del lecho de polvo forma el área de construcción, donde se generan las capas.

Se calienta todo el espacio de construcción para minimizar la potencia requerida por el láser y para reducir las deformaciones. Para evitar la oxidación el espacio de construcción se inunda con un gas protector.

Los datos de contorno se generan a partir del modelo CAD. Donde el rayo láser golpea la superficie del polvo, las partículas son localmente fundidas. Después de la solidificación de una capa, el pistón en la parte inferior del espacio de construcción será bajado por la cantidad de una capa de espesor, lo que también significa que el lecho de polvo y la parte de crecimiento baja. El espacio libre sobre el lecho de polvo se rellena con polvo fresco, que se extrae del depósito de polvo adyacente por medio de un rodillo.

La sinterización permite el procesamiento de todo tipo de materiales como plásticos, metales y cerámica. Básicamente, las máquinas tienen un diseño muy similar. Las máquinas son adaptadas a los diferentes materiales mediante modificaciones de *software* y pequeños cambios en el *hardware*.

➤ Fusión selectiva por láser

La fusión selectiva por láser (SLM) es muy similar a la sinterización selectiva por láser. Fue desarrollada especialmente para la fabricación de metales muy densos. El material es totalmente derretido por el láser, generando una piscina de fusión selectiva, que da como resultado una parte completamente densa después de la solidificación. El diseño de las máquinas se asemeja en gran medida a las máquinas de sinterización por láser.

➤ Fusión por haz de electrones

Para la fusión local del material en lugar de un láser se puede utilizar un haz de electrones. Este procedimiento se llama fusión por haz de electrones (EBM). Para el procesamiento de materiales por medio de un haz de electrones se requiere de vacío, por lo que es necesario cerrar la cámara de construcción.

❖ Modelado por fusión de capas

La fusión por capas de plásticos extruidos se denomina modelado por fusión de capas (FLM). El proceso se realiza con material termoplástico prefabricado que es fundido por medio de unas boquillas y aplicado en tiras. Desde el punto técnico el FLM es un proceso de extrusión. Durante la fabricación las piezas tienen que ser apoyadas en una superficie.

➤ Modelado por deposición fundida

Una máquina FDM consta de un espacio de construcción normalmente cerrado y calentado para el procesamiento de plásticos, un cabezal de extrusión y una plataforma de impresión. Es el cabezal de extrusión es el que proporciona la deposición de material correspondiente a cada capa en el plano XY.

El material de construcción es un cable de plástico delgado y prefabricado, llamado filamento, que alimenta continuamente al cabezal de extrusión. El material se derrite



parcialmente por calentamiento eléctrico y es extruido a través de una boquilla, que define el diámetro del filamento. La plataforma de impresión se mueve en la dirección z para definir el espesor de capa. El proceso de construcción puede requerir el uso de soportes, estos son generados bien por la misma boquilla que realiza la impresión de la pieza o bien por una segunda boquilla que extruye un material diferente.

Las propiedades características de las piezas FDM se asemejan a las de las piezas moldeadas por inyección. Presentan un comportamiento anisotrópico, que puede reducirse mediante el ajuste de parámetros y un precalentamiento adecuado del material.

El posprocesamiento significa la eliminación de los soportes, que se puede realizar mediante un lijado y pulido, o mediante un dispositivo de lavado especial con sosa cáustica. El pulido requiere habilidades de trabajo manual y necesita tiempo, y da como resultado una alta calidad de superficie y resultados sorprendentemente buenos. Por supuesto, un pulido intensivo reduce la precisión de las piezas.

#### ❖ Proceso de aglutinación de polvos

La inyección activa de aglutinantes líquidos en la superficie del lecho de polvo se denomina impresión tridimensional (3DP).

La mayoría de ellos funcionan en un proceso de dos pasos, porque después de la fase de construcción (primer paso), la pieza debe infiltrarse (segundo paso). En el primer paso, algunos procesos, especialmente los sistemas de procesamiento de metales producen una pieza en verde, de esta pieza en verde se eliminará el aglutinante mediante un tratamiento térmico y una posterior sinterización. Así la pieza obtendrá las propiedades mecánicas finales. Existen diferentes impresoras que trabajan con diversos materiales, como arena, metales o plásticos.

#### ❖ Fabricación de laminado por capas

Cortar contornos de láminas prefabricadas o láminas de espesor constante de acuerdo con el conjunto de datos CAD 3D y conectarlos con la superficie de la capa anterior se conoce como fabricación de laminado en capas (LLM). Las láminas pueden ser de papel, plásticos, metales o materiales cerámicos. Se pueden utilizar herramientas de corte, láseres, cuchillos o molinos. La conexión de las capas consecutivas es realizada por encolado, ultrasonido, soldadura o soldadura por difusión. La mayoría de los procesos solo necesitan un paso de fabricación, aunque algunos requieren posprocesamientos como sinterización en un horno de recocido. La ventaja básica del proceso LLM es la rápida fabricación de piezas.

#### ➤ Fabricación de objetos laminados

La fabricación de objetos laminados (LOM) se trata del proceso de fabricación por laminado de capas más antiguo y conocido en el mundo. El material de construcción consiste en un papel enrollado cuya parte inferior está recubierta con pegamento, que se activa

durante el proceso de recubrimiento por calentamiento. La máquina contiene una plataforma de construcción, móvil en la dirección z, y un dispositivo para desenrollar el papel, colocar en la plataforma de impresión, enrollar el papel sobrante en el lado opuesto y un láser que corta los contornos.

### 2.2.3. Fabricación aditiva metálica

La FA ha ido evolucionando, lo que ha propiciado la aparición de nuevas tecnologías y que cada día nuevos materiales sean susceptibles de ser empleados. A continuación, se muestra una gráfica que representa los tipos de materiales disponibles para FA y donde se puede ver que la cantidad de distintos metales disponibles está a la par de los polímeros y ambos muy distanciados del resto de materiales.

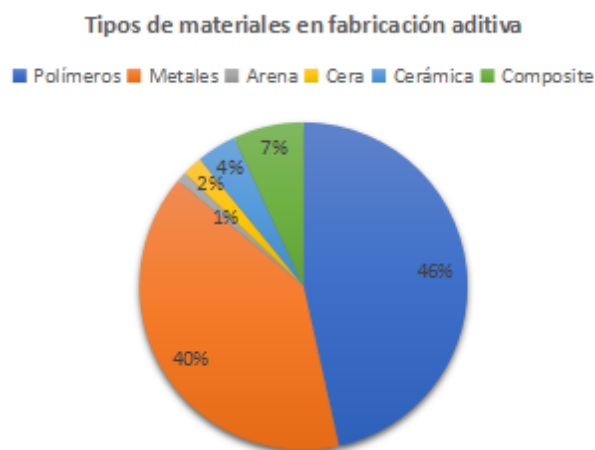


Figura 4. Tipos de materiales en FA. Fuente: (Balbás Calvo, Espinosa, & Dominguez Somonte, 2018)

La primera técnica desarrollada en la fabricación aditiva fue en 1971 por Mitsubishi. Se trató de la fabricación de un recipiente a presión mediante soldadura SAW y TIG. En 1983 Kussmaul emplea dicha técnica para elaborar componentes de acero para aplicaciones nucleares. A este tipo de FA se le conoce como WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*), esta técnica se basa en las técnicas tradicionales de soldadura, donde se usa un arco eléctrico como fuente de calor que funde el metal y lo deposita en capas superpuestas. (Balbás Calvo, Espinosa, & Dominguez Somonte, 2018)

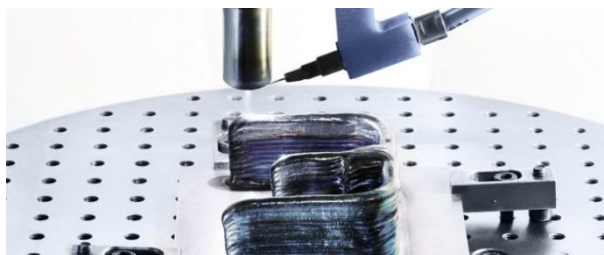


Ilustración 5. Pieza fabricada mediante tecnología WAAM. Fuente: (NIPPON GASES, s.f.)

La segunda técnica desarrollada en la fabricación aditiva de metales fue la conocida como *Selective Laser Sintering* (SLS). Esta es presentada por Deckard & Beaman en 1986 pero publicada como patente en 1990. Ese mismo año es cuando se imprime la primera pieza, formada principalmente por cobre.

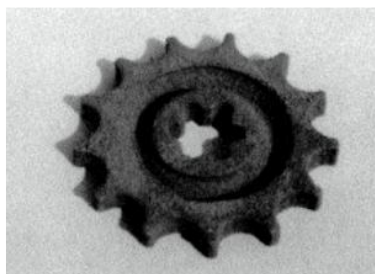


Ilustración 6. Primera pieza metálica realizada mediante la técnica SLS. Fuente: (Balbás Calvo, Espinosa, & Domínguez Somonte, 2018)

En la década de los 90 surgen numerosas nuevas técnicas de FA con metales. En 1991 Helisys comercializa por primera vez la tecnología de fabricación aditiva *Laminated Object Manufacturing* (LOM). Por otra parte, la técnica *Selective Laser Melting* (SLM) se desarrolló en 1995 en un proyecto de investigación en el Fraunhofer Institute ILT in Aachen (Alemania). En 1997 se funda la compañía AeroMet, esta desarrolla un proceso llamado *Laser Additive Manufacturing* (LAM). Esta tecnología utiliza láseres de alta energía para la fusión de polvos de aleaciones titanio-aluminio y fue empleada en el sector aeroespacial. Ese mismo año, la empresa Optomec expone la tecnología *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), la cual consiste en la fundición de una fina capa de la pieza a través de un láser seguido de una boquilla que libera polvos metálicos que se unen a esa capa. Otra de las técnicas que aparecen en el último año de esta década es el método *Ultrasonic Consolidation* (UC), presentado por Dawn White. Esta técnica crea capas intersticiales de metales a bajas temperaturas por efecto de vibraciones ultrasónicas.

Durante la siguiente década, varias compañías se centran en el desarrollo y comercialización de diversas máquinas de FA con metales. Al inicio estas suponían un coste muy elevado, pero con el paso del tiempo se han ido democratizando y mejorando sus prestaciones. Además, la posibilidad de emplear nuevos metales ha ido creciendo.

Hoy en día existe una amplia gama de opciones en el mercado, cada una con sus diferentes prestaciones dependiendo de factores como el sitio donde vaya a ser instalada, del uso y las propiedades que se requieran en las piezas impresas o el tipo de metal que se necesite imprimir. Ejemplo de ello son equipos como la impresora M450 de Meltio, esta emplea una tecnología patentada por la propia empresa denominada *Laser Metal Deposition* (LMD), técnica basada en la *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) y la WAAM (3Dnatives, s.f.). Dicha impresora puede ser situada de forma estacionaria en una cabina, conectada al brazo de un robot o integrada en un centro CNC para una fabricación aditiva híbrida. Otro ejemplo es el sistema Metal X de Markforged, con el cual se desarrollará el presente proyecto y se detallará en profundidad más adelante. Este sistema emplea la tecnología *Atomic Diffusion Additive Manufacturing* (ADAM).

Una de las últimas incorporaciones al mundo de la FA con metales ha venido de la mano de Ultimaker. La marca holandesa ha desarrollado el llamado *Ultimaker Metal Expansion Kit*, el cual incluye una serie de accesorios como filamentos metálicos y boquillas para ser incorporados en su impresora Ultimaker S5. Emplea la tecnología *Fused Filament Fabrication* (FFF). Este kit facilita la posibilidad de imprimir con metales a prácticamente cualquier usuario o empresa sin tener que realizar un gran desembolso, ya que tiene un precio cercano a los 1400€ (Tienda SICNOVA 3D, s.f.). Precio que ha de ser sumado al coste de la impresora, que ronda los 7700€. La desventaja que presenta este sistema es que no realiza el ciclo completo para obtener la pieza final, sino que con la S5 se imprime la pieza en verde y posteriormente se tiene que enviar al proveedor designado para que finalice su elaboración con un proceso de lavado seguido de otro de sinterizado. A continuación, se muestra una figura que representa el flujo que debe seguir una pieza metálica impresa con la Ultimaker S5 y el kit de expansión de metal.

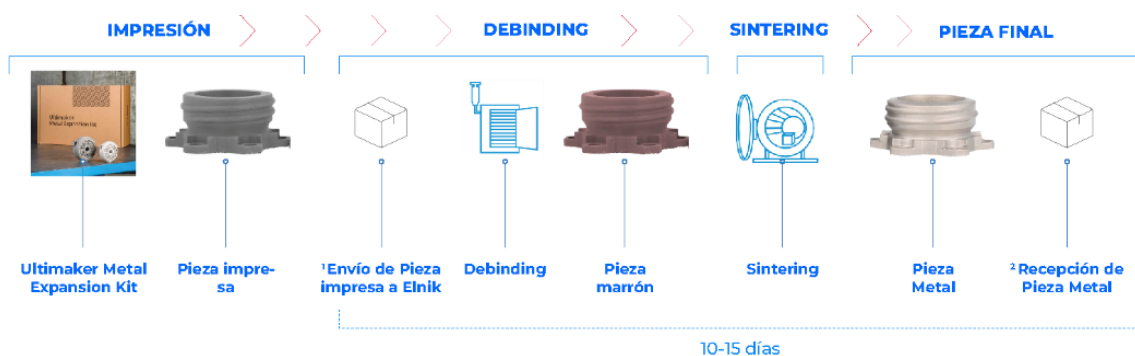


Figura 5. Proceso de impresión con el Ultimaker Metal Expansion Kit. Fuente: (SICNOVA Blog, s.f.)

Es un procedimiento muy similar al que ofrece el sistema Metal X para obtener una pieza final de fabricación aditiva metálica, pero con la ventaja de la baja inversión inicial y con la desventaja de que el usuario no puede realizar el ciclo completo, sino que depende de una empresa externa. Además, el tiempo del ciclo completo es mucho mayor.

### 2.2.3.1. Sistema Metal X

La tecnología empleada por el sistema Metal X es la tecnología ADAM, *Atomic Difusion Additive Manufacturing*. Consiste en un proceso de principio a fin, en el que toman parte tres elementos diferentes se encarga de dar forma a las piezas y los dos siguientes se encargan de procesar la pieza en verde. (Markforged Resources, s.f.)

La tecnología ADAM consta de tres etapas. En la primera se les da forma a las piezas metálicas, empleando para ello polvo metálico junto con aglutinantes en forma de filamento. Posteriormente se pasa a una fase de lavado donde se retira parte de este aglutinante en la estación de lavado. El resto de los aglutinantes se eliminan en la tercera fase en el horno de sinterizado.



*Ilustración 7. Sistema de impresión Metal X de Markforged. De izquierda a derecha: horno de sinterizado, impresora, lavadora. Fuente: (Markforged Printers, s.f.)*

La impresora se alimenta de dos tipos de materiales, por un lado, filamento metálico y por otro lado filamento cerámico. Ambos permiten generar una pieza en verde que se procesará para obtener una pieza marrón y finalmente se sinterizará para obtener una pieza metálica.

Las principales ventajas que ofrece este sistema frente a otras tecnologías de fabricación aditiva metálica son su bajo coste, su seguridad al no trabajar con metales en polvo, sino que se trabaja con filamentos evitando así atmósferas peligrosas, y sobre todo su versatilidad en cuanto a las distintas posibles aplicaciones.

La unidad de lavado es el segundo equipo que conforma el sistema Metal X. En esta se sumergen en una cámara con un disolvente las piezas en estado verde obtenidas en la impresora. El disolvente se encarga de eliminar una serie de aglutinantes que conforman el filamento metálico. Una vez las piezas han estado expuestas al disolvente durante un tiempo determinado en función de su geometría, se realiza una comprobación de su peso para evaluar si la pieza ha perdido el porcentaje de masa previsto por el software de la impresora. En el caso de que así sea la pieza está lista para ser sinterizada, si por el contrario la pieza no ha perdido la masa esperada deberá volver a ser expuesta al disolvente donde terminará de limpiar ese aglutinante. Esto es así para introducir piezas en el horno lo más limpias posibles.

La lavadora cuenta con dos cámaras en las que se realiza una fase en cada una de ellas. En la primera se realiza el lavado, es decir, donde se sumerge la pieza en disolvente. En la segunda simplemente se dejan las piezas a secar. Las piezas tienen que quedar totalmente secas por lo que el disolvente se tendrá que evaporar al completo. La lavadora trabaja con una tecnología ebullición-condensación. El disolvente se introduce en estado

líquido y la máquina lo mantiene a una temperatura constante. El disolvente tenderá a evaporarse, por lo que unas bobinas de condensación lo que harán será condensarlo comenzando así un ciclo. Este ciclo ayuda a almacenar el disolvente durante el mayor tiempo posible pero no de forma infinita ya que siempre existen unas leves pérdidas, esto conlleva a tener que alimentar de forma eventual la lavadora.

Por último, el equipo que completa el sistema Metal X es el horno de sinterizado. Es el equipo en el cual se introducen las piezas marrones, es decir, libres de la mayor parte de aglutinantes que conforman el filamento metálico y donde se completa una doble fase. Una fase inicial, conocida como *desaglutinamiento*, que consiste en eliminar el aglutinante que no ha sido posible quitar en la lavadora; y por último una fase de sinterizado. Cuando se quema el aglutinante el tamaño de la pieza se ve reducido, pero la diferencia se puede predecir y ajustar con precisión en el archivo CAD para que el resultado final sea exactamente el deseado.

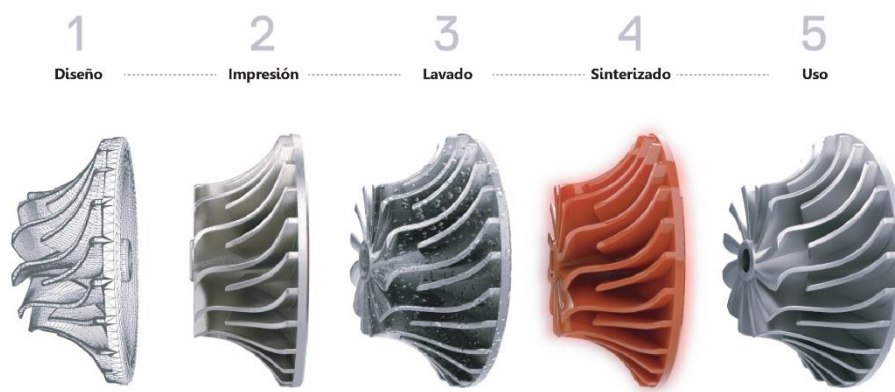


Figura 6. Flujo de operaciones para obtener una pieza con el sistema Metal X.  
Fuente: (Markforged Resources, s.f.). Edición: Propia.

Actualmente existen dos modelos de hornos de sinterizado cuya única diferencia es la capacidad de volumen de sinterización por ciclo. El horno se alimenta principalmente de dos tipos de botellas de gases, una de argón y otra de una mezcla de argón e hidrógeno. Gracias al panel previo al horno y posterior a las botellas se controla la presión de los gases para enviarlos a una presión determinada al horno. Con los gases dentro del horno se inertiza la cámara y se someten las piezas a una determinada temperatura en función del material y el tipo de tratamiento térmico. Estas dos variables también influirán en el cálculo del tiempo de sinterizado.

Para poder abrir el horno habrá que esperar a que el ciclo de enfriamiento finalice. Una vez el proceso haya acabado se podrán retirar las piezas ya sinterizadas. En el caso de que las piezas hayan requerido soportes en la fase de impresión es el momento de retirarlos.

Propiedades de la impresora	Proceso	FFF en metal
	Volumen de construcción	300 x 220 x 180 mm
	Tamaño de la impresora	575 x 467 x 1120 mm
	Cámara de impresión	Caliente
	Cama de impresión	Caliente, hoja de impresión sellada al vacío, nivelación automática de la cama
	Sistema de impresión	Dos boquillas (material metálico y material de liberación)
	Geometría de las piezas internas	Relleno de celdas cerradas (triangular) o piezas sólidas
Materiales	Material metálico	Acero inoxidable (17-4 PH), Acero para herramientas (H13, A2, D2), Inconel 625, Cobre
	Material de liberación	Cerámico
	Bobinas	Filamentos de polvo unidos
Propiedades de las piezas	Tamaño máximo de piezas	250 x 183 x 150 mm, 10kg
	Soportes	Material metálico con capas de material cerámico de liberación
	Resolución de la capa Z	50 $\mu\text{m}$ – 125 $\mu\text{m}$ (postsinterización)
Software	Software suministrado	Eiger Cloud (Otras opciones disponibles bajo coste)

Tabla 5. Propiedades de la impresora del sistema Metal X. Fuente: (Markforged Printers, s.f.)

Lavadora	Tamaño de la lavadora	609 x 685 x 1067 mm
	Tiempo de lavado	12-72 horas
	Disolvente	Opteon SF-79
	Volumen de trabajo	356 x 254 x 203 mm

Tabla 6. Propiedades de la lavadora del sistema Metal X. Fuente: (Markforged Printers, s.f.)

Horno de sinterizado	Tamaño del horno de sinterizado	1200 x 700 x 1500 mm
	Tiempo de ejecución	17-31 horas
	Volumen de sinterización	18356 cm <sup>3</sup>
	Temperatura interna máxima	1300°C

Tabla 7. Propiedades del horno de sinterizado del sistema Metal X. Fuente: (Markforged Printers, s.f.)

La tecnología ADAM puede crear piezas metálicas con alta precisión, lo que la convierte en una contribución valiosa a la fabricación de piezas sin necesidad de posprocesados posteriores, es decir, listas para ser usadas. Siendo por tanto una opción realista y rentable para tiradas pequeñas y medianas de piezas metálicas.

#### 2.2.4. Inclusión de la fabricación aditiva en las herramientas de corte

Son pocas las líneas de investigación que abordan el estudio de elaboración de herramientas de corte mediante fabricación aditiva, o al menos que hayan dejado constancia a través de artículos científicos.

A finales de 2016 se publicó una patente relacionada con la fabricación de herramientas de corte mediante fabricación aditiva (Estados Unidos Patente nº 14/710644, 2016). La patente comprende un método para producir una herramienta de corte a partir de un polvo de partida usando un proceso de sinterización selectiva por láser.

Otra investigación, en concreto sobre plaquitas de corte ha sido llevada a cabo por un grupo de investigadores de la Universidad de Bohemia Occidental, situada en la República Checa (Sýkora & Kroft, 2021). La publicación tan solo refleja un primer ensayo preliminar del que los propios investigadores indican que requiere de más estudios en profundidad.

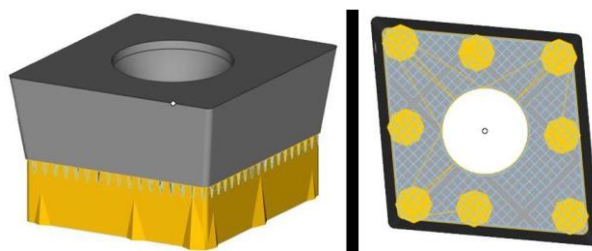


Ilustración 8. Representación de la plaquita de corte perteneciente al estudio de Universidad de Bohemia Occidental. Fuente: (Sýkora & Kroft, 2021).



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo, se desarrolla, por una parte, la metodología seguida para llevar a cabo las plaquitas de corte realizadas con tecnología de fabricación aditiva, y por otra, la metodología empleada para efectuar los ensayos de mecanizado de las probetas.

El principal objetivo es la elaboración de plaquitas de corte mediante el sistema Metal X de FA metálica, junto con el estudio del resultado obtenido. Para ello, se realizará primeramente un estudio sobre la selección del tipo de ensayo, la aleación con la que realizar las probetas y la herramienta de corte. Posteriormente, se realizarán réplicas mediante FA de la herramienta seleccionada, y finalmente se ensayarán junto a las herramientas comerciales para evaluar su comportamiento.

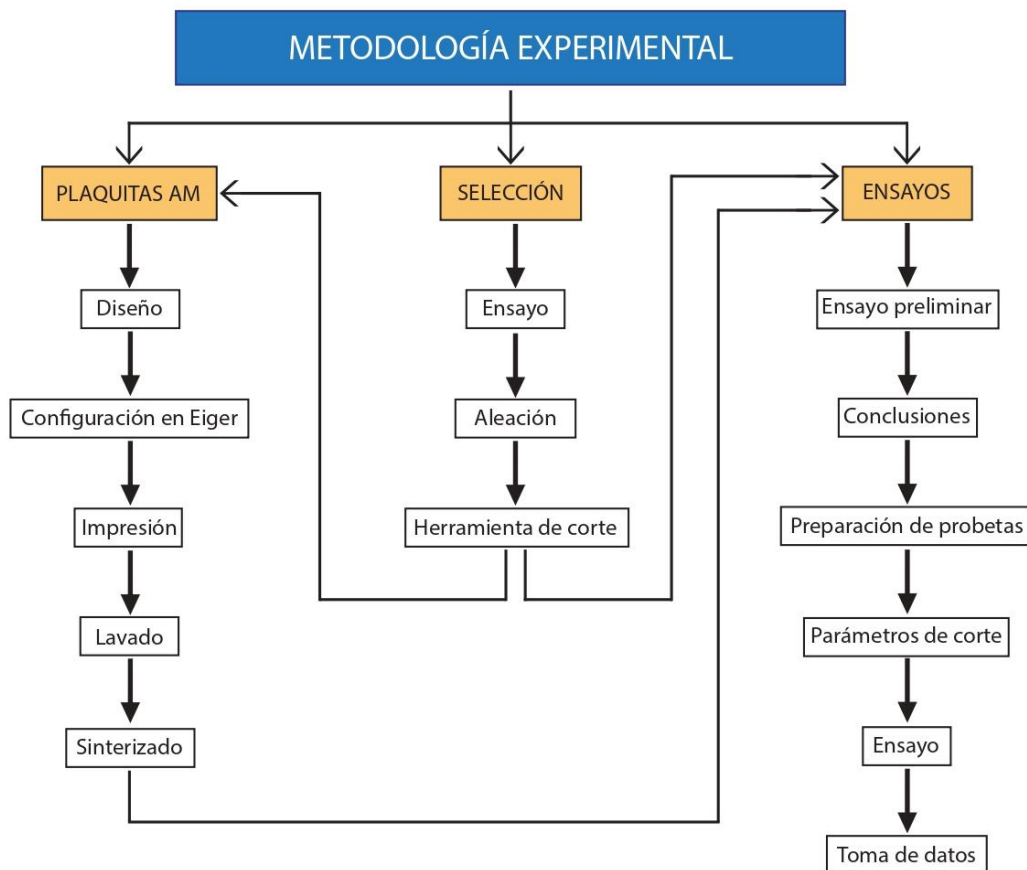


Figura 7. Esquema de la metodología experimental del presente proyecto.

### 3.1. Selección del tipo de ensayo, aleación y herramienta de corte

Lo primero que se ha de determinar es el tipo de ensayo que se quiere realizar, con que material se va a trabajar y la herramienta idónea para dicho mecanizado.

Inicialmente se plantearon tres tipos mecanizados sobre los que sentar las bases de este proyecto, uno era el estudio de brocas para un taladro de banco, otro el estudio de herramientas para una fresadora y por último plaquitas de corte para un torno. Debido a que las brocas para taladro y fresadora tienen el inconveniente de que hay que afilarlas, se decidió que la mejor opción era desarrollar plaquitas de corte para torneado empleando tecnología de FA.

Una vez conocido el tipo de mecanizado, en este caso torneado, se pasa a seleccionar la aleación con la que se va a trabajar. Al ser el primer estudio que se va a realizar con plaquitas fabricadas en la propia universidad, se opta por buscar una aleación que no sea relativamente muy dura. Dentro de los posibles materiales que había disponibles en el taller de máquinas-herramienta de la Escuela de Ingenierías Industriales, la aleación de aluminio EN AW-2030 era de las más blandas. Por lo que se decidió hacer los ensayos sobre probetas de dicha aleación.

El sistema de codificación con el que se designan el aluminio y sus aleaciones depende del país. En Estados Unidos es gestionado por el Instituto Nacional Estadunidense de Estándares, en inglés *American National Standards Institute* (ANSI). La norma correspondiente a dicha designación es la ANSI H35.1, desarrollada por la Asociación del Aluminio de Estados Unidos. El sistema se basa en un código numérico de cuatro dígitos.

El primer dígito indica el grupo al que pertenece la aleación y que está relacionado con el elemento presente en la aleación en mayor porcentaje. En este caso la aleación pertenece al grupo 2, código correspondiente al cobre. Para este grupo el segundo dígito indica modificación de la aleación original, al ser 0 indica aleación original. Los dos últimos dígitos no tienen un significado especial, son simplemente para identificar las diferentes aleaciones que forman el grupo (ASM International, 1992). Varias organizaciones incluyen un prefijo a este código para distinguir aleaciones equivalentes de un sistema de codificación de otro. Por ejemplo, la norma EN incluye para el aluminio el prefijo AW (The Aluminium Association, 2018).

Designación		
Asociación del aluminio	UNS	ISO 209:2007
2030	-	AlCu4PbMg

Tabla 8. Designación de la aleación de aluminio empleada.

Composición (% masa)														
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Otros elementos	Ti	Otros elementos sin especificar		Al
												Cada uno	Total	
0,8	0,7	3,3-4,5	0,20-1,0	0,50-1,30	0,1	-	0,5	-	-	0,20 Bi, 0,8-1,5 Pb	0,2	0,1	0,3	Resto

Tabla 9. Composición de la aleación de aluminio empleada.

El torno con el que se harán los ensayos es el modelo S-90/180 de la marca Pinacho. Se trata de un torno horizontal disponible en la nave taller del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingenierías Industriales.

La selección de las plaquitas de corte comerciales con las que se van a realizar los mecanizados es un acto relevante, ya que debemos encontrar una plaquita capaz de trabajar con la aleación seleccionada. En este caso se va a trabajar sobre barras de una aleación de aluminio. Existen muchos fabricantes de plaquitas, en concreto para este proyecto se ha escogido ISCAR, empresa canadiense con gran experiencia en la fabricación de herramientas de corte.

La selección de la plaquita de corte se ha llevado a cabo escogiendo en el catálogo de la página web de ISCAR parámetros como el tipo de mecanizado o el material a mecanizar. La herramienta que mejor se adapta del fabricante ha sido la DCMT 11T308-14 IC20 (ISCAR eCatalog, s.f.). Se trata de una plaquita rómbica positiva de 55° sin recubrimiento, recomendada para operaciones de torneado de semiacabado y acabado y control de viruta con avance medio. Puede ser empleada en una amplia gama de materiales, incluyendo materiales blandos y aleaciones exóticas.

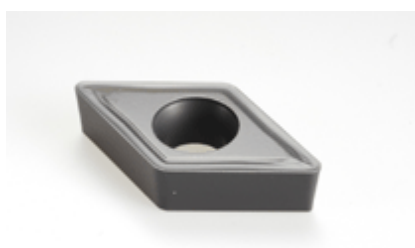


Ilustración 9. Plaquita de corte DCMT 11T308-14 IC20 del fabricante ISCAR. Fuente: (ISCAR eCatalog, s.f.)

Esta plaquita tiene el rango de valores de los parámetros de corte aconsejables por el fabricante que se muestran a continuación.

$V_c$ (m/min)		$F_z$ (mm/rev)		$A_p$ (mm)	
Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
200	600	0,14	0,29	1,5	3

Tabla 10. Rango de valores de los parámetros de corte aconsejados por el fabricante para la plaquita de corte DCMT 11T308-14 IC20.

### 3.2. Metodología experimental para la elaboración de las plaquitas de corte de fabricación aditiva

Para llevar a cabo la réplica de las plaquitas de corte comerciales lo primero es conocer el mayor número de datos posibles de dichas plaquitas para poder modelarlas en un programa de diseño 3D para posteriormente ser impresas con el equipo Metal X.

### 3.2.1. Diseño de las plaquitas de fabricación aditiva

Para realizar el diseño lo primero que se debe conocer son los valores de los parámetros más representativos que identifican la plaquita. La norma ISO 13399-1:2006 es la que establece como han de identificarse estos valores para poder estandarizar dicha información (ISO 13399-1:2006 Cutting tool data representation and exchange — Part 1: Overview, fundamental principles and general information model, 2006). Los valores de estos parámetros en relación con la plaquita DCMT 11T308-14 IC20 son los siguientes:

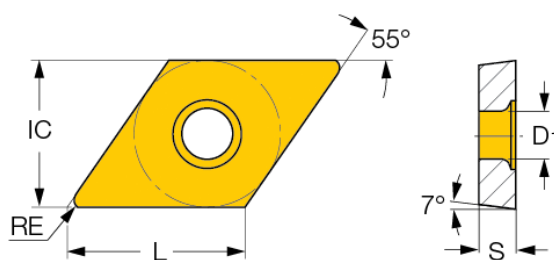


Figura 8. Planos de la plaquita DCMT 11T308-14 IC20. Fuente: (ISCAR eCatalog, s.f.)

L	IC	S	RE	D1
11,60	9,52	3,97	0,80	4,40

Tabla 11. Valores de los parámetros representados en el plano de la Figura 4. Fuente: (ISCAR eCatalog, s.f.).  
Edición: Propia.

Con estos valores se pasa a modelar las plaquitas. El programa con el que se llevará a cabo el modelado de la plaquita destinada a ser impresa es SOLIDWORKS. Este programa es una solución de diseño tridimensional completa que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado de piezas, crear ensamblajes y realizar los planos necesarios de forma rápida, precisa y fiable (Gómez González, 2008).

SOLIDWORKS se caracteriza por tener un entorno intuitivo y por disponer de herramientas de diseño fáciles de utilizar. Todo integrado en un único programa con más de 45 aplicaciones complementarias para facilitar el desarrollo de sus productos.

El entorno de trabajo de SOLIDWORKS está dividido en tres zonas. En la superior se encuentra la barra de menús donde se están todas las herramientas, la ventana de trabajo es la zona dónde se visualiza el modelo que se está diseñando el modelo, y la zona de gráficos donde se visualizan las operaciones que se han realizado en el modelo.

Actualmente es un programa que se emplea en diferentes sectores como el Aeroespacial, Automoción, Defensa, Educación, Ingeniería industrial e Ingeniería mecánica entre otros.

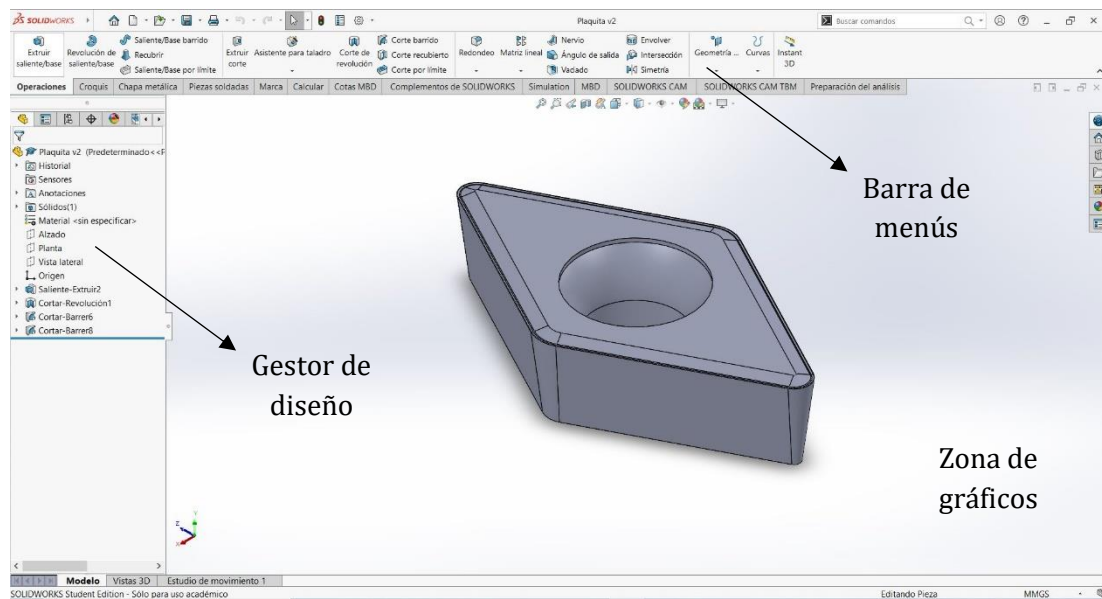


Figura 9. Entorno de SOLIDWORKS.

A continuación, se muestran una serie de ilustraciones de la réplica de la plaquita DCMT 11T308-14 IC20 modelada con SOLIDWORKS.

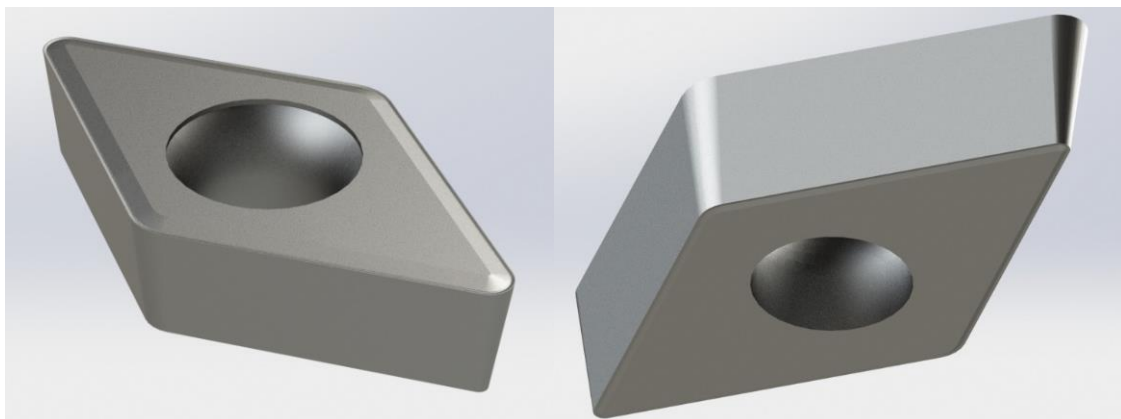


Ilustración 10. Plaquita modelada en vista isométrica superior e inferior respectivamente.

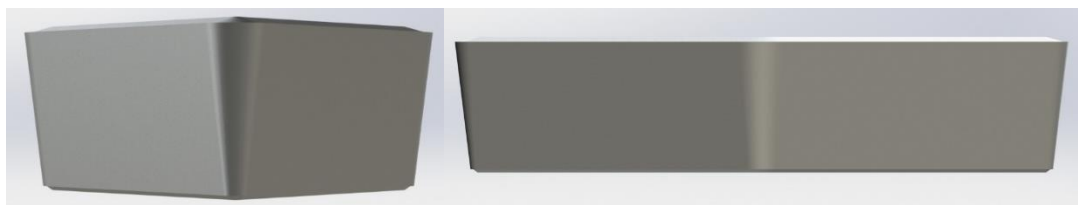
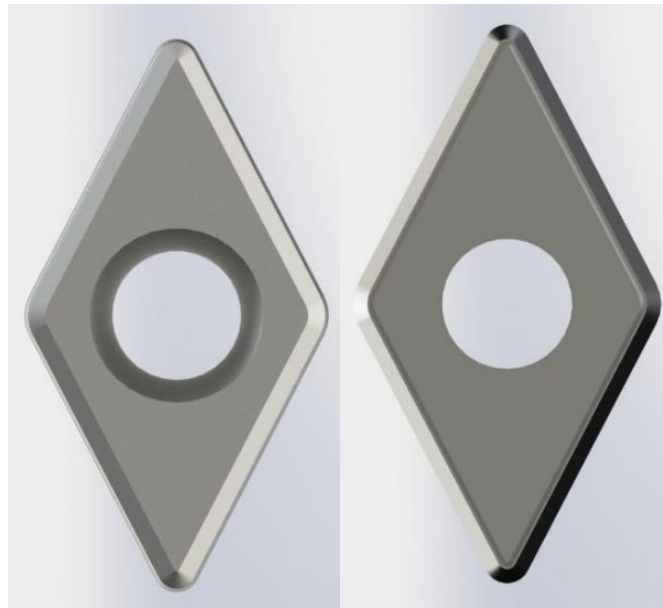


Ilustración 11. Plaquita modelada en vista alzado y perfil respectivamente.



*Ilustración 12. Plaquita modelada en vista superior y vista inferior respectivamente.*

Con respecto al diseño, decir, que no se ha podido conseguir representar la geometría del rompevirutas con tanto detalle como muestra la plaquita de corte comercial por no tener los datos para representarlos, ya que estas cotas no son proporcionadas por el fabricante.

#### 3.2.1.1. Restricciones de diseño establecidas por Markforged para el sistema Metal X

Puesto que lo que se ha buscado es replicar la geometría de la plaquita comercial no se ha podido realizar el diseño comprobando previamente si cumple con lo recomendado por el sistema Metal X en la guía de diseño (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.). Lo que se hará es comprobar a posteriori el modelo. Las limitaciones que afectan a la geometría que es capaz de proporcionar en piezas finales afecta a diversos parámetros para la pieza de estudio en concreto.

- Tamaño máximo de las piezas finales

Los valores de las dimensiones máximas vienen impuestos por el volumen de trabajo de la impresora y por el de sinterización del horno, que son 300 x 220 x 180 mm y 235 x 68,3 x 69,2 mm respectivamente. Las dimensiones máximas de la plaquita son 9,15 x 3,97 x 17,44 mm, en este sentido se está muy por debajo de lo establecido, por tanto, se podrá hasta imprimir si se requiere varias plaquitas a la vez en un ciclo de impresión.

- Tamaño mínimo de las piezas finales

El tamaño mínimo de la pieza está limitado por el ancho y la altura de capa de la extrusión. Las dimensiones se derivan del número de capas de techo, capas de suelo y laterales necesarias para una impresión exitosa.

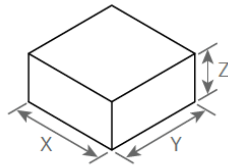


Figura 10. Representación del tamaño mínimo de las piezas finales. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.)

X	2,00 mm
Y	2,00 mm
Z	1,3 mm

Tabla 12. Valores del tamaño mínimo de las piezas finales. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.)

La plaquita supera en todas sus dimensiones al valor más restrictivo, esto hace que pueda ser orientada en la bandeja de la impresora según mejor convenga.

- Voladizo máximo sin soporte

Esta característica se referencia en la pieza mediante el ángulo mínimo con respecto a la horizontal en el que una pieza puede imprimirse sin necesidad de soportes. Por el contrario, Eiger generará soportes para todos los voladizos con ángulos por debajo de  $\theta$ .

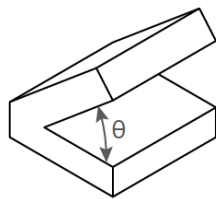


Figura 11. Representación del voladizo. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.)

17-4 PH, A2, D2, H13	Inconel, Cobre
$\theta$ : 45°	$\theta$ : 50°

Tabla 13. Valores del ángulo mínimo. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.)

El ángulo de incidencia es de  $7^\circ$ , por lo que el ángulo  $\theta$  representado en la figura anterior es de  $83^\circ$ . Se tendría voladizo para el caso de que se imprima con la cara inferior tocando la bandeja de la impresora, pero no se generaría soporte por tener un ángulo mayor del ángulo mínimo.

- Diámetro mínimo de agujeros

Los agujeros con un diámetro demasiado pequeño pueden cerrarse durante la impresión o imprimirse con distorsiones. Los orificios situados en la superficie horizontal son impresos con mayor precisión que los situados en superficies verticales.

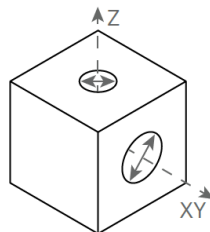


Figura 12. Representación del diámetro mínimo de agujeros. Fuente: (Markforged Resources, s.f.)

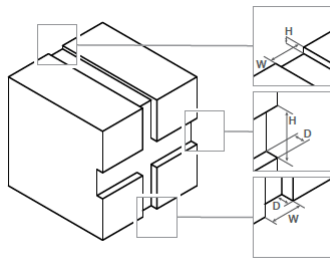
XY	1,5 mm
Z	1,0 mm

Tabla 14. Valores de del diámetro mínimo de agujeros. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.)

Al igual que con la restricción del tamaño mínimo de pieza, el diámetro del agujero de la plaquita al ser de 4,36 mm cumple para cualquiera de las dos opciones y hace pueda ser orientada en la bandeja de la impresora según mejor convenga.

- Características mínimas de grabaciones

Una característica grabada es aquella que está hundida debajo de la superficie de moldeo. Ejemplos de estas características podrían ser letras o texturas. Las características grabadas pueden distorsionarse con el resto de la pieza sin son muy pequeñas.



Grabaciones en el plano Z	Grabaciones horizontales en el plano XY	Grabaciones verticales en el plano XY
H: 0,13 mm	H: 1,5 mm	W: 0,5 mm
W: 0,50 mm	D: 0,5 mm	D: 0,5 mm

Figura 13. Representación de las características mínimas de grabaciones. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.)

Tabla 15. Valores de las características mínimas de grabaciones. Fuente: (Design Guide for 3D Printing with Metals, s.f.)

La zona del filo y rompevirutas puede asemejarse a una grabación por ser de dimensiones tan reducidas. Al tener una geometría curva, no se puede comprobar con total seguridad, pero se estima que será complicado que la impresora pueda alcanzar tal grado de detalle en esta zona.

### 3.2.2. Exportación del diseño al software Eiger

El programa de laminación de las piezas y selección de características de impresión para el sistema Metal X es el Eiger, programa desarrollado por Markforged y que se suministra con la impresora. Una vez modelada la plaquita en SOLIDWORKS se exporta en formato STL, ya que es con el que trabaja Eiger.

Dentro del programa lo primero que se hace es escoger la orientación de las piezas en la bandeja de impresión. De todas las posibles opciones, la que ofrece mayores ventajas es la orientación que sitúa la plaquita en su posición natural, ya que el orificio se construye del diámetro más pequeño al más grande; la cara superior queda libre, por lo que habrá mayores opciones de poder imprimir la geometría compleja del filo y el rompevirutas. Evitando además generar soportes o posibles distorsiones en el orificio si se escogiese una orientación vertical.

El programa de forma automática escala la pieza para contrarrestar la futura contracción que sufrirá cuando se eliminen los aglutinantes que se encuentran en el filamento metálico en las fases de lavado y sinterización.

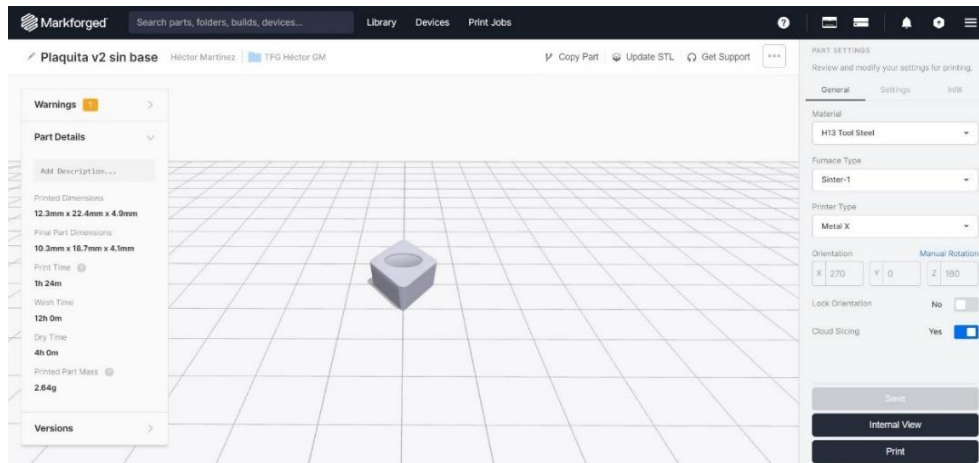


Figura 14. Plaquita situada en la bandeja de impresión del programa Eiger.

Una vez seleccionada la posición en la que se imprimirá la plaquita se pasa a seleccionar los parámetros de impresión. En concreto, la selección del material se desarrollará en detalle en el siguiente punto.

General	
Material	H13 Tool Steel
Horno	Sinter-1
Impresora	Metal X
Ajustes	
Altura de capa postsinterizada	0,125
Unidades	Métrica
Escala	1
Estabilidad del sinterizado	Sí
Uso de cama	No
Relleno	
Patrón de relleno	Sólido
Capas de pared	4

Tabla 16. Parámetros de impresión seleccionados en Eiger.

### 3.2.2.1. Selección del material

Para escoger el material correcto deben de establecerse los requisitos funcionales de la pieza que conducirán a un material óptimo para el trabajo requerido. Para el caso de una plaquita de corte, esta estará en contacto con una probeta de aluminio en unas condiciones agresivas y expuesta a altas temperatura.

Actualmente el sistema Metal X cuenta con cuatro categorías de materiales:

- Aceros inoxidables: donde por ahora solo se encuentra el acero inoxidable 17-4 PH. Este es un acero inoxidable martensítico común, que se puede. Estas características

lo hacen un material muy versátil que se puede emplear en una amplia variedad de aplicaciones.

- Aceros para herramientas: aceros que han sido optimizados para cortar y conformar materiales, siendo así más resistentes a la abrasión y más duros. Cada acero ha sido optimizado para trabajar con ciertos tipos de materiales y aplicaciones.
  - A2: es un acero para herramientas versátil y de uso general que equilibra la resistencia al desgaste y la tenacidad. Es idóneo para aplicaciones típicas de herramientas basadas en impacto o conformado en frío, como estampado, punzonado o doblado de metales.
  - D2: es un acero para herramientas caracterizado por su resistencia al desgaste y dureza en aplicaciones de trabajo en frío. Se puede afilar y tratar térmicamente para aumentar su dureza y mantener el filo, y se puede usar para aplicaciones de herramientas de corte.
  - H13: es un acero para trabajos en caliente optimizado por su dureza a altas temperaturas y resistencia a la abrasión. Esto lo hace ideal para aplicaciones de trabajo a alta temperatura como insertos, núcleos o matrices.
- Superaleaciones: en este grupo se encuentra el Inconel 625, es un material adecuado para entornos de alta temperatura y presión ya que mantiene su resistencia en un amplio rango de temperaturas. La combinación de estas características con la resistencia a la corrosión que posee, lo hacen ideal para aplicaciones petroquímicas.
- Metales no ferrosos: hasta el momento el cobre es el único material que forma parte de este grupo. Al ser un material con una alta conductividad eléctrica y térmica es muy útil en aplicaciones que requieren transferencia de corriente o disipación de calor.

De las posibles opciones el que más se ajusta a los requisitos es el acero para herramientas H13. Además, este acero permite un tratamiento térmico en el horno de sinterizado que eleva su resistencia a la tracción y su dureza. Además, el fabricante del equipo con el que se va a llevar a cabo la fabricación de dichas herramientas indica las plaquitas de corte como una posibilidad para dicho material.

### 3.2.2.2. Simulación de la impresión

Con todos los parámetros ya definidos, se pasa a simular cómo se realizará la impresión de la plaquita capa a capa. Se puede ver como los parámetros de impresión seleccionados anteriormente se reflejan en la simulación, como son las cuatro capas de pared o el relleno sólido. Lo que se comprueba en las últimas capas es que no se va a poder imprimir la parte del filo y el rompevirutas con el grado de detalle que se ha modelado.

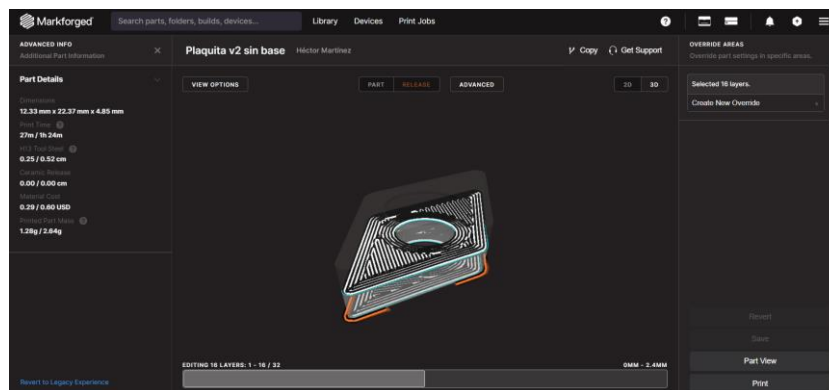


Figura 15. Simulación de la impresión de la plaquita capa a capa.

Una vez definidos y explicados todos los parámetros de impresión se decide el número de plaquitas que se imprimirán a la vez. Se harán dos tandas de impresión, la primera se hará tal y como se representa en la Ilustración 13, con la impresión de 12 plaquitas de forma simultánea.

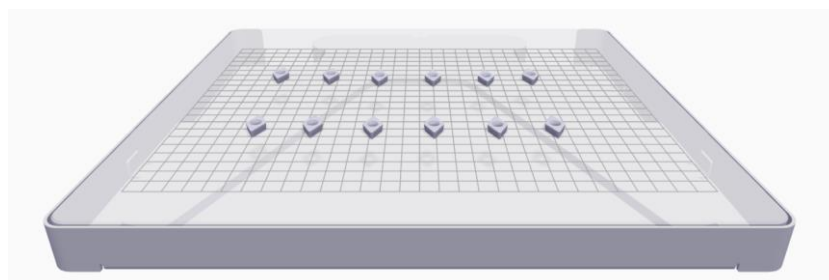


Ilustración 13. Simulación en el programa Eiger de la impresión de las plaquitas en la bandeja de la impresora.

### 3.2.3. Impresión de las plaquitas

Para llevar a cabo la impresión, lo primero que hay que hacer es comprobar que el filamento metálico que está colocado en la impresora es el correcto. En caso contrario, como ocurre para esta impresión hay que cambiarlo.

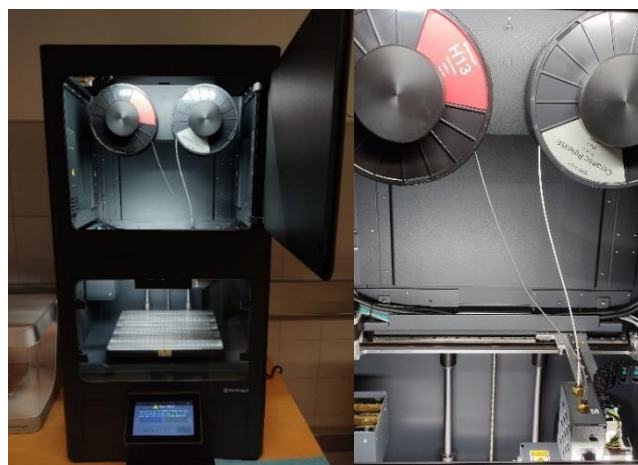
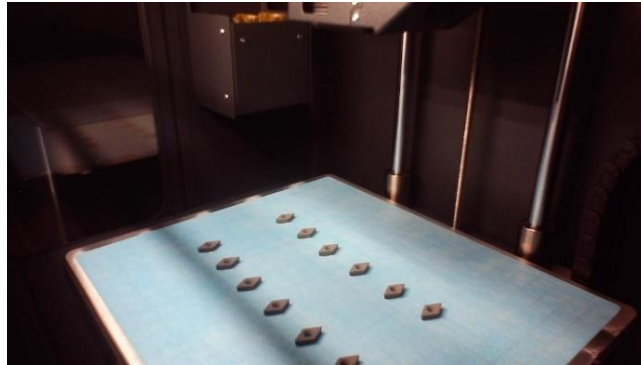


Ilustración 14. Preparación de los filamentos de la impresora.

Tras la finalización de la impresión de las piezas la impresora toma una fotografía que muestra como ha sido el resultado final. Estas plaquitas son piezas en verde, lo que significa que todavía deben pasar por unos procesos hasta ser piezas definitivas. Son frágiles por lo que hay que tener mucho cuidado durante su manipulación.



*Ilustración 15. Plaquitas de corte en verde tras la finalización de la impresión.*

#### 3.2.4. Lavado de las plaquitas

El lavado de las piezas en verde es el siguiente proceso por el que deben pasar las plaquitas en el sistema Metal X, para perder la mayor parte del aglutinante que se encuentra en el filamento. Lo primero que hay que hacer es poner en funcionamiento la lavadora, para ello es necesario rellenar el depósito de la lavadora con el disolvente con el que realiza el ciclo de lavado. Primeramente, se introducen en la cámara húmeda donde estarán completamente bañadas en disolvente, una vez transcurrido el tiempo establecido por el sistema, calculado acorde a su geometría, se escurren y se colocan en la cámara de secado donde el disolvente terminará de evaporarse.



*Ilustración 16. Llenado del centro de lavado del equipo Metal X.*

A continuación, se pesan una a una las plaquitas para comprobar que hayan perdido el peso establecido por Markforged, que en este caso debe suponer la pérdida de al menos un 4% de masa. En el caso de que cualquiera no haya perdido el porcentaje mínimo establecido deberá volver a someterse a un nuevo ciclo de lavado, esta vez más corto. Para este caso, al tratarse de piezas tan pequeñas simplemente la variación de  $\pm 0,01$  g puede hacer que cumpla con el criterio o que no lo haga por muy poco. Por lo que toda aquella pieza que redondeando su porcentaje de masa perdida cumpla con el criterio se tomará como válida.

Código de plaquita	Masa inicial (g)	Masa final (g)	$\Delta$ masa (g)	$\Delta\%$ masa	$\Delta\%$ masa redondeado
1	2,57	2,45	0,12	4,67	5
2	2,57	2,46	0,11	4,28	4
3	2,56	2,46	0,10	3,91	4
4	2,57	2,46	0,11	4,28	4
5	2,57	2,46	0,11	4,28	4
6	2,57	2,46	0,11	4,28	4
7	2,56	2,45	0,11	4,30	4
8	2,56	2,46	0,10	3,91	4
1B	2,56	2,46	0,10	3,91	4
2B	2,57	2,46	0,11	4,28	4
3B	2,58	2,47	0,11	4,26	4
4B	2,57	2,47	0,10	3,89	4
5B	2,56	2,46	0,10	3,91	4
6B	2,58	2,47	0,11	4,26	4
7B	2,57	2,47	0,10	3,89	4
8B	2,57	2,47	0,10	3,89	4
1C	2,58	2,47	0,11	4,26	4
2C	2,58	2,47	0,11	4,26	4
3C	2,58	2,47	0,11	4,26	4

Tabla 17. Masa de las plaquitas impresas antes y después del lavado.

Siendo:

$$\Delta\%masa = \left| \frac{masa_{final} - masa_{inicial}}{masa_{inicial}} \right| \cdot 100$$

Todas las piezas han superado el criterio de pérdida de masa, por lo que están listas para pasar a la siguiente fase.

### 3.2.5. Sinterizado de las plaquitas

El sinterizado de las plaquitas es el último paso antes de tener las piezas finales listas para ser empleadas. Las plaquitas se introducen en el horno en estado marrón, es decir, libres de la mayor parte de aglutinantes, donde completarán una doble fase de desaglomerado y sinterización. Para llevar a cabo este paso, lo que se hace es colocar de forma cuidadosa las plaquitas en la bandeja, evitando que estén en contacto y que no se

salgan de los márgenes. Una vez la bandeja esté completamente introducida en el horno, se pasa a introducir el elemento que aísla la cámara del horno y se cierra la puerta.



*Ilustración 17. Introducción en el horno de sinterizado de la bandeja que contiene las plaquitas de corte.*

Lo siguiente es seleccionar en la pantalla del horno el tipo de sinterizado que se va a realizar. En este caso se seleccionó un sinterizado con tratamiento térmico cuyo principal efecto en las piezas respecto al sinterizado simple es el aumento de la dureza de 40 HRC a 45 HRC y el límite de elasticidad de 800 MPa a 1250 MPa. Para ver en detalle las propiedades del material seleccionado mirar el Anexo B.

Una vez a finalizado el ciclo de enfriamiento se sacan las plaquitas del horno. Como no ha sido necesario emplear soportes, ya están listas para ser empleadas. Para identificarlas se las ha numerado tal y como se mostraba en la tabla del apartado de lavado.



*Ilustración 18. Plaquitas de corte impresas.*

El motivo por el que en la ilustración aparecen 20 plaquitas y en la tabla de lavado hay datos de 19, es debido a que se imprimió una con una escala diferente al resto para un estudio visual previo a la impresión de las tandas. Se han impreso tantas plaquitas ya que la fase del horno es la que consume más energía por el tiempo que tarda. El tiempo no se ve muy afectado por la cantidad de piezas que sitúen en la bandeja, entonces lo que más interesa es llenarla lo máximo posible siempre que se pueda para economizar las piezas.

### 3.3. Metodología experimental para los ensayos

El hecho de ser un proyecto de una posible nueva línea de investigación hace que no se tengan datos de partida sobre los que asentar un ensayo con unos parámetros y valores en concreto. Por ello, es necesario realizar un primer ensayo preliminar sobre el que testar el comportamiento de las plaquitas de corte frente a diferentes valores de velocidad de corte, velocidad de avance y penetración en el torno. Así como evaluar el efecto de emplear un fluido de corte. Una vez se realice este primer ensayo preliminar habrá que sacar las pertinentes conclusiones para poder así definir la metodología del ensayo principal.

#### 3.3.1. Desarrollo del ensayo preliminar

##### 3.3.1.1. Definición

Como se ha mencionado anteriormente, el motivo fundamental de la realización de este ensayo preliminar es la acotación del rango de los valores de los parámetros de corte. Los aspectos como la preparación de probetas se mencionarán sin entrar en mucho detalle, puesto que este acto se redactará de forma extensa en un punto posterior.

Se parte de una barra de 3 metros de longitud y 40 milímetros de diámetro, de la cual se realiza el corte de 4 tochos de 200 milímetros. A estos tochos se les hará el contrapunto y en un principio no se les hará talón, a no ser que se compruebe en los primeros ensayos que es necesario.

##### 3.3.1.2. Selección de los parámetros de corte

Para seleccionar los parámetros de corte se necesita estudiar los valores que recomienda el fabricante para trabajar con sus plaquitas; identificar los valores con los que se trabaja con herramientas enterizas de acero, para tener una idea de estimación de lo que sería recomendable para las plaquitas de corte fabricadas mediante FA; y los valores que es capaz de ofrecer el torno con el que se van a realizar los ensayos.

###### ❖ Datos de las plaquitas DCMT 11T308-14 IC20

$$V_c = 200 - 600 \text{ m/min}$$

$$F_z = 0,14 - 0,29 \text{ mm/rev}$$

$$A_p = 1,50 - 3,00 \text{ mm}$$

Estos son los rangos de valores de los parámetros de corte recomendados por el fabricante para la vida útil de las plaquitas estimada, pero se pueden modificar al alza o a la baja teniendo en cuenta que su vida útil será diferente, ya que no trabajarán en el rango óptimo.

❖ Datos de herramientas enterizas de acero

Como la geometría de las plaquitas diseñadas para ser fabricadas mediante FA está basada en las comerciales de ISCAR, no podemos obtener de un fabricante directamente los rangos de valores. Lo que se hace es observar los valores recomendados para trabajar el aluminio con herramientas de corte de acero rápido, que será lo más parecido a la composición del material de las plaquitas de corte de FA que podamos obtener.

Útiles de corte		<b>CUCHILLAS PARA TORNEADO</b>					TABLA 17 . 12
		<b>VELOCIDADES DE CORTE CON UTILES DE ACERO RÁPIDO</b>					
Material a tornear	Resistencia Dureza	Avance s mm por vuelta					
		0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	
		Velocidad v m por minuto					
Acero suave	45 kg/mm <sup>2</sup>	43	32	24	18	13	
Acero semiduro	60 kg/m <sup>2</sup>	34	25	19	14	10	
Acero duro	85 kg/m <sup>2</sup>	26	21	16	12	8	
Acero ligeramente aleado	90-110 kg/mm <sup>2</sup>	18	13	10	7,5	6	
Acero aleado	110-150 kg/mm <sup>2</sup>	17	12	8,5	6	4	
Acero fundido (moldeado)	50 kg/mm <sup>2</sup>	34	25	19	14	10	
Acero fundido duro	50-80 kg/mm <sup>2</sup>	27	18	13	10	7,5	
Fundición gris	HB 180	48	27	18	14	10	
Fundición dura	HB 220	32	18	13	10	8	
Fundición acerada	HB 250	22	14	11	7,5	5	
Cobre	60-80 HB	56	53	38	28	21	
Latón	80-120 HB	125	85	56	36	27	
Bronce	100 HB	63	48	40	32	24	
Aleaciones blandas de aluminio	20 HB	132	85	56	38	28	
Aleaciones duras de aluminio	25 HB	118	75	50	38	28	
Aleaciones de magnesio	20 HB	1000	900	800	750	700	
Plásticos		60-200					
Goma dura		100					

NOTA. — Las velocidades de corte indicadas son de aplicación para profundidades de corte de a ≤ 5 mm; para profundidades a ≥ 5 mm los valores indicados se reducirán en un 10 a 20%. Estas velocidades corresponden a operación de acabado, para otros se afectarán de los coeficientes siguientes:

Desbastado, 0,7;      Tronzado, 0,6  
 Taladrado, 0,3      Mandriando 0,6  
 Roscado 0,1 a 0,4

482

Figura 16. Tabla de valores de parámetros de corte de cuchillas para torneado de acero rápido.  
Fuente: (Larburu, 1989)

Se encuentra que, para las aleaciones de aluminio, la dureza se caracteriza en torno a 20-25 HB, sin embargo, la dureza de la aleación EN AW-2030 es de 115 HB. Esto hace que posiblemente las tablas de referencia no sean del todo útiles y haya que compararlo con valores que ofrezcan fabricantes de herramientas enterizas.

CONDICIONES DE TRABAJO		Avance (mm/rev.)	Velocidad Corte (m/mín.)
3.1 Fundición (<200 HB / <700 N/mm <sup>2</sup> )		0,1-1,2	140-100-50
3.2 Fundición (200-300 HB / 700-1000 N/mm <sup>2</sup> )		0,1-1,2	120-80-40
5.1 Cobre-Bronce-Latón viruta corta (<200 HB / <700 N/mm <sup>2</sup> )		0,1-1,2	400-300-200
5.2 Cobre-Bronce-Latón viruta larga (<200 HB / <700 N/mm <sup>2</sup> )		0,1-1,2	400-300-200
6.1 Al-Mg no aleado (<100 HB / <350 N/mm <sup>2</sup> )		0,1-1,2	400-300-200
6.2 Aleaciones Al-Mg Si < 10% (<180 HB / <600 N/mm <sup>2</sup> )		0,1-1,2	400-300-200
6.3 Aleaciones Al-Mg Si > 10% (<180 HB / <600 N/mm <sup>2</sup> )		0,1-1,2	200-150-80

Figura 17. Tabla de los valores recomendados por ISCAR para barras soldadas. Fuente: (ISCAR eCatalog, s.f.)

#### ❖ Posibilidades del torno

El torno que se utilizará para realizar los ensayos, como se ha comentado anteriormente es el Pinacho S-90/180. Los parámetros de corte en este torno se seleccionan con palancas, que dependiendo de la posición escogida darán una combinación diferente de velocidad de acorte y de avance.

Velocidad de avance (mm/rev):

	M			
	D	E	F	G
1	0,050	0,100	0,200	0,400
2	0,056	0,113	0,226	0,452
3	0,059	0,119	0,238	0,476
4	0,062	0,125	0,250	0,500
5	0,069	0,138	0,276	0,552
6	0,072	0,144	0,288	0,576
7	0,075	0,150	0,300	0,600
8	0,081	0,163	0,326	0,652
9	0,085	0,170	0,340	0,680
10	0,088	0,176	0,352	0,704
11	0,094	0,188	0,376	0,752

Tabla 18. Posibles valores de velocidades de avance del torno Pinacho S90/180.

Velocidad de corte (rpm):

		1	2	3
A	I	30	110	430
	II	60	220	860
B	I	46	180	700
	II	92	360	1400
C	I	70	265	1000
	II	140	530	2000

Tabla 19. Posibles valores de velocidades de corte del torno Pinacho S90/180.

Penetración: ajustable manualmente al valor que se desee.

❖ Discusión

Una vez conocidos los datos de las plaquitas DCMT 11T308-14 IC20, los datos de herramientas enterizas de acero y las posibilidades del torno, se evalúan para determinar cuál es el rango de valores para este ensayo preliminar.

Como la velocidad de corte es un parámetro que se mide en  $m/min$ , pero en el torno se selecciona en rpm, lo que se hace es una conversión de unidades mediante la siguiente equivalencia:

$$rpm = \frac{V_c(m/min) \cdot 1000}{\pi \cdot D(mm)}$$

Teniendo en cuenta que el diámetro de la probeta es de 40 mm, queda:

$$rpm = \frac{V_c(m/min) \cdot 1000}{\pi \cdot 40} = V_c(m/min) \cdot 7,958 (1/m)$$

$V_c(m/min)$	rpm
50	397.9
100	795.8
150	1193.7
200	1591.6
400	3183.2
600	4774.8

Tabla 20. Conversión de algunos valores de velocidad de corte de  $m/min$  a rpm.

Las máximas rpm que se pueden alcanzar con este torno son 2000, por lo que el rango de valores que ofrecen las plaquitas de corte comerciales se queda muy limitado.

Lo que interesa en este ensayo preliminar es evaluar el mayor número de condiciones de corte posibles con el menor número de probetas posibles. El empleo de cuatro probetas es para poder estudiar las plaquitas de corte comerciales, las de FA y el uso de aceite de corte. Esto lleva a optar por dividir en 4 tramos de mecanizado las 2 primeras probetas, para probar 4 condiciones de corte en cada una de ellas. Las dos siguientes se dividirán en el mismo número de partes o no, dependiendo del resultado obtenido en las dos primeras probetas.

A continuación, se muestra el rango de valores seleccionados para el ensayo preliminar:

$$V_c = 40 - 100 m/min$$

$$F_z = 0,1 mm/rev$$

$$A_p = 1 - 1,50 mm$$

Donde se puede apreciar que la velocidad de avance se ha decidido dejarla fija para poder evaluar en mayor detalle la influencia de los otros dos parámetros.

### 3.3.1.3. Condiciones del ensayo

Los ensayos con laquitas de corte comerciales se harán en seco, puesto que son plaquitas testeadas bajo dichas condiciones para diferentes aleaciones de aluminio dando unos resultados satisfactorios. En el caso de los ensayos con las plaquitas de corte realizadas mediante FA, se harán unos ensayos en seco y otros usando aceite de corte para lubricar y refrigerar el mecanizado. Esto es debido a que estas plaquitas no han sido probadas ni en seco ni con aceite de corte, por lo que es necesario comprobar su comportamiento en ambas condiciones.

El aceite de corte del que se hará uso para los ensayos lubricados es el que se encuentra en los dispensadores de aceite situados en los tornos del taller. El motivo de no preparar y rellenar todo el circuito de lubricación con la taladrina con la que se harían los posibles futuros ensayos es debido a que es simplemente un primer contacto con los aceites de corte con las plaquitas de FA. Siendo este acto una tarea que requiere de cierta preparación y tiempo. Cabe mencionar, que se es consciente de que cada lubricante proporciona unas condiciones de corte diferentes, pero para un ensayo preliminar en el que no se tiene detalle ni siquiera si la plaquita de FA aguantará las condiciones de corte a las que se les va a someter, se considera útil el uso del aceite de corte disponible para dispensar, y en el caso de que la evaluación del resultado resulte ser satisfactoria, se empleará una taladrina más respetuosa con el medio ambiente y de mayor facilidad para ser reutilizada y recogida.

### 3.3.1.4. Realización

#### ❖ Primera probeta

Material: EN AW-2030      D=40 mm

Plaquita: ISCAR DCMT 11T308-14 IC20      Código: 1CN

Fluido de corte: No

Parámetros de corte de partida:

	V1	V2	V3	V4
Velocidad de corte <i>m/min</i>	40	60	80	100
Velocidad de avance <i>mm/rev</i>	0,1	0,1	0,1	0,1
Penetración <i>mm</i>	1	1	1	1

Tabla 21. Parámetros de corte de partida para la primera probeta.

RPM:

	V1	V2	V3	V4
<i>rpm</i>	318,32	477,48	636,64	795,8

Tabla 22. Velocidad de corte en rpm de la primera probeta.

RPM torno:

	V1	V2	V3	V4
<i>rpm</i>	360	430	700	860
Código torno	B-II-2	A-I-3	B-I-3	A-II-3

Tabla 23. Palancas del torno Pinacho S-90/180 para la primera probeta.

Parámetros de corte finales:

	V1	V2	V3	V4
Velocidad de corte <i>m/min</i>	45,24	54,03	87,96	108,07
Velocidad de avance <i>mm/rev</i>	0,1	0,1	0,1	0,1
Penetración <i>mm</i>	1	1	1	1

Tabla 24. Parámetros de corte finales de la primera probeta.

Observaciones:

Ninguna anomalía durante el mecanizado.

Viruta:

V1: Viruta de tipo tubular / helicoidal cónica enmarañada.

V2: Viruta de tipo helicoidal enmarañada.

V3: Viruta de tipo arqueada conectada.

V4: Viruta de tipo arqueada conectada.



Ilustración 19. Primera probeta ensayada.

❖ Segunda probeta

Material: EN AW-2030      D=40 mm

Plaquita: FA      Código: 1SN

Fluido de corte: No

Parámetros de corte de partida:

	V1	V2	V3	V4
Velocidad de corte <i>m/min</i>	40	60	80	100
Velocidad de avance <i>mm/rev</i>	0,1	0,1	0,1	0,1
Penetración <i>mm</i>	1	1	1	1

Tabla 25. Parámetros de corte de partida para la segunda probeta.

RPM:

	V1	V2	V3	V4
<i>rpm</i>	318,32	477,48	636,64	795,8

Tabla 26. Velocidad de corte en rpm de la segunda probeta.

RPM torno:

	V1	V2	V3	V4
<i>rpm</i>	360	430	700	860
Código torno	B-II-2	A-I-3	B-I-3	A-II-3

Tabla 27. Palancas del torno Pinacho S-90/180 para la segunda probeta.

Parámetros finales:

	V1	V2	V3	V4
Velocidad de corte <i>m/min</i>	45,24	54,03	87,96	108,07
Velocidad de avance <i>mm/rev</i>	0,1	0,1	0,1	0,1
Penetración <i>mm</i>	1	1	1	1

Tabla 28. Parámetros de corte finales de la primera probeta.

Observaciones:

La probeta sufrió un desplazamiento en el eje Z del torno, esto es debido a ausencia de talón en la probeta. La aparición de este fenómeno en la probeta 2 y no en la 1, es señal de que las plaquitas de corte de FA ejercen una mayor fuerza de corte sobre la probeta, o lo que es lo mismo, se oponen en mayor medida al corte. Además, el incremento de la temperatura de la probeta 2 mecanizada respecto a la probeta 1 mecanizada fue considerable.

Gran aparición de filo recrecido en la herramienta.

Viruta:

V1: Viruta de tipo arqueada conectada.

V2: Viruta de tipo arqueada conectada.

V3: Viruta de tipo arqueada conectada.

V4: Viruta de tipo arqueada conectada.

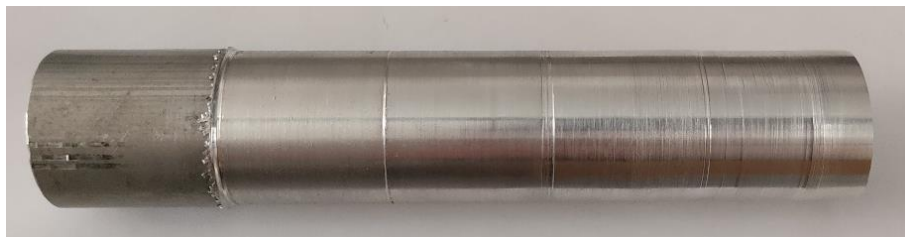


Ilustración 20. Segunda probeta ensayada.

❖ Tercera probeta

A la tercera probeta se le ha mecanizado un talón de 40 mm longitud y una disminución del diámetro de 3 milímetros. La zona sin mecanizar serán 20 mm, y la zona mecanizada será de 140 mm, divididos en dos tramos, cada uno con un valor diferente de velocidad de corte. El motivo de dividirla únicamente 2 tramos en lugar de 4 como las dos anteriores, es para ver el comportamiento de las plaquitas a lo largo de una longitud mayor.

Material: EN AW-2030      D=40 mm

Plaquita: FA      Código: 2SN

Fluido de corte: No

Parámetros de corte de partida:

	V1	V2
Velocidad de corte $m/min$	40	100
Velocidad de avance $mm/rev$	0,1	0,1
Penetración $mm$	1,5	1,5

Tabla 29. Parámetros de corte de partida para la tercera probeta.

RPM:

	V1	V2
$rpm$	318,32	795,8

Tabla 30. Velocidad de corte en rpm de la tercera probeta.

RPM torno:

	V1	V2
$rpm$	360	860
Código torno	B-II-2	A-II-3

Tabla 31. Palancas del torno Pinacho S-90/180 para la tercera probeta.

Parámetros finales:

	V1	V2
Velocidad de corte $m/min$	45,24	108,07
Velocidad de avance $mm/rev$	0,1	0,1
Penetración $mm$	1,5	1,5

Tabla 32. Parámetros de corte finales de la tercera probeta.

Observaciones:

La calidad superficial en el primer tramo de la probeta es bastante buena, aunque al final empieza a ser algo peor. El segundo tramo sí que es de una calidad notablemente peor.

Viruta:

V1: Viruta de tipo arqueada conectada.

V2: Viruta de tipo arqueada conectada.



Ilustración 21. Tercera probeta ensayada.

❖ Cuarta probeta

A la probeta 4 se le ha mecanizado un talón de 25 mm longitud y una disminución del diámetro de 3 mm. La zona sin mecanizar serán 15 mm, y la zona mecanizada será de 160 mm, divididos en dos tramos, cada uno con un valor diferente de velocidad de corte.

Material: EN AW 2030      D=40 mm

Plaquita: FA      Código 2SN

Fluido de corte: No

Parámetros de corte de partida:

	V1	V2
Velocidad de corte $m/min$	20	40
Velocidad de avance $mm/rev$	0,1	0,1
Penetración $mm$	1	1

Tabla 33. Parámetros de corte de partida para la cuarta probeta.

RPM:

	V1	V2
$rpm$	159,16	318,32

Tabla 34. Velocidad de corte en rpm de la cuarta probeta.

RPM torno:

	V1	V2
<i>rpm</i>	180	360
Código torno	B-I-2	B-II-2

Tabla 35. Palancas del torno Pinacho S-90/180 para la cuarta probeta.

Parámetros finales:

	V1	V2
Velocidad de corte <i>m/min</i>	22,62	45,24
Velocidad de avance <i>mm/rev</i>	0,1	0,1
Penetración <i>mm</i>	1	1

Tabla 36. Parámetros de corte finales de la cuarta probeta.

Observaciones:

Durante el mecanizado de la probeta 4 se le fue añadiendo aceite de corte, esto ha tenido un efecto sobre la calidad superficial de la probeta. A simple vista se observa que el acabado es superior que, en las dos probetas anteriores, y cercano a la primera probeta. La temperatura de la probeta al acabar el mecanizado también fue bastante alta.

Viruta:

V1: Viruta de tipo arqueada suelta. Debido al olvido en colocar el contrapunto a la hora de realizar el ensayo con estos valores, aparecieron vibraciones que distorsionaron el resultado, por lo que a la primera mitad del recorrido de la probeta con estos valores se le hizo una segunda pasada. Esto altera ligeramente el valor de la velocidad de corte, ya que la probeta de partida es de 38 mm de diámetro y no de 40mm.

V2: Viruta de tipo arqueada conectada. La calidad superficial ha disminuido al aumentar la velocidad. Mayor aparición de filo recrecido que en la plaquita del ensayo de la tercera probeta. Esto puede ser al descenso de la velocidad de corte o a la reducción del valor de la penetración.

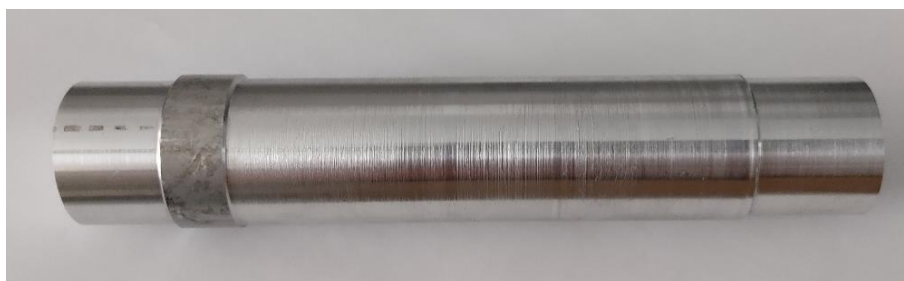


Ilustración 22. Cuarta probeta ensayada.



### 3.3.1.5. Conclusiones

Tras el primer ensayo, se van a hacer una serie de evaluaciones en base a unos criterios que se detallarán a continuación, para así determinar en qué rango de parámetros se van a centrar los futuros ensayos.

Este primer ensayo ha sido útil para poder ver el comportamiento de las plaquitas y el acabado superficial de las probetas según que parámetros se establecían, así como las condiciones del ensayo, en este caso, en seco o con la aplicación de aceite de corte.

De la primera probeta se concluye que con los valores establecidos en principio para las plaquitas de corte comerciales se obtuvo una buena calidad superficial en la probeta. No hubo ningún tipo de problema durante el ensayo, ni se detectó anomalía alguna.

De la segunda probeta se detecta que, configurando los mismos parámetros de corte que para la probeta anterior, pero cambiando la herramienta de corte comercial por una de FA la calidad superficial fue peor. El aumento de la temperatura de la probeta durante el ensayo puede ser índice de que la fuerza de corte que se produce con las plaquitas de corte de FA es superior a la que se produce con las comerciales, conllevando a una peor maquinabilidad.

De la tercera probeta se obtiene que, para las mismas velocidades de corte y avance que en dos primeros mecanizados, pero variando la penetración, se detecta que la calidad superficial de las probetas ensayadas fue aparentemente algo peor, pero que habría que analizar en mayor detalle.

Finalmente, en la cuarta, el cambio de condiciones de seco a lubricado tuvo una clara incidencia sobre la probeta y la viruta. La calidad superficial mejoró considerablemente, respecto a la viruta se llegó a tener para la velocidad más baja viruta de tipo arqueada suelta.

Analizando el ensayo y las conclusiones en detalle, se determina que las mejores calidades superficiales se han obtenido con los valores más bajos de velocidad de corte, y que el cambio de condiciones del ensayo tiene una repercusión sobre las plaquitas, sobre las probetas y sobre la viruta. Con todo ellos, se va a optar por el siguiente rango de parámetros de corte para el ensayo:

$$V_c = 40 - 60 \text{ m/min}$$

$$F_z = 0,1 - 0,15 \text{ mm/rev}$$

$$A_p = 1 \text{ mm}$$

### 3.3.2. Desarrollo del ensayo

#### 3.3.2.1. Definición

Una vez realizado el ensayo preliminar y obtenidas las conclusiones pertinentes que han permitido evaluar en primera instancia las herramientas de corte de FA, y acotar el rango de los valores de los parámetros de corte a utilizar en este ensayo, se puede pasar a desarrollar en profundidad el ensayo.

Al igual que en el ensayo preliminar, se mecanizarán probetas a partir de tochos de 200 milímetros de longitud y 40 milímetros de diámetro, aunque este aspecto se detallará en profundidad más adelante.

#### 3.3.2.2. Parámetros de corte

El rango de valores de los parámetros de corte que se van a emplear en los ensayos se ha obtenido gracias al ensayo preliminar, ahora queda detallar el número de ensayos que se van a realizar.

Se ha optado por dos valores de velocidades de corte, dos valores de velocidad de avance, y mantener fija la penetración. Para determinar el número de ensayos se realiza un cuadrante latino con las variables velocidad de corte, velocidad de avance y penetración.

	V1	V2
A1	V1A1P1	V2A1P1
A2	V1A2P1	V2A2P1

Tabla 37. Cuadrante latino para determinar el número de ensayos.

Siendo:

- $V1=40$  m/min,  $V2= 60$ m/min
- $A1= 0,1$  mm/rev,  $A2= 0,15$  mm/rev
- $P1= 1$  mm

Con este cuadrante se obtienen cuatro posibles ensayos. Para cada ensayo se harán dos repeticiones con plaquitas de FA en condiciones de seco, dos repeticiones con plaquitas de FA en condiciones de lubricación, y una repetición con plaquitas comerciales. Quedando un número total de ensayos de 20. El motivo de realizar dos repeticiones de los ensayos con plaquitas de FA es debido a que no se tiene constancia de un ensayo similar y es necesario evaluar la repetibilidad.

Como se ha mencionado durante el ensayo preliminar, debido a que en el torno Pinacho no es posible seleccionar la velocidad de corte en m/min, sino que se hace en rpm, es necesario realizar una conversión de unidades. Teniendo en cuenta que las probetas son de 40 mm se pasa de m/min a rpm. Por lo que las velocidades de corte establecidas como punto de partida sufrirán cambios para adaptarse a las posibilidades del torno.

Velocidad de corte en m/min de partida:

	V1	V2
<i>m/min</i>	40	60

Tabla 38. Velocidad de corte de partida en m/min.

RPM:

	V1	V2
<i>rpm</i>	318,32	477,48

Tabla 39. Velocidad de corte de partida en rpm.

RPM torno:

	V1	V2
<i>rpm</i>	360	430
Código torno	B-II-2	A-I-3

Tabla 40. Palancas de velocidad de corte en el torno Pinacho S-90/180.

Velocidad de corte final en m/min:

	V1	V2
Velocidad de corte <i>m/min</i>	45,24	54,03

Tabla 41. Velocidad de corte final.

Avance torno:

	A1	A2
(mm/rev)	0,1	0,15
Código torno	1-E	7-E

Tabla 42. Palancas de velocidad de avance en el torno Pinacho S-90/180.

### 3.3.2.3. Codificación

#### ❖ Codificación de las plaquitas de corte

Las plaquitas comerciales vienen suministradas en una caja de 10 unidades. Para poder distinguir cada plaquita dentro de la caja se enumeran según la posición que ocupan en esta. Para las plaquitas de FA se hará lo mismo, pero utilizando cajas de plaquitas comerciales que se disponen en el taller vacías. Una vez finalizados los mecanizados correspondientes a cada herramienta, estas se guardan en su posición dentro de la caja ya marcada. Cada caja se designa con una letra griega para poder diferenciarlas entre sí. Este aspecto es fundamental puesto que es necesario conocer con que plaquita se ha realizado cada ensayo para su posterior evaluación.

Como cada plaquita posee dos filos de corte, cada filo se utilizará para un ensayo, por lo que cada plaquita se puede emplear para dos ensayos. La distinción del filo dentro de cada plaquita se realiza de forma distinta para cada tipo de plaquita. Las plaquitas comerciales ya vienen marcadas con una muesca en uno de sus filos en forma de punto, por

lo que se hablará de filo con punto (CP) o sin punto (SP). Por otro lado, las plaquitas comerciales se han desarrollado sin muesca durante su fabricación y tampoco se les ha realizado una posteriormente, en estas lo que se ha decidido es grabarlas con el número en uno de sus filos, por lo que se hablará de plaquita con número (CN) o sin número (SN).

Para el presente Trabajo de Fin de Grado se ha utilizado una caja de plaquitas comerciales y dos de plaquitas de FA, debido a que el número de ensayos con las plaquitas de FA será mayor.



*Ilustración 23. Cajas de plaquitas de corte*

#### ❖ Codificación de los ensayos

Con el fin de facilitar la organización, el desarrollo y estudio de las probetas que se van a ensayar, junto con la gran cantidad de variables que diferencian un ensayo de otro, se decide por elaborar una codificación de los ensayos. Resulta de vital importancia para su estudio el poder manejar con facilidad toda la información y también hacerla accesible para cualquier tipo de futura consulta.

Para lograrlo, se ha optado por un sistema de codificación que distinga de forma clara e inequívoca cada ensayo junto a sus condiciones de realización. Es un código donde se detallan parámetros que en este estudio únicamente tienen un valor posible como el tipo de aleación o el diámetro de la probeta, pero que se deja desarrollado por si en un futuro se continuase la línea de investigación y se deciden emplear otros materiales u otros tipos de mecanizados. Pudiendo tener así una codificación bastante completa en la que si hubiera que ir variando datos relacionados por ejemplo con la zona de los parámetros de corte o la herramienta no habría que hacer muchos cambios. Dicho código es el siguiente:

**ALEACIÓN\_MECANIZADO\_DIÁMETRO\_LONG.MECANIZADA\_HERRAMIENTA\_CAJA\_  
PLAQUITAFILO\_VC\_VA\_P\_LUBRICACIÓN\_REPETICIÓN**

Donde cada parámetro está dividido del siguiente por un carácter de guion bajo (“\_”), y que representan lo siguiente:



- 1) Material de la probeta: aleación de aluminio EN AW-2030. En este estudio es la única aleación con la que se va a trabajar.
- 2) Tipo de ensayo: Torneado (TN), Fresado (F), Taladrado (TL), ... El torneado ha sido el mecanizado escogido, pero en caso de futuros ensayos para otros tipos de mecanizados se deja plasmada la nomenclatura seguir.
- 3) Diámetro de la probeta (mm): 40
- 4) Longitud mecanizada (mm): 160. Este aspecto hace referencia a la zona de la probeta mecanizada, sin tener en cuenta la longitud empleada sin mecanizar o del talón.
- 5) Tipo de plaquita: Comercial, FA. La caracterización del método de la fabricación de la plaquita de corte es fundamental para poder identificar rápidamente un tipo de ensayo u otro.
- 6) Letra de la caja de plaquitas:  $\alpha$ ,  $\beta$ , ... Sirve para identificar las cajas dentro de un mismo ensayo.
- 7) N.º de plaquita dentro de la caja: 1,2,3, ... Para identificar dentro de la caja la plaquita.
- 8) Filo de la plaquita: Con punto, Sin punto, Con número, Sin número. Se hacen dos distinciones puesto que las plaquitas comerciales y las FA han sido marcadas por dos métodos distintos.
- 9) Velocidad de corte (m/min): 45,24, 54,03
- 10) Velocidad de avance (mm/rev): 0,1, 0,15
- 11) Penetración (mm): 1
- 12) Tipo de mecanizado: Seco, Lubricado. Este parámetro del código identifica si se ha empleado un aceite de corte o no, no así el tipo, ya que complicaría demasiado el código.
- 13) N.º de repetición del ensayo: 1, 2, 3, ... Identifica ensayos con los mismos parámetros de corte de los que se han realizado alguna repetición por motivos de planificación o para subsanar errores en algún predecesor.

Ejemplo de codificación de un ensayo:

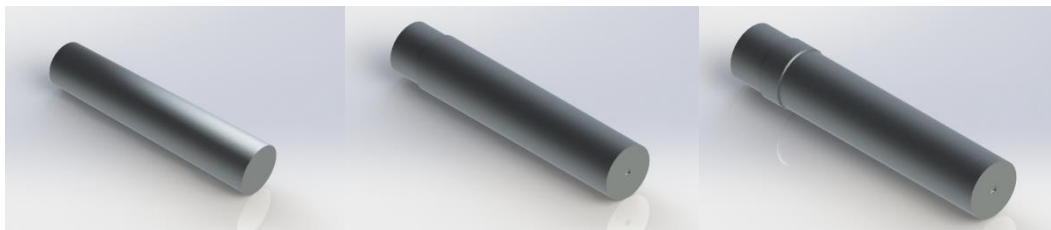
**ENAW2030\_TN\_D40\_L160\_HCM\_C $\alpha$ \_P2CP\_VC45,24\_VA0,1\_P1\_MS\_R1**

Ensayo realizado con una probeta de aleación EN AW-2030 para tornear de diámetro 40 mm y 160 mm de longitud. Empleando para este una plaquita comercial almacenada en la caja en la posición 2 y utilizando el filo marcado con un punto. Los

parámetros de corte son:  $V_c = 45,24$  m/min,  $F_z = 0,1$  mm/rev y  $A_p = 1$  mm. Mecanizado en seco. Primera repetición del ensayo.

#### 3.3.2.4. Preparación de las probetas

La aleación de aluminio EN AW-2030 para realización de los ensayos del presente proyecto es suministrada por el fabricante en barras de 3 metros de longitud y 40 milímetros de diámetro. Para pasar de las barras suministradas a las probetas con las que se harán los ensayos hay que realizar una serie de mecanizados.



*Ilustración 24. De izquierda a derecha, representación del tocho de barra, probeta preparada para ensayar y probeta ensayada.*

Partiendo de que las barras se suministran de 3000 milímetros de longitud, de cada barra se pueden obtener 15 tochos de 200 milímetros. De estos tochos se obtienen las probetas en las que se diferencian tres partes: al inicio 25 milímetros de talón para sujetar las probetas en el plato de garras del torno; posteriormente 15 milímetros de zona sin mecanizar, la cual sirve para establecer una zona de margen de seguridad entre la plaquita y el plato, evitando así que podamos causar daños en el torno o en la plaquita; y finalmente 160 milímetros de zona de mecanizado.

#### ❖ Corte de los tochos de barra para las probetas

La primera operación es el corte de las barras en tochos, en este caso de 200 mm de longitud. Para ello se realizó una prueba de corte con la sierra de cinta de la marca Belflex modelo BF-350 DSA-TF para comprobar su puesta a punto, con ello se detectó que era necesario cambiar la cinta debido a que realizaba cortes oblicuos.



*Ilustración 25. Sierras de cinta disponibles en el taller.*

Mientras se solventaba este inconveniente se hizo uso de otra sierra de cinta disponible en el taller, un modelo mucho más antiguo y lento, pero igual de eficaz. De cada barra de 3 metros se obtienen 15 tochos. Una vez se tienen cortados, se pasan por la esmeriladora para quitar las rebabas de los extremos, tal y como se muestra en la siguiente ilustración.



*Ilustración 26. Eliminación de las rebabas en los extremos de los tochos.*

#### ❖ Mecanizado de los talones

El motivo del mecanizado del talón en las probetas es para mejorar el agarre en el plato y por ende evitar desplazamientos que puedan desvirtuar los resultados de los ensayos. Estos se hacen con el mismo torno con el que se harán los ensayos y con las plaquitas comerciales DCMT 11T308-14 IC20 de ISCAR.



*Ilustración 27. Mecanizado del talón a una probeta.*

#### ❖ Elaboración de los contrapuntos

Los contrapuntos también son llevados a cabo con el torno Pinacho. Sirven para poder insertar el contrapunto giratorio que servirá durante el ensayo para evitar vibraciones debidas a la flexión de la probeta provocada por las fuerzas de corte.



*Ilustración 28. Realización de un contrapunto.*

Con esta última operación, ya se puede decir que las probetas están listas para ser ensayadas. A continuación, se muestra la ilustración de un tocho de barra recién cortado y una probeta con las operaciones pertinentes para ser ensayada.



*Ilustración 29. A la izquierda se muestra un tocho de barra y a la derecha una probeta lista para ensayar.*

#### 3.3.2.5. Realización del ensayo

Las dimensiones por la que pasarán las probetas con la que se han realizado los ensayos tras los pertinentes mecanizados se muestran en la Figura 18. Se representa el tocho de barra, la probeta tras los mecanizados preparatorios y la probeta ensayada. Los tres croquis con sus correspondientes cotas.

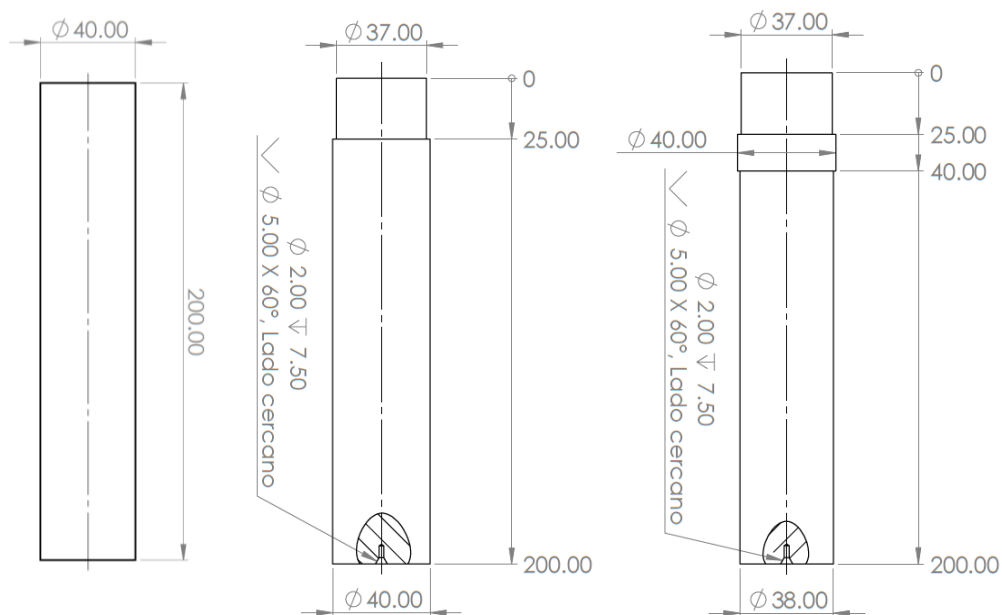


Figura 18. Representación gráfica de las dimensiones en la probeta a lo largo de la evolución del ensayo.

Para llevar a cabo los mecanizados de las probetas se ha utilizado un único torno horizontal, que ha sido el Pinacho S-90/180 como bien se ha comentado anteriormente. Lo primero que ha realizado antes de cada ensayo ha sido preparar el torno para la toma de datos de cada mecanizado, es decir, limpiar bien el depósito donde se recoge la viruta y la zona de la torre portaherramientas del torno, y colocar la cámara térmica en su posición para grabar el ensayo. Posteriormente se han configurado las palancas del torno en el código correspondiente para conseguir los parámetros de corte seleccionados para dicho ensayo. Tras ello, se ha colocado la probeta en el plato de garras y se ha ajustado el contrapunto giratorio. Finalmente se ha buscado con la plaquita el cero de la probeta en los ejes X y Z.

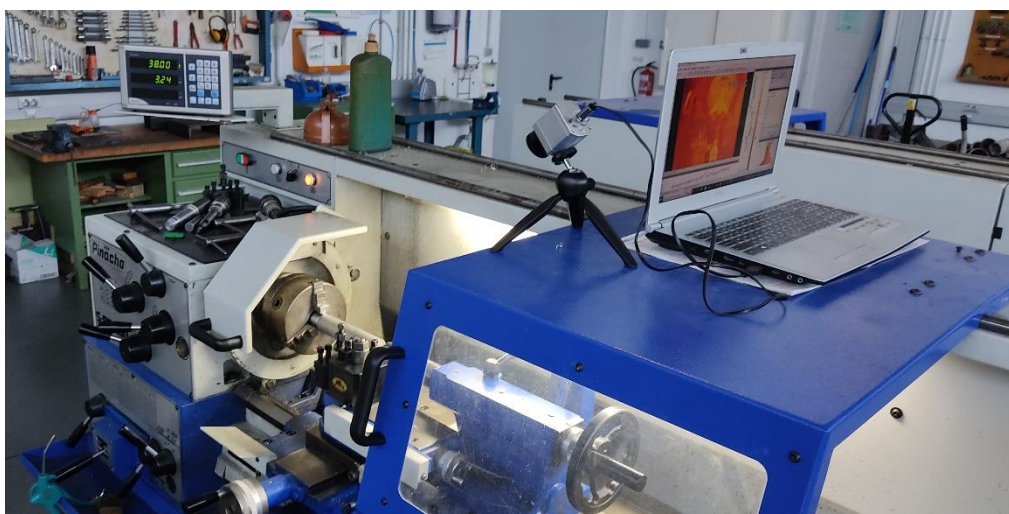
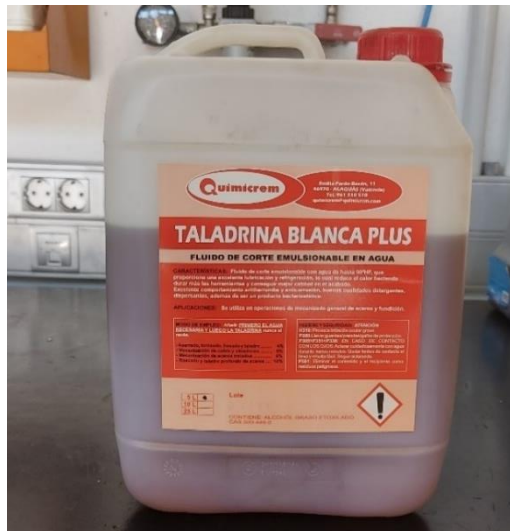


Ilustración 30. Torno Pinacho S-90/180 durante la realización del ensayo.

Para los ensayos lubricados ha sido necesario rellenar el tanque de la bomba del sistema de lubricación del torno, en este caso de taladrina blanca plus de la marca Quimicrem. Esta taladrina se suministra de forma concentrada y dependiendo de la operación a la que vaya a ser destinada se disuelve en una cantidad concreta de agua. En concreto para torneado viene indicado que se diluya en agua en un 4% de concentración. Como se necesitaban alrededor a 8 litros de lubricante para rellenar el depósito, se emplearon 8 litros de agua y 320 mililitros de taladrina blanca plus.



*Ilustración 31. Taladrina usada en los ensayos.*

También ha sido necesario ajustar la posición de la boquilla que se encuentra al final del tubo por donde se expulsa la taladrina. Gracias a la forma del tubo, este se puede posicionar con gran facilidad y además mantener su posición durante todo el ensayo.



*Ilustración 32. Sistema de lubricación torno Pinacho S-90/180.*

Para los ensayos lubricados es necesario activar manualmente la bomba mediante el pulsado de un botón antes de empezar el ensayo, y al finalizar el ensayo apagarlo

pulsándolo de nuevo. La boquilla se traslada con el carro portaherramientas, por lo que siempre estará lubricando en la misma posición relativa respecto al filo de la cuchilla en el sentido longitudinal y avanzando a la velocidad de avance que se haya seleccionado.

### 3.3.2.6. Toma de datos

La toma de datos se divide en dos fases, una durante el ensayo y otra posterior. Durante el ensayo se tomarán muestras de la viruta producida durante los mecanizados, para posteriormente estudiarla en detalle y también se registrará la temperatura alcanzada a lo largo de todo el ensayo con una cámara térmica. Tras la finalización de todos los ensayos se evaluará la calidad superficial de las probetas, y de forma menos exhaustiva se observarán en el microscopio algunas plaquitas de corte y algunas virutas.

#### ❖ Datos tomados durante el ensayo:

##### ➤ Temperatura

Para el registro de la temperatura se ha contado con la cámara infrarroja Optris PI 640i. Se trata de la cámara termográfica VGA más pequeña del mundo con un tamaño de 46x56x90 milímetros y un peso de 320 gramos. Es capaz capturar imágenes térmicas y de grabar en tiempo real con gran nitidez y una resolución de 640x480 píxeles. Mide con precisión en el rango de temperaturas desde -20°C hasta 900°C. Además, se le pueden incluir diversos accesorios como lentes (Optris, s.f.).



*Ilustración 33. Posición de la cámara térmica en el torno.*

La cámara es conectada a un ordenador, en este caso un pc portátil, para la grabación de todos los ensayos. La configuración de la cámara y el posterior tratamiento de datos se realiza con el programa Pix-Connect. Dentro del *software* encontramos la siguiente de pantalla principal.

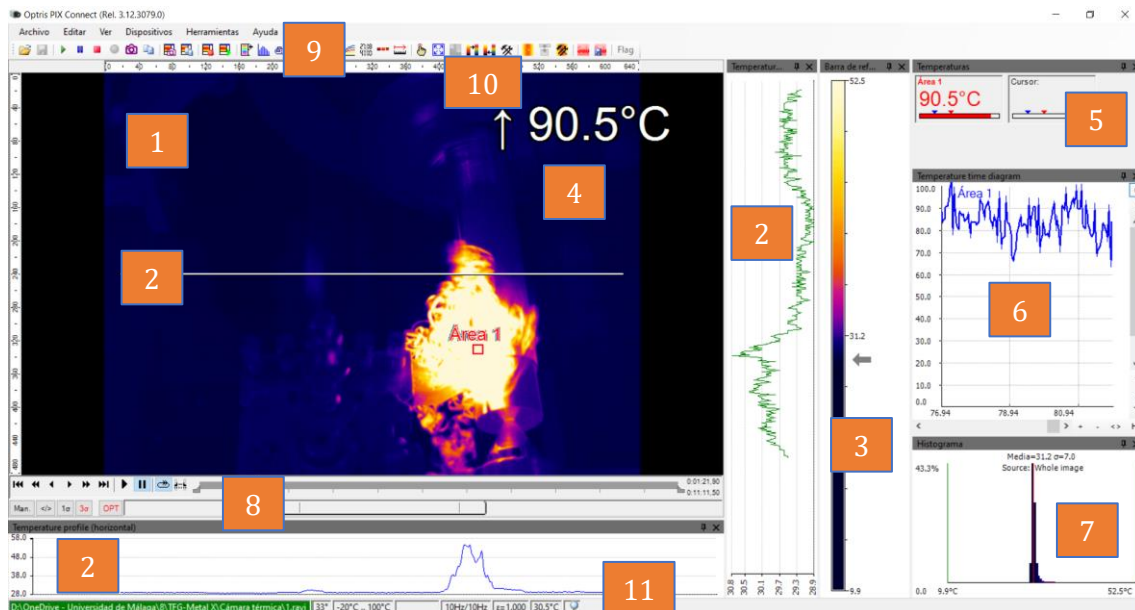


Figura 19. Pantalla principal del programa Pix-Connect.

Siendo:

- 1) Imagen de la cámara.
- 2) Perfil de temperatura: muestra las temperaturas a lo largo de máximo 2 líneas en cualquier tamaño y posición en la imagen.
- 3) Barra de referencia: muestra la escala de temperatura dentro de la paleta de colores.
- 4) Temperatura del área de medida: analiza la temperatura según la forma seleccionada.
- 5) Pantallas de control: muestra todos los valores de temperatura en las áreas de medición definidas, como puntos fríos, puntos calientes, temperatura en el cursor, temperatura interna y temperatura del chip.
- 6) Diagrama de tiempo temperatura: muestra las curvas de temperatura a lo largo del tiempo para la región de interés seleccionable.
- 7) Histograma: muestra la distribución estadística de calores de temperatura individuales.
- 8) Escala de la paleta.
- 9) Menú y barra de herramientas.
- 10) Icono que permite cambiar entre paletas de colores.
- 11) Barra de estado.

Para una correcta evaluación de los vídeos tomados durante los mecanizados es necesario realizar una serie de configuraciones antes de la grabación y también posteriormente, para un correcto tratamiento de los datos.

Antes de realizar las grabaciones se ha seleccionado entre las opciones posibles el rango de temperatura 0°C-250°C. Este rango ha sido posible ser estimado gracias al ensayo preliminar y es el rango de valores en el que es capaz de tomar datos la cámara. Este

parámetro junto con el enfoque manual de la cámara son los únicos que se tienen que ajustar antes de realizar las grabaciones, ya que posteriormente no pueden ser modificados.

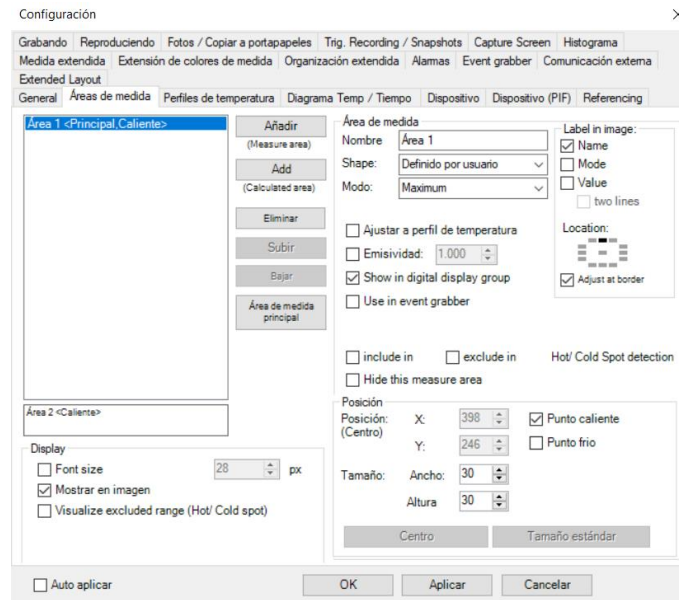


Figura 20. Configuración del programa Pix-Connect.

Para poder realizar el tratamiento de datos de las grabaciones realizadas es necesario realizar previamente unas configuraciones. Debido a que se trabaja con aluminio hay que modificar el valor de la emisividad, que para el aluminio el valor recomendado es de 0,8. También hay que ajustar los parámetros relacionados con el diagrama temperatura-tiempo. Finalmente se definen las áreas de medida que se van a emplear para la toma de datos.

En este caso se han empleado dos áreas de medida:

- Área Corte: es un área fija en la pantalla que se ajusta manualmente y delimita la zona donde se produce el contacto herramienta-probeta.
- Área Caliente: esta área es móvil y está constantemente buscando el punto caliente de la imagen.

El motivo de configurar dos áreas de medida es debido a que es interesante analizar la temperatura de corte, pero a su vez ver si el punto caliente se sitúa en esta zona o se pasa a otro lugar como la viruta.

La pantalla principal del programa queda de la siguiente manera tras las modificaciones.

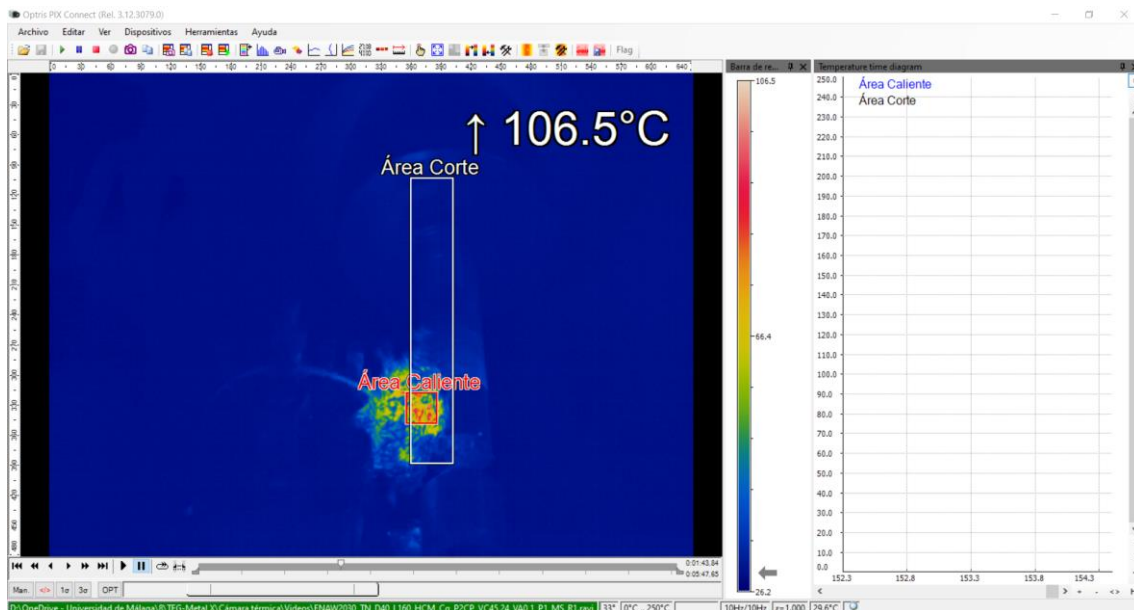


Figura 21. Pantalla principal del programa Pix-Connect con las configuraciones realizadas para la toma de datos.

Una vez finalizado el vídeo del ensayo se exporta el diagrama temperatura-tiempo a Excel. Este diagrama es el que servirá para realizar el análisis térmico de los ensayos. Muestra la evolución de la temperatura a lo largo de la probeta en función del tiempo de mecanizado.

#### ➤ Recogida de viruta

Para recoger viruta de cada ensayo lo que se hará tomar muestras tras la finalización del mecanizado. Para evitar la contaminación de virutas de un ensayo a otro lo que se hará es limpiar el torno y vaciar el depósito de la viruta tras cada mecanizado. La clasificación del tipo de viruta de cada ensayo se realizará de acuerdo con la norma ISO 3685:1993 Tool-life testing with single-point turning tools.

#### ❖ Datos tomados en el taller de metrología:

##### ➤ Calidad superficial

El análisis del acabado superficial resulta de gran importancia, ya que gracias a él se pueden comparar los resultados obtenidos de calidad superficial en las piezas mecanizadas con las plaquitas comerciales respecto a las obradas con tecnología de fabricación aditiva. Así como conclusiones acerca de la influencia de los parámetros de corte y el uso de la taladrina.

Para desarrollar este análisis se han llevado a cabo una serie de mediciones sobre todas las probetas. Para realizar las mediciones se ha adaptado un puesto de trabajo en la primera planta de la nave-taller del área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación con los elementos indicados en la Figura 22.



Figura 22. Puesto de medición de rugosidades. De izquierda a derecha: Ordenador portátil, Rugosímetro portátil, Soporte con husillo, Calzo en V, Ordenador de sobremesa.

Siendo:

- 1) Ordenador portátil
- 2) Rugosímetro portátil Mitutoyo
- 3) Soporte con husillo
- 4) Calzo en V
- 5) Ordenador de sobremesa

Con el ordenador de sobremesa se gestiona el software del rugosímetro, el soporte con husillo ayuda a situar el palpador sobre la probeta correctamente, el calzo en V a colocar la probeta en una posición cómoda para medir y el ordenador portátil sirve de apoyo para ir almacenando la toma de datos.

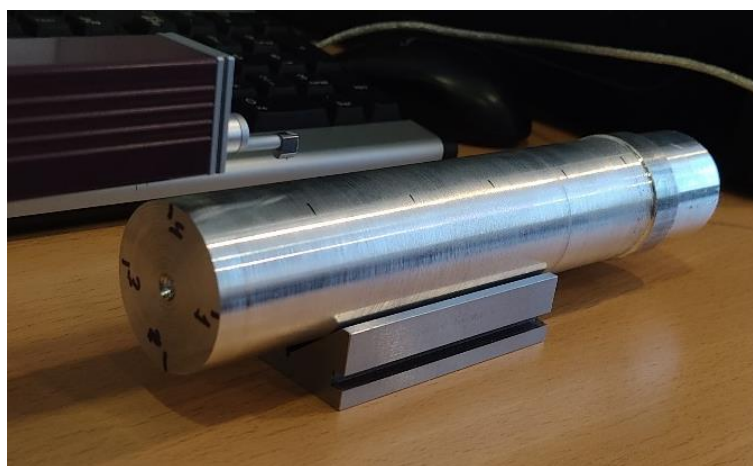


Ilustración 34. Probeta situada en el calzo en V.

Se ha optado por dividir cada una de las probetas en cinco tramos longitudinales y en 4 generatrices. El inicio del primer tramo de medida comienza a los 30 milímetros de la zona donde contactó por primera vez la plaquita de corte en la probeta, y cada tramo

siguiente cada 30 milímetros respecto al anterior. Las generatrices por su parte son cada 90°.

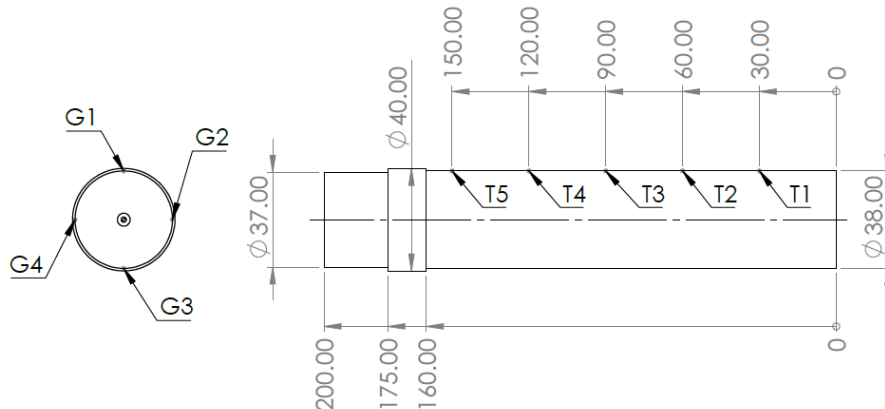


Figura 23. Representación de las zonas de medida de rugosidad sobre la probeta.

Para la medición de la rugosidad se emplearán los parámetros Ra (Rugosidad Media Aritmética) y Rz (Rugosidad Máxima). El rugosímetro empleado para la obtención de dichos valores ha sido el modelo SJ-210 de la marca Mitutoyo.

La selección de parámetros como longitud básica de muestreo de rugosidad se hace acorde a la norma ISO 4288:1996 Especificación geométrica de productor (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial. Esta norma recoge una serie de tablas que relacionan los parámetros involucrados en la medición de la calidad superficial, dependiendo de la rugosidad obtenida habrá que aumentar o disminuir el valor de la longitud de elevación de rugosidad, por ejemplo.

Ra $\mu\text{m}$	Rz $\mu\text{m}$	Longitud básica de muestreo de rugosidad $l_r$ mm	Longitud de evaluación de rugosidad $l_n$ mm	$r_{\text{punta}}$ $\mu\text{m}$
$0,006 < Ra \leq 0,02$	$0,025 < Rz \leq 0,1$	0,08	0,4	2
$0,02 < Ra \leq 0,1$	$0,1 < Rz \leq 0,5$	0,25	1,25	2
$0,1 < Ra \leq 2$	$0,5 < Rz \leq 10$	0,8	4	2
$2 < Ra \leq 10$	$10 < Rz \leq 50$	2,5	12,5	5
$10 < Ra \leq 80$	$50 < Rz \leq 200$	8	40	10

Tabla 43. Longitudes básicas de muestreo de rugosidad para la medición de Ra, Rz y  $r_{\text{punta}}$ . Fuente: (ISO 4288:1996 Especificación geométrica de productor (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial, 1996). Edición: Propia.

El radio de punta del palpador del mencionado rugosímetro es de 2  $\mu\text{m}$ , por lo que solo podremos configurarlo para longitudes básicas de muestreo de hasta 0,8. No se dispone de un palpador de mayor radio de punta. Debido a esta limitación, en caso de obtener valores de Ra superiores a 2 o de Rz superiores a 10 no será efectivo aumentar el valor de

longitud básica de muestreo ya que el palpador no es capaz de realizar mediciones rigurosas para valores superiores de los indicados.

El rugosímetro se puede controlar con la botonera que trae incluida o conectándolo a un ordenador. En este caso se ha optado por conectarlo a un ordenador vía USB y manejarlo con el programa SurfTest SJ USB Communication Tool Ver5.006.

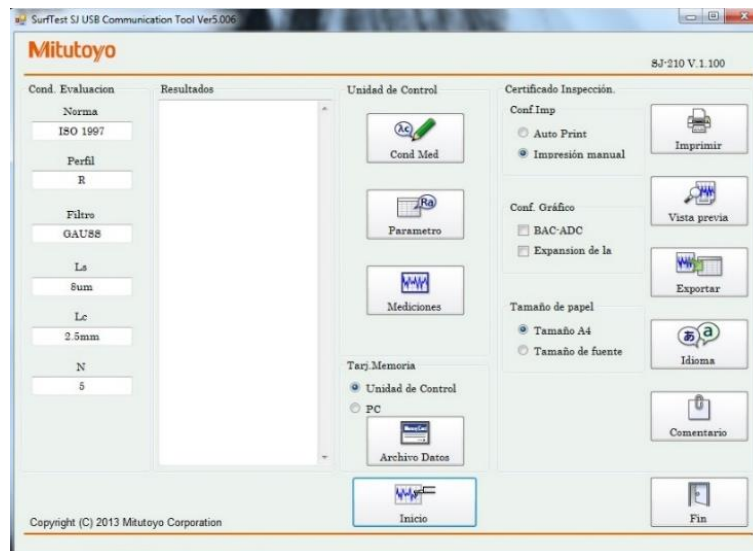


Figura 24. Pantalla principal del programa SurfTest SJ USB Communication Tool Ver5.006.

Dentro de la pantalla de condiciones de medida se pueden configurar diversos parámetros como la norma a emplear en la medición, el filtro o la longitud de muestra entre otros.

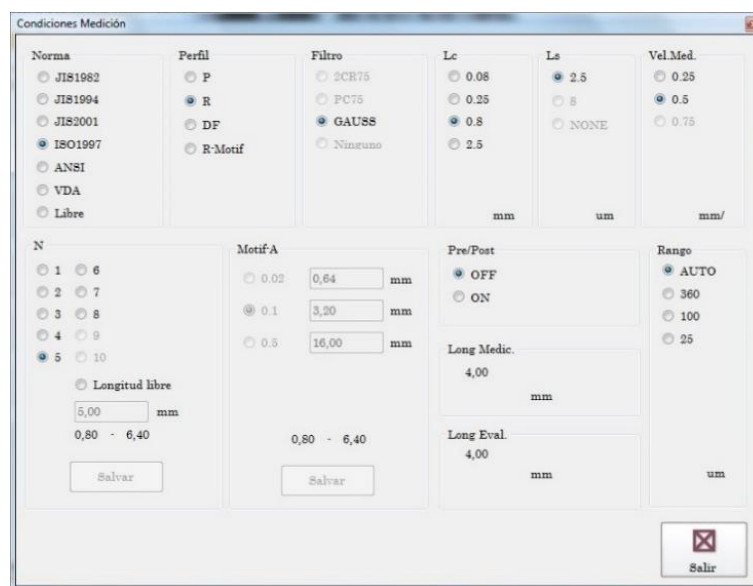


Figura 25. Condiciones de medida en el programa SurfTest SJ USB Communication Tool Ver5.006.

Una vez realizadas las tareas de preparación de la zona de medición y configurado el rugosímetro se pasa a medir la rugosidad de las probetas. Realizando una medición por cada combinación de tramo y generatriz.

Este *software* también es capaz de generar perfiles de rugosidad. A continuación, se muestra el ejemplo de un perfil de rugosidad tomado durante una medición en una de las probetas. Debido a que la obtención de estos perfiles de cada una de las medidas requiere de mucho tiempo, tan solo se sacarán algunos a modo de ejemplo.

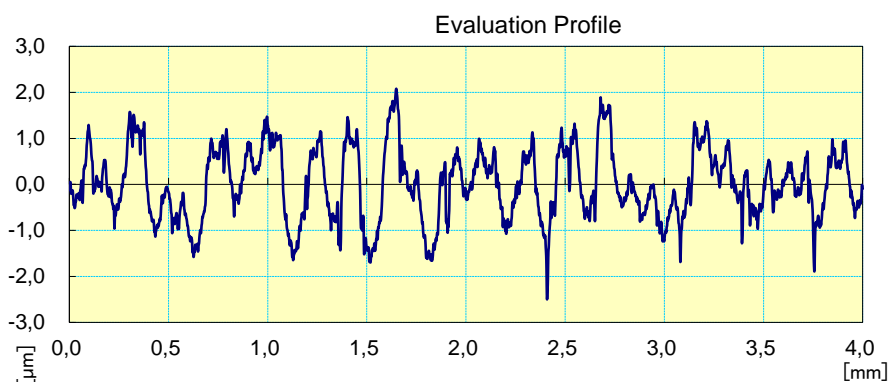


Figura 26. Perfil de perfil rugosidad de una medida generado por el programa SurfTest.

### ➤ Microscopio

El uso del microscopio ha sido para analizar dos aspectos totalmente diferentes. El primero ha sido para observar las plaquitas de corte fabricadas con el sistema Metal X, y por otro lado la viruta de tres ensayos para poder observar los efectos del mecanizado sobre esta. De ninguno de los dos aspectos se va a realizar un gran análisis puesto que no formaban parte de la metodología que se planteó para el presente Trabajo Fin de Grado, pero si es interesante estudiarlo para ver si pueden ser de ayuda a la hora de extraer conclusiones.

De la plaquita lo que se quiere ver es como de satisfactoria es su geometría a nivel microgeométrico respecto a las plaquitas comerciales DCMT 11T308-14 IC20 de ISCAR, elaboradas con pulvimetalurgia y rectificadas en una operación posterior.

El hecho de querer analizar la viruta se debe a que durante la realización de los mecanizados se observó que la viruta resultante de los ensayos en los que se empleaba taladrina era más frágil que la viruta de los ensayos en seco.

#### 3.3.2.7. Hojas de datos

Para la recogida organizada de todos los datos mencionados anteriormente se ha diseñado una hoja de datos. Estas hojas de datos, con todas las mediciones recogidas en cada uno de los ensayos, se incluyen en el Anexo C del presente proyecto.



El principal objetivo de estas hojas es la recopilación organizada de todos los datos de cada uno de los ensayos, pero además sirven para dar comienzo al análisis y discusión de los resultados obtenidos. La información recogida en estas hojas es la siguiente:

- Material de la probeta
- Tipología de la herramienta
- Codificación de la herramienta empleada
- Código del ensayo
- Parámetros de corte
- Fluido de corte
- Infografía de la probeta, herramienta de corte y viruta generada
- Calidad superficial reflejada en parámetros de rugosidad
- Análisis térmico mediante la evolución de la temperatura a lo largo del ensayo

A continuación, se muestra la hoja de datos diseñada.



### HOJA DE DATOS

Material de la pieza de trabajo	
---------------------------------	--

Herramienta		Ubicación		
		Caja	Número	Filo

Ensayo	
--------	--

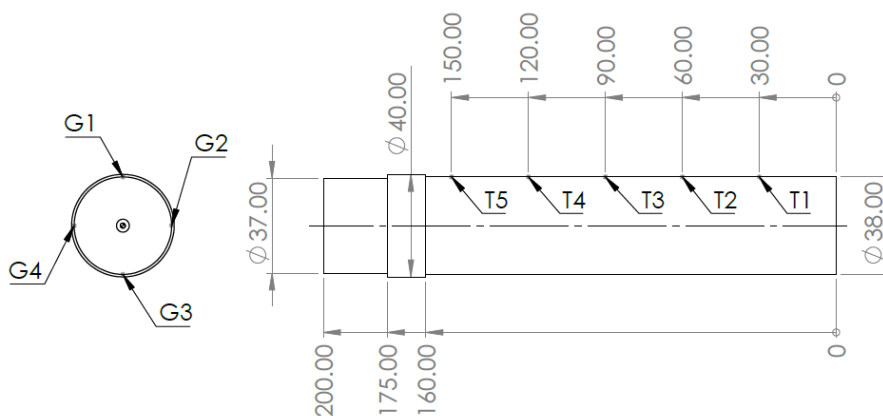
Parámetros de corte	$v_c$ (m/min)	
	$v_a$ (mm/rev)	
	$p$ (mm)	

Fluido de corte	
-----------------	--

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1				
G2				
G3				
G4				

	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1				
G2				
G3				
G4				

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1		
G2		
G3		
G4		

Observaciones	
---------------	--



Análisis térmico

Perfil de  
temperatura

Observaciones



### 3.3.2.8. Subsanación de errores producidos durante la realización del ensayo

Una vez realizados todos los ensayos se pasó a comprobar que la recogida de todos los datos había sido satisfactoria. Se detectó que dos archivos obtenidos de la grabación de la cámara térmica estaban dañados, por lo que se decidió repetir estos dos ensayos. A estos dos hay que añadir uno que por un error humano no se puso en funcionamiento la bomba de la taladrina. Aunque en un principio solo había planteadas dos repeticiones de cada mecanizado con plaquitas de FA, en algún caso han sido tres. El objetivo es tener para todos los diferentes análisis de resultados al menos dos repeticiones de cada ensayo con plaquitas FA.

Se ha optado por mantener el ensayo al que reemplazan y no eliminarlo puesto que pueden ser de ayuda a la hora de obtener conclusiones en el análisis de las herramientas, de la viruta y de la calidad superficial, no así en el análisis térmico donde se ha producido la pérdida de datos que se pretende subsanar.

Como consecuencia de la subsanación de errores, en lugar de ensayar 20 probetas como estaba previsto se han ensayado 23.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## 4. RESULTADOS

---

En este apartado se desarrollan y discuten los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología experimental desarrollada en el capítulo 3 para llevar a cabo los ensayos, en los que se muestra la influencia de los parámetros de corte sobre las herramientas, probetas y tipología de virutas. Además, se ve reflejado el comportamiento de las plaquitas de corte de fabricación aditiva respecto a las plaquitas de corte comerciales.

Durante este capítulo se harán uso de las siguientes abreviaturas usadas en las tablas y las gráficas:

- CM: plaquita de corte comercial.
- FA: plaquita de corte de fabricación aditiva.
- FAS: plaquita de corte de fabricación aditiva ensayada en seco.
- FAL: plaquita de corte de fabricación aditiva ensayada con lubricación.

El dígito después de cada código indica el número de repetición del ensayo o el número de la muestra, dependiendo el caso.

Como bien se ha comentado en el punto final del capítulo 3, la subsanación de errores durante la toma de datos ha generado la necesidad de incluir en ciertos casos tres repeticiones por ensayo de plaquitas de FA en lugar de las dos que estaban previstas. El único punto que no se verá afectado será el del análisis térmico, puesto que es ahí donde se ha producido la pérdida de datos.

### 4.1. Análisis de la herramienta

Tras la impresión de las plaquitas de las plaquitas de corte de FA y previo a emplearlas en los mecanizados se han tomado imágenes por microscopía óptica estereoscópica (SOM), con el objetivo de analizar la geometría y valorar la calidad de las plaquitas respecto a las de fabricación tradicional.

A continuación, se presenta una tabla resumen con las fotografías tomadas, las cuales muestran la cara de incidencia de las plaquitas. Se ha tomado como muestra una plaquita comercial y dos plaquitas de fabricación aditiva.

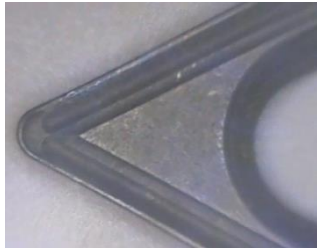
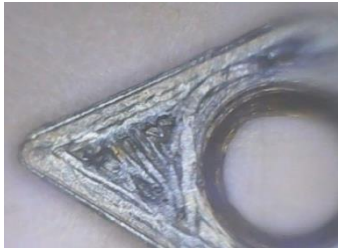




Micrografía de las herramientas			
	CM	FA1	FA2
40X			
60X			

Tabla 44. Micrografía de las herramientas de corte previo a ser empleadas en los ensayos.

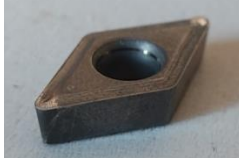
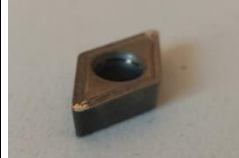
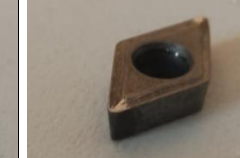






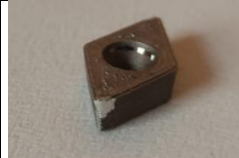
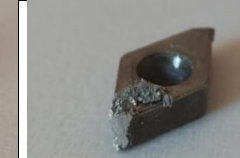


De las fotografías a 40X se puede extraer que el acabado superficial de las plaquitas de fabricación aditiva en comparación con las comerciales es peor. En las de FA se puede apreciar la ruta que ha seguido el cabezal de la impresora a la hora de realizar la deposición del material. Además, no presentan el detalle del rompevirutas como bien se identificó en la simulación de la impresión y una vez sinterizadas.

Por otro lado, de las fotografías a 60X se identifica un defecto de fabricación en las plaquitas de FA que podría afectar a diversos factores, como pueden ser el mecanizado, la calidad superficial de la pieza de trabajo o la vida útil de la herramienta. Este defecto es la irregularidad en el borde de las plaquitas, donde se aprecia que hay zonas que presentan un trazado curvo, motivado por la falta o exceso de deposición de material. Esto ha sido producido en los procesos por los que pasa la pieza para ser fabricada con el sistema Metal X. Puede ser que la deposición de las capas no tenga la precisión necesaria en el plano XY o que la continuidad del hilo durante la deposición no sea lo suficientemente constante. También puede ser que en las fases de lavado y sinterizado a la hora de eliminar el aglutinante no se pierda material de forma homogénea. Además, durante el sinterizado la pieza se contrae y puede que no se haya contraído de forma correcta.

De esto se concluye que la impresora puede no tener la precisión dimensional requerida para realizar tanto el rompevirutas como para las capas del borde de la herramienta. Si se quieren subsanar estos dos aspectos sería necesario replantear la forma de elaborar las plaquitas de FA con el sistema Metal X o pensar en operaciones de postprocesado como puede ser un rectificado de las plaquitas, operación que se realiza en la fabricación de las plaquitas de corte llevadas a cabo mediante pulvimetalurgia.

Además de las fotografías tomadas con el microscopio también se han realizado fotografías sin ampliación de las herramientas de corte tras los mecanizados. De estas se quiere extraer información acerca del estado de la punta, de la cara de desprendimiento y de la cara de incidencia.

A continuación, se muestra una tabla organizada en función de los parámetros de corte, códigos de almacenamiento de las herramientas y abreviaturas empleadas para definir los ensayos.

$A_p = 1 \text{ mm}$								
$V_c = 45,24 \text{ m/min}$		$V_c = 54,03 \text{ m/min}$		$V_c = 45,24 \text{ m/min}$		$V_c = 54,03 \text{ m/min}$		
$F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$		$F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$		$F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$		$F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$		
CM	$\alpha\text{-2CP}$	$\alpha\text{-2SP}$	$\alpha\text{-3CP}$	$\alpha\text{-3SP}$				
	Pequeño desgaste en la cara de incidencia	Pequeña aparición de filo recrecido	Pequeña aparición de filo recrecido	Sin daños				
	$\beta\text{-3CN}$	$\beta\text{-5CN}$	$\beta\text{-7CN}$	$\beta\text{-1BCN}$				
FAS1	Gran aparición de filo recrecido	Gran aparición de filo recrecido	Deformación plástica de la punta	Deformación plástica de la punta				
FAS2	$\beta\text{-3SN}$	$\beta\text{-5SN}$	$\beta\text{-7SN}$	$\beta\text{-1BSN}$				
	Gran aparición de filo recrecido	Aparición de filo recrecido	Gran aparición de filo recrecido	Gran aparición de filo recrecido				
	FAS3				$\gamma\text{-4BCN}$			
				Gran aparición de filo recrecido				

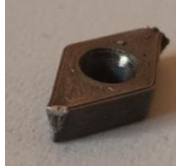
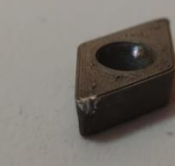
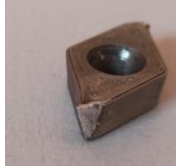



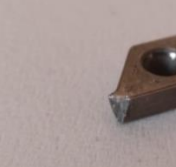
FAL1	$\beta$ -4CN	$\beta$ -6CN	$\beta$ -8CN	$\beta$ -2BCN
				
	Filo recreado + Deformación de la punta	Aparición de filo recreado	Error en el ensayo	Deformación plástica de la punta
FAL2	B-4SN	$\beta$ -6SN	$\beta$ -8SN	$\beta$ -2BSN
				
	Filo recreado + Falla por deformación plástica	Gran aparición de filo recreado	Falla por deformación plástica	Filo recreado + Deformación de la punta
FAL3	$\gamma$ -3BCN		$\gamma$ -3BSN	
				
	Gran deformación plástica		Gran deformación plástica	

Tabla 45. Herramientas de corte empleadas en los ensayos.

Como se puede observar el estado final de las herramientas comerciales y las de FA es totalmente distinto. Además, como era de esperar las plaquitas de FA presentan diferente resultado si se han ensayado en seco o con la aplicación de taladrina.

Las plaquitas de corte comerciales presentan un buen estado, salvo pequeñas apariciones de filo recreado, conocido como (BUE), y de material en la cara de desprendimiento, conocido como (BUL). Pero estos mecanismos en una fase muy inicial, puesto que ha supuesto ser una longitud de mecanizado muy corta para las plaquitas de corte comerciales como para ser dañadas.

La comparativa entre las herramientas de FA empleadas bajo los mismos parámetros de corte dejan ver una apariencia final similar, es decir, existe cierta repetibilidad en el estado final de las plaquitas.













Examinando el desgaste entre un tipo de plaquitas y otras se observa que las de FA presentan desgaste y adhesión de material en el filo y la cara de incidencia, respecto a las comerciales que lo presentan en la cara de desprendimiento y en el filo. La adhesión de material a las plaquitas puede achacarse a tres motivos principales: trabajar con probetas de una aleación no ferrosa, usar plaquitas sin recubrimiento y trabajar con velocidades de corte y avance bajas.

Por otro lado, la comparativa entre las herramientas de FA empleadas en los ensayos en seco respecto a las utilizadas en ensayos con taladrina evidencian que el uso de fluidos de corte hace que haya más probabilidades de que se produzca una falla repentina de la herramienta. Además, prácticamente todas las plaquitas ensayadas con taladrina presentan deformación plástica de la punta a la finalización del ensayo.

La experiencia en mecanizados con plaquitas de corte comerciales evidencia que la deformación plástica tiene lugar cuando el material de la herramienta de corte se reblandece. Esto sucede cuando la temperatura de corte es excesivamente alta para una calidad específica. Sin embargo, las mayores deformaciones plásticas en las herramientas de corte de FA han ocurrido bajo el uso de taladrina, que precisamente lo que hace es reducir la temperatura de corte.

## 4.2. Análisis de la viruta

La siguiente figura muestra las imágenes de las virutas recogidas durante los mecanizados, clasificadas en función de los parámetros de corte y del código de la abreviatura del ensayo.

		$A_p = 1 \text{ mm}$			
		$V_c = 45,24 \text{ m/min}$ $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$	$V_c = 54,03 \text{ m/min}$ $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$	$V_c = 45,24 \text{ m/min}$ $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$	$V_c = 54,03 \text{ m/min}$ $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$
CM					
	Helicoidal cónica larga + Helicoidal enmarañada	Tubular enmarañada	Tubular larga + Tubular enmarañada	Tubular enmarañada	
FAS1					
	Arqueada conectada	Arqueada conectada	Plana tubular + Tubular enmarañada	Plana enmarañada + Arqueada conectada	
FAS2					
	Arqueada conectada	Plana larga + Arqueada conectada	Arqueada conectada	Arqueada conectada	

FAS3				
				Arqueada conectada
FAL1				
	Plana corta + Plana enmarañada	Arqueada conectada		Helicoidal corta
FAL2				
	Plana larga + Arqueada conectada	Helicoidal larga + Helicoidal corta	Arqueada conectada	Plana larga
FAL3				
			Helicoidal larga	

Tabla 46. Viruta recogida durante los ensayos.

Para los mecanizados realizados con plaquitas de FA bajo los mismos parámetros de corte no se encuentra una repetibilidad clara en la morfología de las virutas. Esto demuestra que hay mínimo un factor, que por ahora es desconocido, que hace que el comportamiento de las plaquitas durante los mecanizados no sea el mismo para unas mismas condiciones de corte. Puede ser signo de que cada plaquita se desgasta de forma diferente, de que tengan una geometría desigual o que el hecho de que el rompevirutas no tenga la geometría diseñada produzca esta situación. La falta de repetibilidad ocurre sobre todo en los ensayos lubricados, en los ensayos en seco ocurre, pero en menor medida.

Para la mayoría de los casos se observa que no se ha obtenido una viruta fragmentada, sino todo lo contrario, la mayoría de los mecanizados han generado una viruta que ha tendido a enmarañarse. Como consecuencia de la difícil evacuación de la viruta se han producido enredos en la herramienta y en el resto de los elementos que componen la máquina-herramienta.

El hecho de aumentar la velocidad de corte y/o la velocidad de avance no ha supuesto que disminuya la aparición de nidos de viruta enmarañados, esto es posible a que todavía habría que aumentar más las velocidades, aunque inicialmente no sea lo más conveniente para las plaquitas de corte de FA.

Durante la realización de los ensayos se identificó que la viruta procedente de los mecanizados en los que se había empleado taladrina era más frágil que la viruta procedente de los mecanizados en seco. Esto dio lugar a tomar una muestra de viruta procedente de un ensayo con plaquitas comerciales, otra de un ensayo con los mismos parámetros de corte en seco con plaquitas de corte de FA y otra también de un ensayo con los mismos parámetros de corte con plaquitas de FA, pero en el que se había empleado taladrina. Las muestras de viruta se llevaron al microscopio para ver en detalle su aspecto.

A continuación, se muestran unas tablas resumen de la micrografía de las virutas. Siendo la cara interna de la viruta la que está en contacto con la herramienta y la externa la perteneciente al exterior de la probeta.

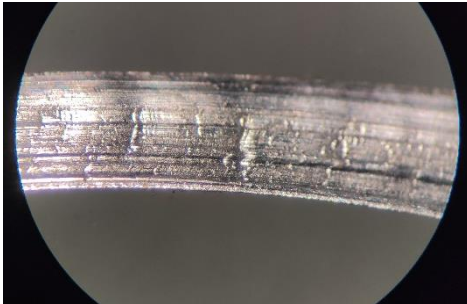
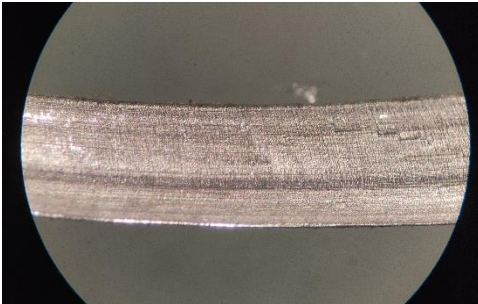
		CM	
Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HCM_C $\alpha$ _P2CP_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R1		
Cara	Externa	Interna	
Fotografía			

Tabla 47. Micrografía de la viruta del ensayo  
ENAW2030\_TN\_D40\_L160\_HCM\_C $\alpha$ \_P2CP\_VC45,24\_VA0,1\_P1\_MS\_R1

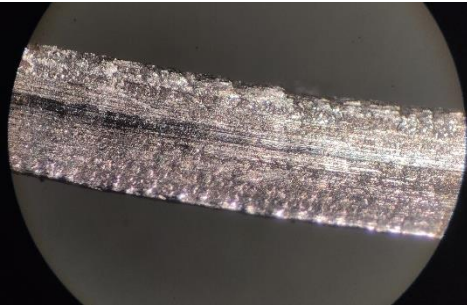
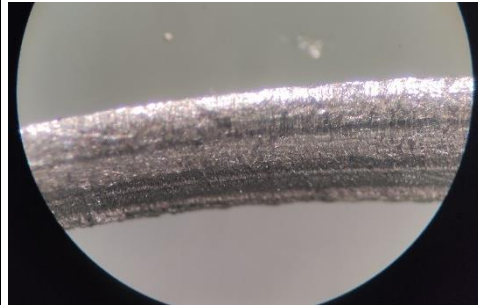
		FAS	
Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P3CN_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R1		
Cara	Externa	Interna	
Fotografía			

Tabla 48. Micrografía de la viruta del ensayo  
ENAW2030\_TN\_D40\_L160\_HFA\_C $\beta$ \_P3CN\_VC45,24\_VA0,1\_P1\_MS\_R1



		FAL	
Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_Cβ_P3SN_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R2		
Cara	Externa	Interna	
Fotografía			

Tabla 49. Micrografía de la viruta del ensayo  
ENAW2030\_TN\_D40\_L160\_HFA\_Cβ\_P3SN\_VC45,24\_VA0,1\_P1\_MS\_R2

La viruta del ensayo con plaquitas de corte comercial y la viruta del ensayo en seco con plaquita de FA tiene un aspecto similar. Aunque analizando en detalle, se aprecia como la viruta de la plaquita comercial presenta una superficie más lisa, siendo la de la plaquita comercial algo más ondulada. Sobre todo, esta diferencia se plasma en las fotografías de la cara interna.

Por su parte, la viruta del ensayo con plaquita de corte de FA y taladrina muestra una geometría más irregular que las anteriores, y en la que se aprecian en mayor detalle las líneas generadas por la deformación plástica. La sensación que da esta viruta es la de proceder de unas condiciones más agresivas.

### 4.3. Análisis térmico

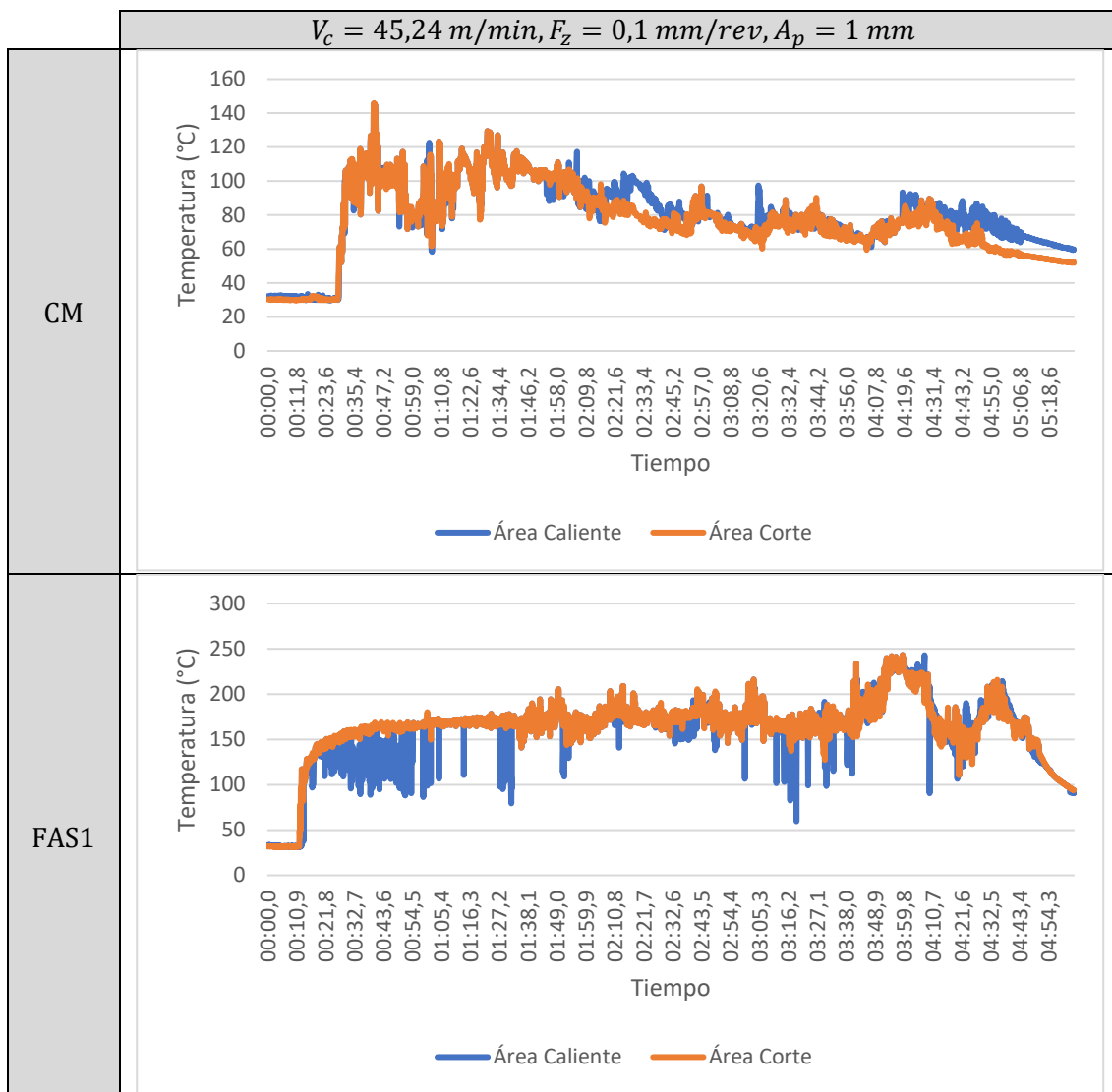
Las temperaturas alcanzadas en los procesos de mecanizado provienen del calor generado en consecuencia de la energía disipada en el proceso de corte. La temperatura excesiva reduce la resistencia, la rigidez, la dureza y la resistencia al desgaste de la herramienta. Pero también puede afectar a la pieza que se está mecanizando puesto que su geometría o propiedades se pueden ver modificadas.

En este punto se muestran una serie de tablas que recogen los diagramas de temperatura-tiempo provenientes de las grabaciones tomadas con la cámara térmica y tratados con el programa Pix-Connect. Estas tablas están organizadas en función de los parámetros de corte y de la herramienta empleada.

A la hora de interpretar las dos áreas de medida es importante tener en cuenta que:

- $T^aA.Caliente > T^aA.Corte \rightarrow$  En ese momento el área caliente se encuentra dando un salto de zona buscando un nuevo punto caliente.

- $T^a.A.Corte > T^a.A.Caliente \rightarrow$  La zona más caliente se encuentra fuera del área de corte.
- $T^a.A.Caliente = T^a.A.Corte \rightarrow$  El punto caliente se encuentra en la zona de corte.



<p>FAS2</p>	
<p>FAL1</p>	
<p>FAL2</p>	<p style="text-align: center;">-</p>
<p>FAL3</p>	

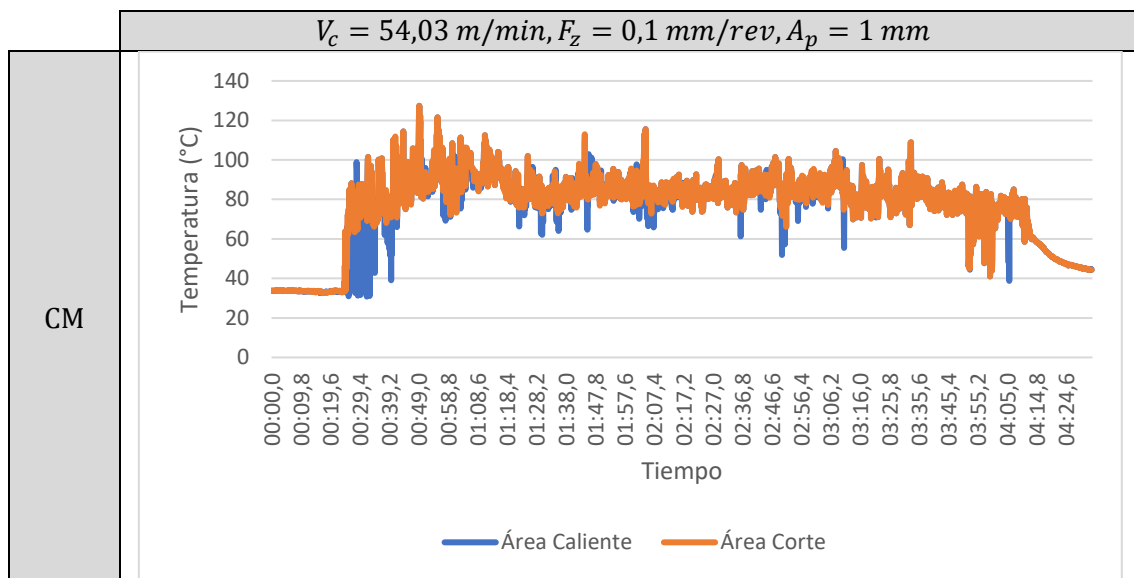
Tabla 50. Diagramas de temperatura tiempo de los distintos ensayos para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

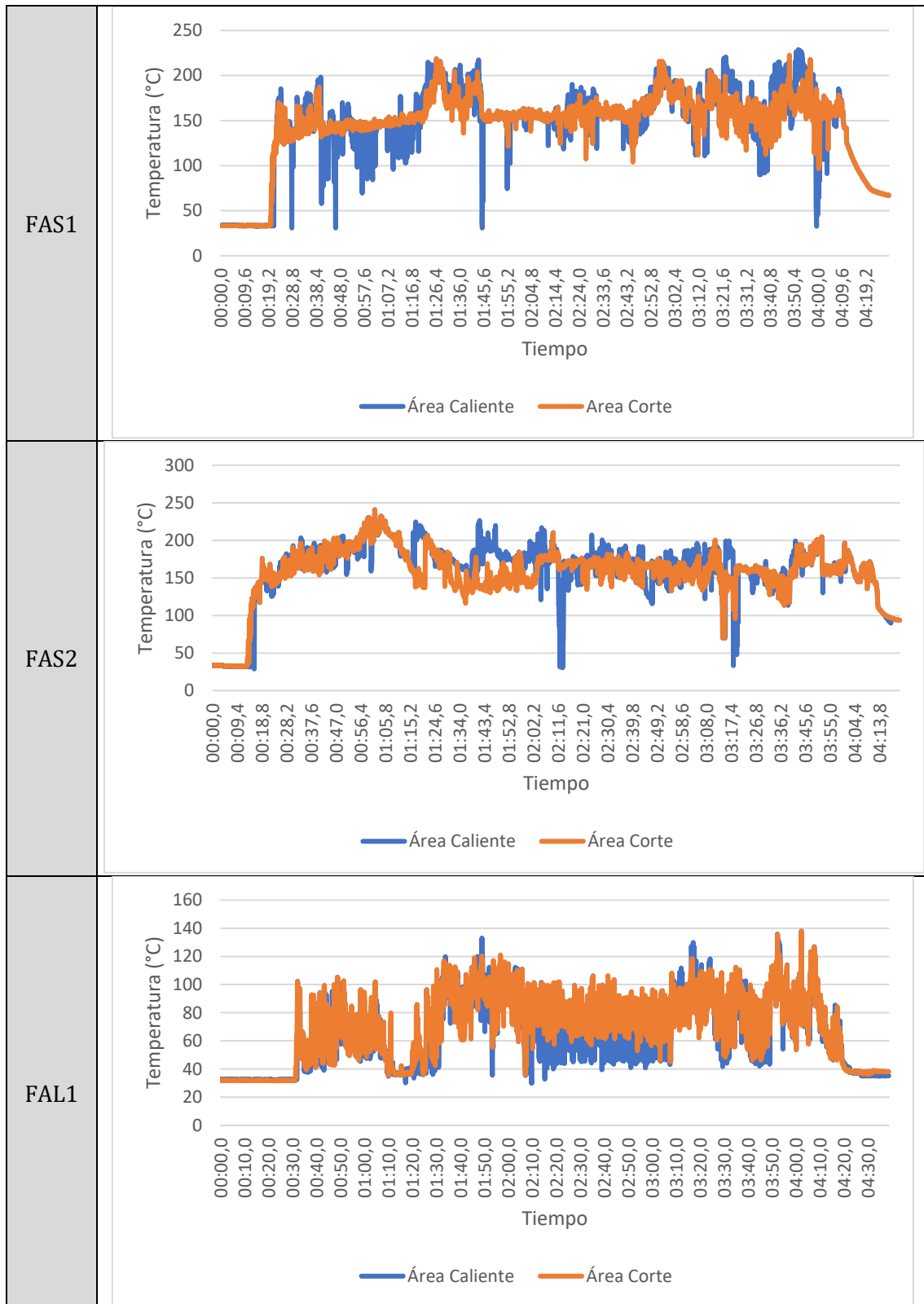
Para este primer conjunto de valores de los parámetros de corte, los diagramas temperatura-tiempo reflejan la gran diferencia de temperaturas alcanzadas en función del tipo de ensayo y de la plaquita de corte empleada. Debido a que esto sucede para todos los conjuntos de valores de los parámetros de corte se comentará al final del punto.

La evolución de la temperatura a lo largo del mecanizado para el ensayo con plaquita de corte comercial muestra una zona inicial de aproximadamente un minuto desde el inicio del mecanizado en el que la temperatura es superior al resto del ensayo, estando la mayoría de los valores en la zona situada entre los 100°C y los 120°C llegando a los 140°C. Posteriormente, se estabiliza en torno a los 80°C hasta que finaliza el ensayo.

En los ensayos en seco con plaquitas de corte de FA la temperatura ha sido bastante superior que en el ensayo con la plaquita comercial. En el FAS1 la temperatura permanece alrededor de los 170°C hasta más o menos alcanzar los 3 minutos y medio de mecanizado que empieza a oscilar. En el FAS2 ocurre algo similar, pero en lugar de pasar a oscilar sufre un descenso.

En el ensayo FAL1 se ve cómo afecta el uso de taladrina en el mecanizado, la temperatura oscila entre los 40°C y 100°C. El ensayo FAL3 refleja el momento en el que se produce la falla de la herramienta ya que la temperatura cae y se estabiliza en torno a los 30°C, la falla se produce más o menos a los 30 segundos comenzar el ensayo.





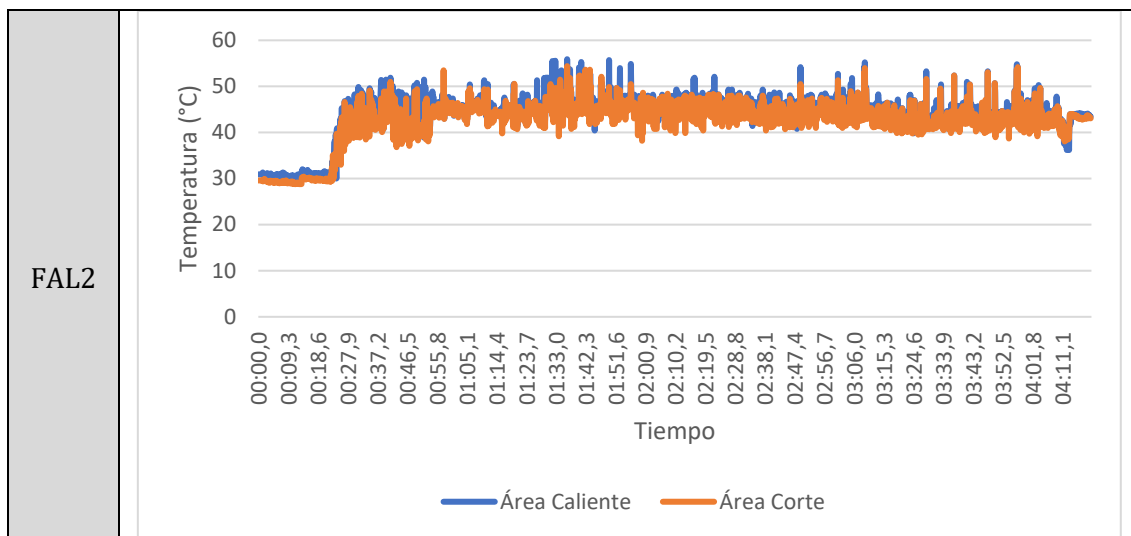
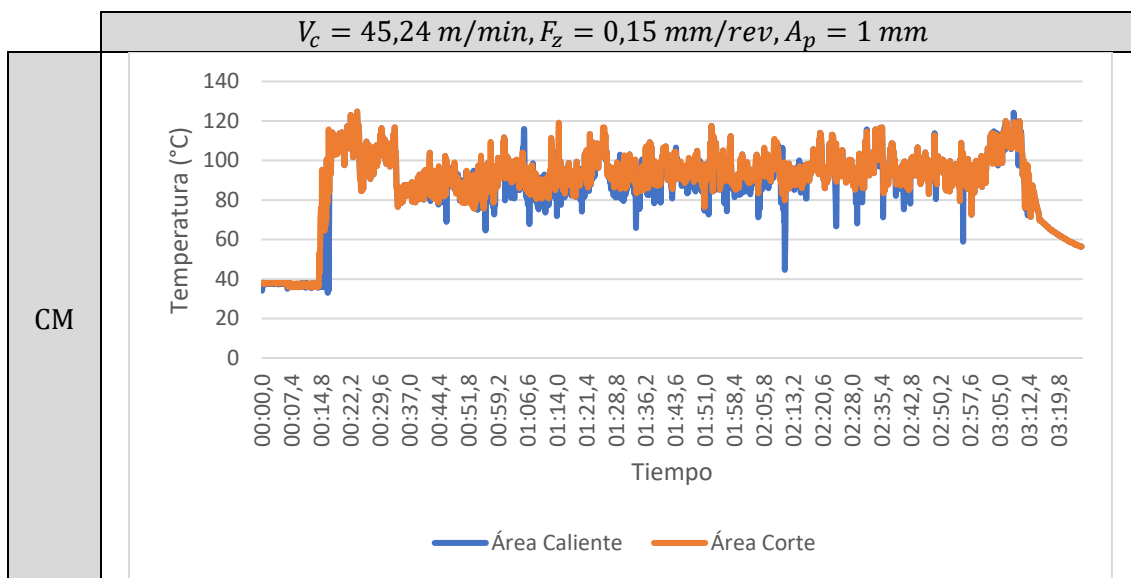
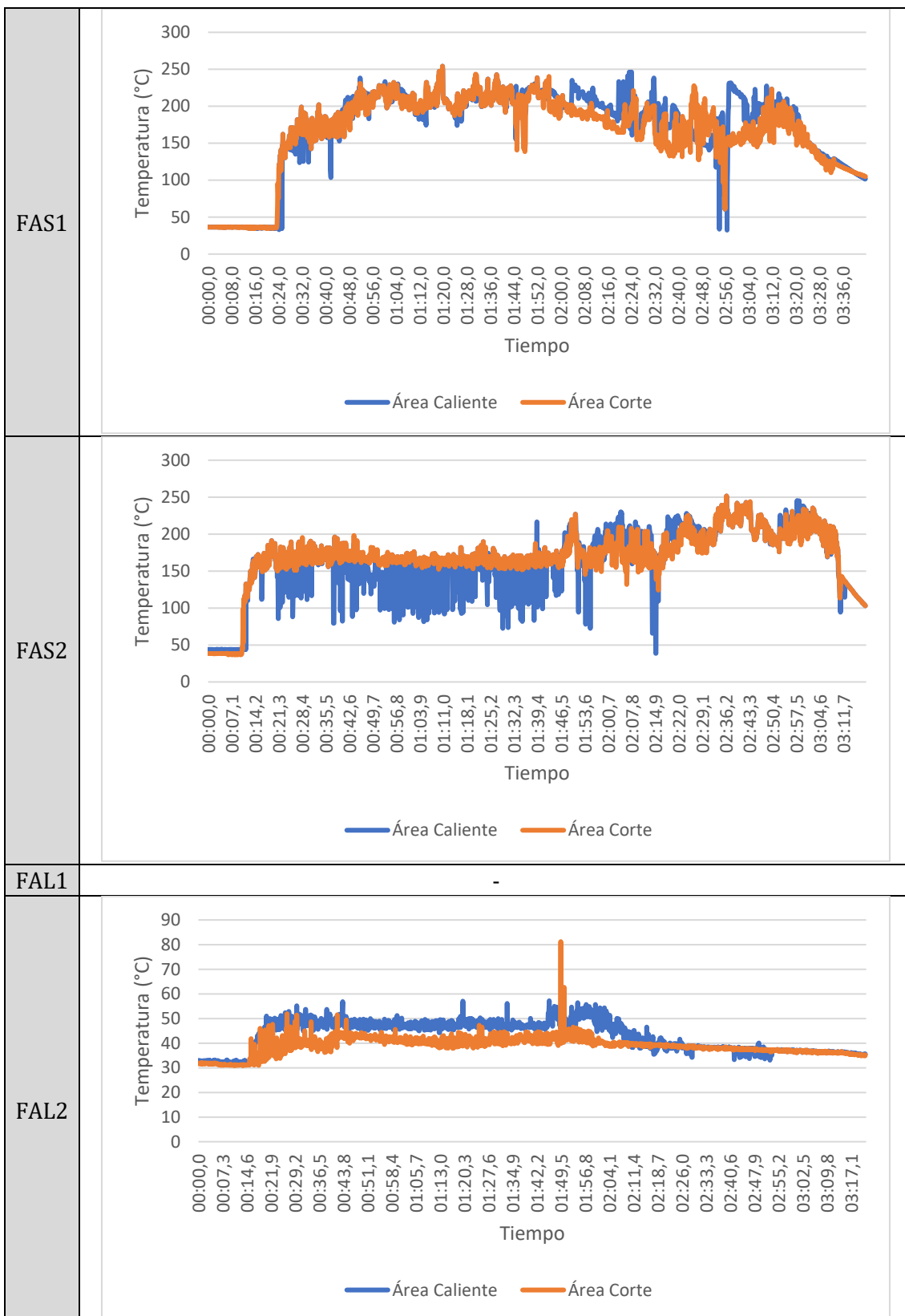


Tabla 51. Diagramas de temperatura tiempo de los distintos ensayos para  $V_c = 54,03 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

El aumento de la velocidad de corte no ha generado un impacto significativo sobre los diagramas temperatura-tiempo. En algún caso como el ensayo con plaquitas comerciales la temperatura ha aumentado en torno a  $10^\circ\text{C}$ , al igual que para la comparativa del FAL1.

La diferencia de rangos de temperatura entre los ensayos lubricados FAL1 y FAL2 se debe a la diferencia de la morfología de la viruta entre ellos. El primero ha tendido a generar una viruta enmarañada creando nidos y el segundo a una viruta más fragmentada.





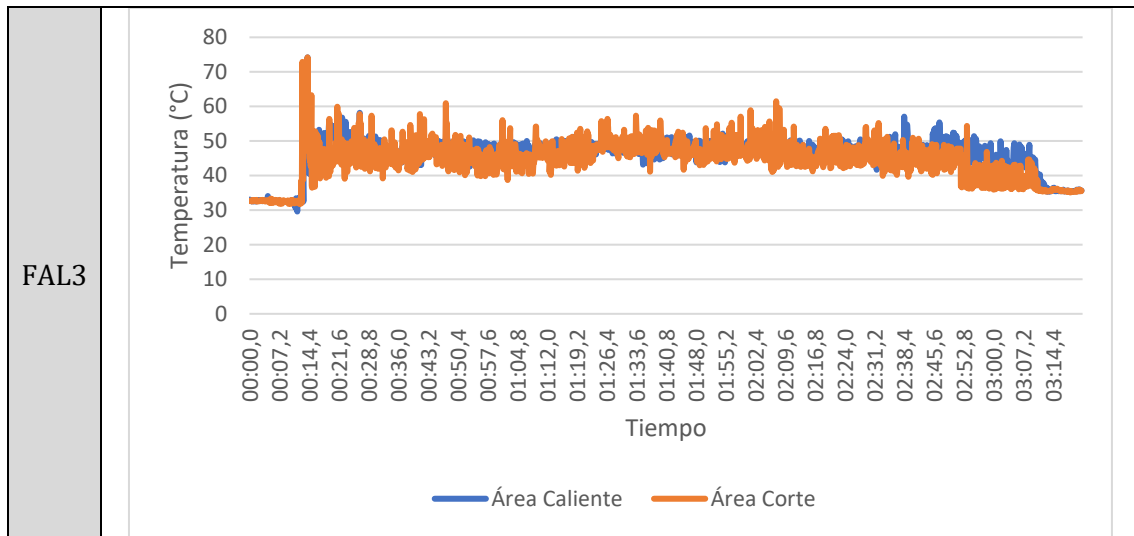
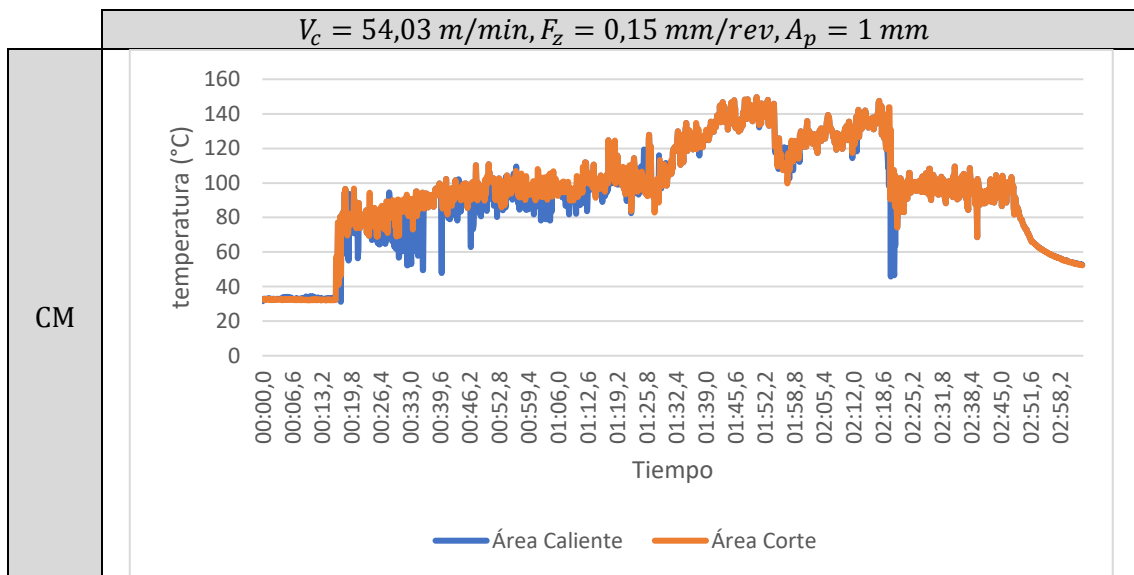


Tabla 52. Diagramas de temperatura tiempo de los distintos ensayos para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

El aumento de la velocidad de avance sí que ha tenido una incidencia clara sobre los ensayos en seco, no así en los ensayos lubricados. La temperatura del ensayo CM ha pasado al rango 80°C-110°C llegando a picos de 120°C. Los ensayos FAS han aumentado el rango de temperatura en torno a 50°C respecto al primer conjunto de valores de los parámetros de corte. Por su parte, los ensayos lubricados han estado sobre los 40°C-50°C.



<p>FAS1</p>	
<p>FAS2</p>	<p>-</p>
<p>FAS3</p>	
<p>FAL1</p>	

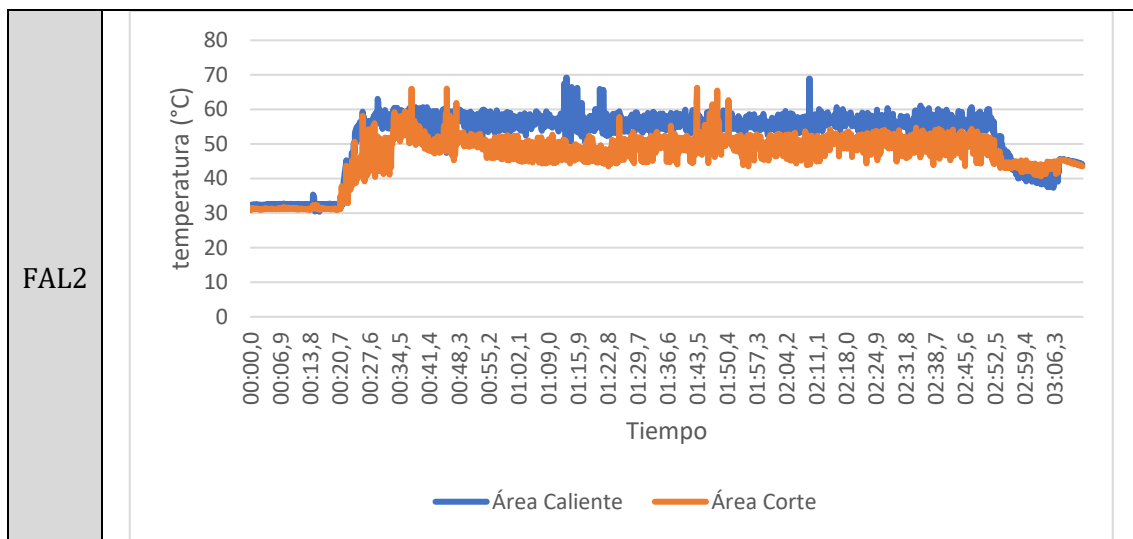


Tabla 53. Diagramas de temperatura tiempo de los distintos ensayos para  $V_c = 54,03 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

Para este último conjunto de valores de los parámetros de corte el diagrama temperatura-tiempo del ensayo CM muestra una tendencia creciente de la temperatura a lo largo del ensayo, esto es debido a que en este mecanizado se ha acumulado un gran nido de viruta que además ha entorpecido la visión de la zona del contacto de la herramienta-probeta. La oscilación final de los valores de temperatura coincide con el momento en el que el nido de viruta se ha golpeado con los elementos del torno.

Por su parte, en los ensayos FAS el rango de valores de temperatura ha descendido de nuevo a  $150^\circ\text{C}$  -  $200^\circ\text{C}$ . En los ensayos FAL se han mantenido sobre los  $40^\circ\text{C}$  -  $50^\circ\text{C}$ .

De forma genérica, en los ensayos en seco el área caliente se encuentra normalmente dentro del área de corte, sin embargo, para los ensayos lubricados pasa todo lo contrario. Esto es debido a que el área caliente en los ensayos lubricados se sitúa sobre la taladrina que envuelve la probeta y que ha pasado por la zona de corte. En los ensayos en seco cuando ambas áreas no coinciden mayoritariamente es debido a que los nidos de viruta dificultan la visión del contacto herramienta-probeta y el área caliente se encuentra en la búsqueda del mayor punto de temperatura en la viruta.

La gran diferencia de temperaturas alcanzadas en función del tipo de ensayo y de la plaquita de corte empleada es clara. En los ensayos en seco con plaquitas FA se generan unas temperaturas superiores, de en torno a los  $100^\circ\text{C}$  respecto a los ensayos con plaquitas comerciales. Los ensayos con taladrina permanecen más o menos constantes para cualquier rango de valores de los parámetros de corte.

Cabe destacar que en muchas ocasiones pese a que el área caliente esté en la zona de corte también la viruta continúa caliente y se ve cómo evoluciona la temperatura a lo largo de ella. Como es bien sabido es importante que esto se produzca, puesto que la propia viruta actúa como un mecanismo de evacuación de calor, por el contrario, serían la herramienta y la probeta los que se llevarían el calor generado, y esto es lo menos interesante para el buen desarrollo del mecanizado.

En los ensayos lubricados el chorro de taladrina es un obstáculo para la cámara para poder tomar con claridad la temperatura de la zona de corte. Los vídeos muestran también la evolución de la temperatura de la taladrina, se ve como esta entra a una temperatura ambiente y tras pasar por la zona de corte y envolverse en la probeta aumenta bastante su temperatura, llegando a ser la zona más caliente del ensayo. Una vez cae la taladrina en la zona de recogida de viruta y fluidos de corte del torno, se aprecia como sigue todavía caliente, y el flujo que sigue hasta volver al depósito de la bomba del sistema de lubricación. El aumento de la temperatura debido a la transferencia de calor entre la taladrina y la zona de corte es señal que el fluido de corte actúa como refrigerante. Habría que evaluar si la taladrina blanca empleada actúa más como refrigerante que como lubricante, cosa que no se pretendía.

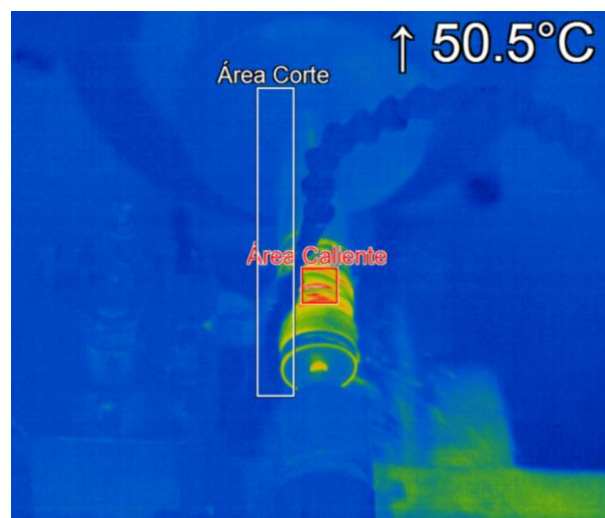


Figura 27. Imagen tomada de la grabación de un ensayo lubricado.

#### 4.4. Análisis de las desviaciones microgeométricas

Tras el análisis de la morfología de la viruta, del estado de la herramienta tras los mecanizados y de la evolución térmica durante estos, se va a mostrar y analizar los resultados obtenidos de la calidad superficial de las probetas ensayadas. La evaluación de la calidad superficial se realizará a través del tratamiento de los parámetros de rugosidad media aritmética ( $R_a$ ) y máxima altura del perfil ( $R_z$ ).

Debido a que en las probetas ensayadas con plaquitas de FA los valores de  $R_a$  y  $R_z$  no siguen a lo largo de los tramos una tendencia horizontal, sino que se van incrementando y en ocasiones oscilando, carece de sentido realizar medias globales, ya que se perdería la mayor parte de la información. Además, tampoco tienen una relación tan estrecha las repeticiones de un mismo mecanizado como para hacer una media entre ellas. Lo que si se va a realizar es una media de las cuatro generatrices de cada tramo.

A continuación, se muestran las tablas y gráficas correspondientes a cada conjunto de valores de los parámetros de corte.

❖  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

Ra					
	T1	T2	T3	T4	T5
	30	60	90	120	150
CM	0,573	0,579	0,620	0,545	0,564
FAS1	1,307	1,838	1,722	1,589	2,372
FAS2	0,788	1,411	2,419	2,444	1,957
FAL1	1,252	1,458	2,086	2,484	2,825
FAL2	2,268	2,212	2,205	2,750	0,873
FAL3	-	-	-	-	-

Tabla 54. Valores de Ra para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

En el último tramo de la probeta del segundo ensayo lubricado se produjo la falla de la herramienta, de ahí que baje el valor de rugosidad. En el ensayo FAL3 no se han registrado datos en ninguno de los tramos puesto que la falla de la herramienta ocurrió al inicio y de forma repentina.

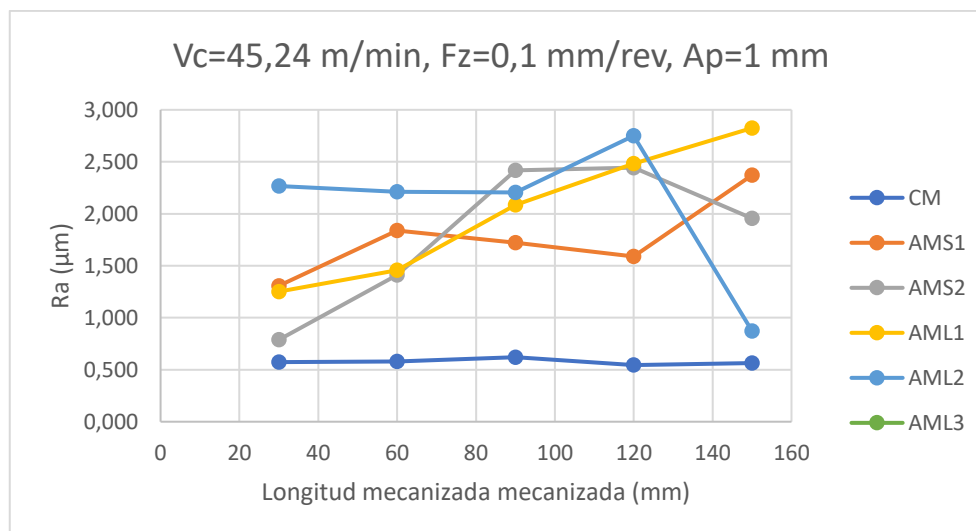


Figura 28. Gráfica de Ra para volores de  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

Al igual que ocurría con la morfología de la viruta, tampoco existe una repetibilidad de los valores de Ra en los mecanizados realizados bajo los mismos parámetros de corte. Esto es una rareza, puesto que una de las premisas de los mecanizados es que todo mecanizado realizado bajo las mismas condiciones debe dar resultados prácticamente idénticos.

En la gráfica de la Figura 28 se aprecia que el valor de Ra perteneciente a la probeta ensayada con plaquitas comerciales permanece prácticamente constante, mientras que en las probetas ensayadas con plaquitas de FA el valor de Ra varía.

Rz					
	T1	T2	T3	T4	T5
	30	60	90	120	150
CM	3,1275	3,25325	3,552	3,29375	3,42975
FAS1	7,585	10,41475	10,361	9,09425	13,70225
FAS2	4,49175	8,99575	13,3015	13,949	11,7135
FAL1	7,3495	9,14225	11,054	12,83675	16,49
FAL2	12,11775	12,91425	11,6115	13,96425	5,236
FAL3	-	-	-	-	-

Tabla 55. Valores de Rz para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

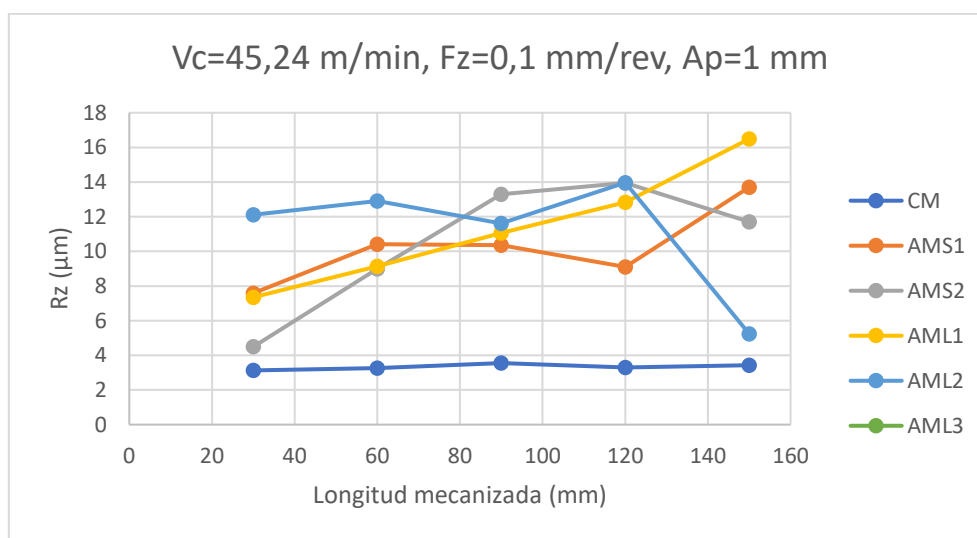


Figura 29. Gráfica de Rz a lo largo de la probeta para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

Los valores de Rz siguen una tendencia prácticamente idéntica a los valores de Ra en todos los ensayos.

❖  $V_c = 54,03 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

Ra					
	T1	T2	T3	T4	T5
	30	60	90	120	150
CM	0,724	0,693	0,623	0,718	0,748
FAS1	0,712	1,107	1,048	1,126	1,361
FAS2	1,058	1,181	1,526	0,989	1,848
FAL1	1,810	2,597	2,727	2,954	2,862
FAL2	2,469	2,070	1,274	3,512	3,454

Tabla 56. Valores de Ra para  $54,03 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,1 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

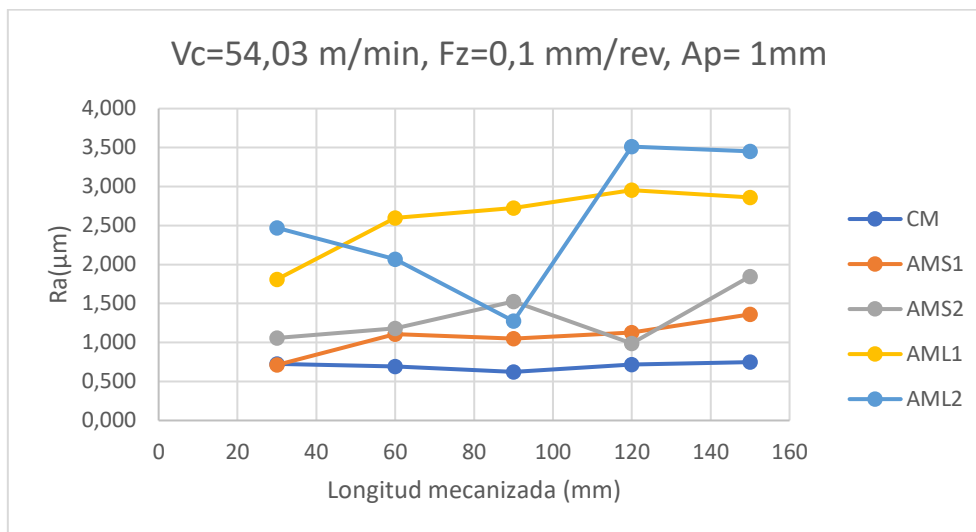


Figura 30. Gráfica de Ra a lo largo de la probeta para  $54,03 \text{ m/min}, F_z = 0,1 \text{ mm/rev}, A_p = 1 \text{ mm}$

Rz					
	T1	T2	T3	T4	T5
	30	60	90	120	150
CM	4,584	3,808	3,622	4,303	4,269
FAS1	4,181	6,635	7,433	7,265	9,385
FAS2	6,251	7,174	9,153	5,830	11,720
FAL1	9,751	13,419	14,978	15,774	14,268
FAL2	11,788	10,632	7,385	19,465	17,376

Tabla 57. Valores de Rz para  $54,03 \text{ m/min}, F_z = 0,1 \text{ mm/rev}, A_p = 1 \text{ mm}$

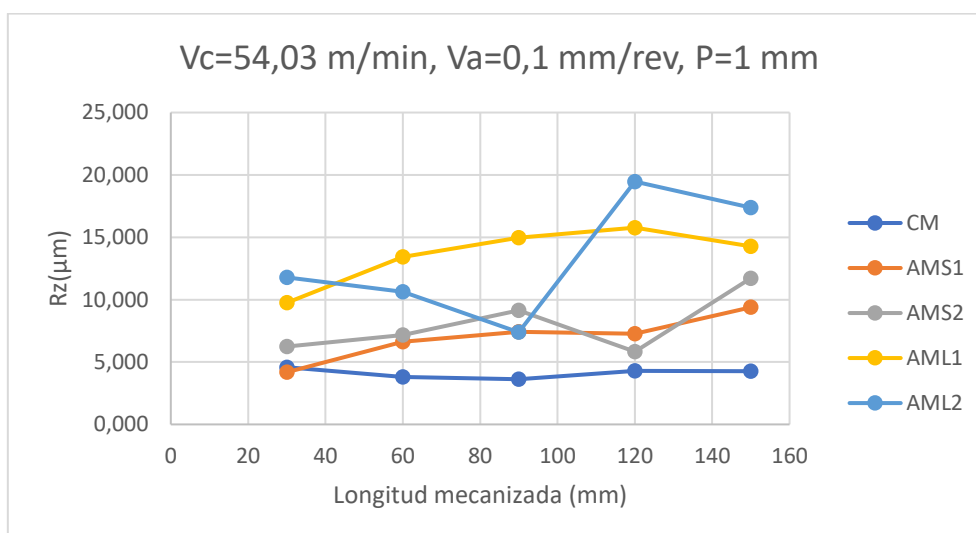


Figura 31. Gráfica de Rz a lo largo de la probeta para  $54,03 \text{ m/min}, F_z = 0,1 \text{ mm/rev}, A_p = 1 \text{ mm}$

Para los mecanizados en seco se observa que han mostrado unos valores de rugosidad bastante cercanos al ensayo CM, excepto en el tramo final que empiezan a seguir una tendencia creciente. Por su parte los ensayos lubricados han generado peores calidades superficiales en las probetas.

❖  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

Ra					
	T1	T2	T3	T4	T5
	30	60	90	120	150
CM	1,407	1,338	0,859	0,768	0,721
FAS1	2,215	1,594	1,934	3,051	5,031
FAS2	2,574	1,964	2,229	2,039	1,850
FAL1	-	-	-	-	-
FAL2	3,403	3,369	3,289	-	-
FAL3	3,173	3,518	4,397	2,911	1,173

Tabla 58. Valores de Ra para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

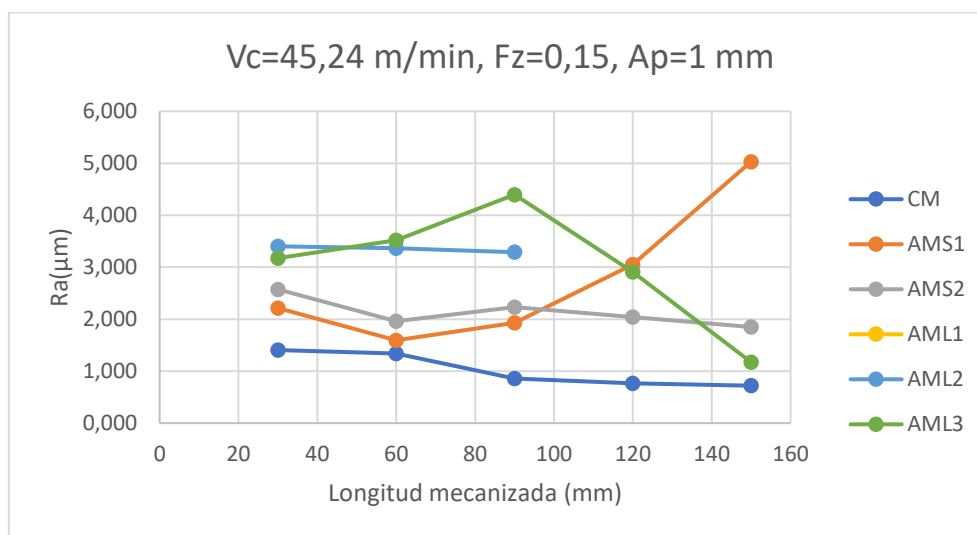


Figura 32. Gráfica de Ra a lo largo de la probeta para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

En el ensayo FAL1 debido a un error humano no se conectó la bomba de la taladrina para realizar el ensayo, por lo que se ha descartado su estudio. En el segundo ensayo lubricado no se han registrado datos en los dos últimos tramos puesto que se produjo la falla de la herramienta. Los resultados de calidad superficial para este conjunto de parámetros de corte han sido muy dispersos, lo que dificulta el análisis.

Rz					
	T1	T2	T3	T4	T5
	30	60	90	120	150
CM	8,790	8,158	5,120	4,699	4,357
FAS1	11,719	8,600	10,255	17,486	21,505
FAS2	13,494	10,728	12,982	13,042	12,106
FAL1	-	-	-	-	-
FAL2	17,411	17,242	17,727	-	-
FAL3	17,309	20,582	24,624	14,830	6,206

Tabla 59. Valores de Rz para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

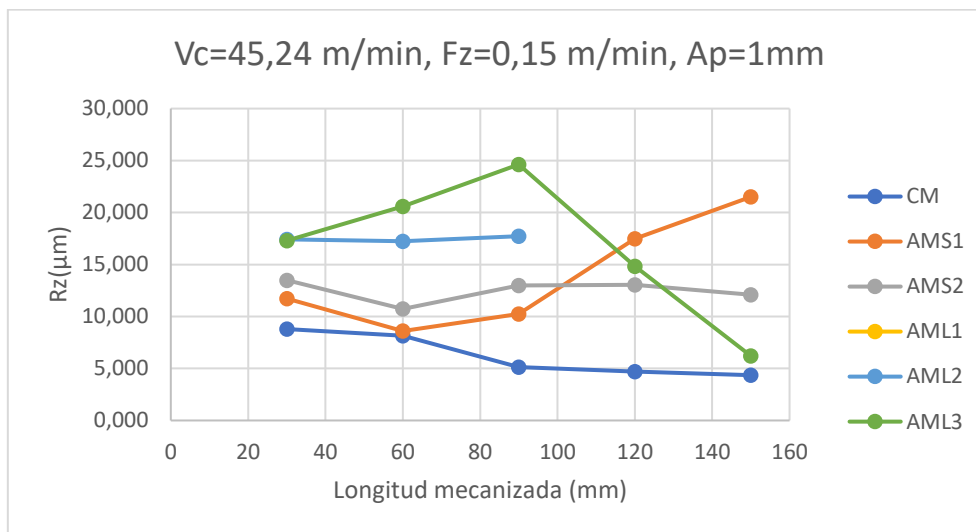


Figura 33. Gráfica de  $R_z$  a lo largo de la probeta para  $V_c = 45,24 \text{ m/min}, F_z = 0,15 \text{ mm/rev}, A_p = 1 \text{ mm}$

❖  $V_c = 54,03 \text{ m/min}, F_z = 0,15 \text{ mm/rev}, A_p = 1 \text{ mm}$

Ra					
	T1	T2	T3	T4	T5
	30	60	90	120	150
CM	0,943	0,968	0,971	0,963	1,018
FAS1	1,753	1,695	2,078	1,816	2,408
FAS2	2,947	2,607	2,279	1,641	1,957
FAS3	3,422	2,786	3,810	4,471	2,435
FAL1	2,265	2,228	2,297	2,663	2,640
FAL2	2,239	2,504	2,614	2,904	2,628

Tabla 60. Valores de  $R_a$  para  $V_c = 54,03 \text{ m/min}, F_z = 0,15 \text{ mm/rev}, A_p = 1 \text{ mm}$

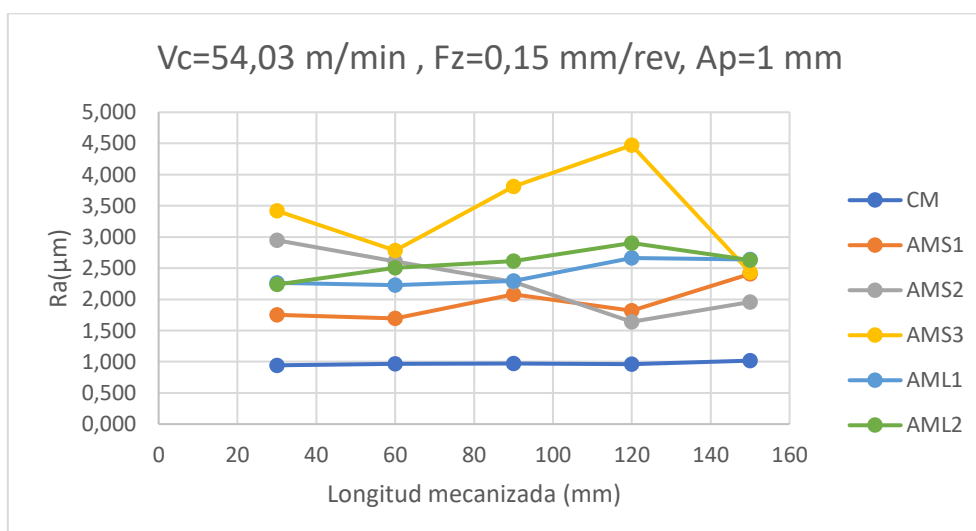


Figura 34. Gráfica de  $R_a$  para  $V_c = 54,03 \text{ m/min}, F_z = 0,15 \text{ mm/rev}, A_p = 1 \text{ mm}$

En este caso ha habido tres ensayos con plaquitas de corte de FA que han mostrado unos resultados bastante constantes aunque algo superiores al ensayo con la herramienta comercial. Han sido el FAS1, el FAL1 y el FAL2, y de entre ellos el más próximo ha sido el FAS1, aunque es cierto que en el tramo final incrementa el valor de Ra.

Rz					
	T1	T2	T3	T4	T5
	30	60	90	120	150
CM	5,304	5,277	5,470	5,258	5,649
FAS1	11,871	10,088	13,461	12,611	15,502
FAS2	14,550	13,772	13,988	10,041	13,566
FAS3	18,649	16,811	17,295	21,580	15,172
FAL1	11,417	12,091	11,343	14,121	13,774
FAL2	12,682	13,042	13,968	15,044	15,175

Tabla 61. Valores de Rz para  $V_c = 54,03 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

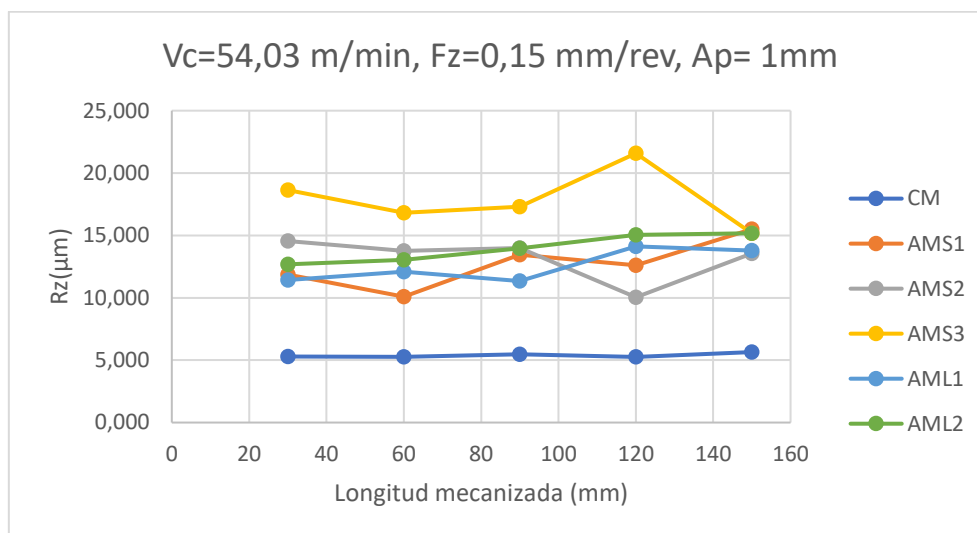


Figura 35. Gráfica de Rz para  $V_c = 54,03 \text{ m/min}$ ,  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$ ,  $A_p = 1 \text{ mm}$

Observando el conjunto de gráficas se aprecia como afecta a la rugosidad el incremento de los valores de los parámetros de corte. El resultado obtenido en los ensayos con plaquitas de corte comerciales deja la evidencia de que la rugosidad permanece constante a lo largo de la longitud de mecanizado para todos los valores del conjunto de los parámetros de corte. Por su parte, el aumento de la velocidad de corte no ha mostrado una afección sobre los valores de rugosidad. Sin embargo, el incremento de la velocidad de avance sí que ha afectado a la calidad superficial, siendo peor al aumentarla.

En el caso de las plaquitas de corte comerciales no se puede obtener una clara conclusión de cómo afecta el incremento de los parámetros de corte en la calidad superficial. Lo que sí se observa es que para el conjunto de valores de  $V_c = 54,03 \text{ m/min}$  y  $F_z = 0,15 \text{ mm/rev}$  se produce la mayor uniformidad de valores de Ra a lo largo de la longitud mecanizada comparando tramo a tramo. Sin embargo, para el conjunto  $54,03 \text{ m/min}$ ,  $F_z =$



0,1  $mm/rev$  se ha alcanzado la calidad superficial en probetas de ensayos con plaquitas de FA más próxima a la probeta mecanizada con plaquita comercial.

Para todas las parejas de valores  $V_c$  y  $F_z$  se produce el mismo resultado comparando las plaquitas de corte comerciales y las de FA, y es que la calidad superficial de los mecanizados realizados con plaquitas de corte comerciales es considerablemente superior a los mecanizados con plaquitas FA. En las plaquitas de corte comerciales no se aprecia que el desgaste de la herramienta provoque que vaya disminuyendo la calidad superficial de las probetas.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## 5. CONCLUSIONES

---

El desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado ha estado centrado en la elaboración y análisis de plaquitas de corte para torno llevadas a cabo con técnica de fabricación aditiva metálica. Este trata de ser una vía de estudio de un nuevo método de fabricación de estas frente a los tradicionales.

La pulvimetalurgia requiere una gran inversión en los moldes especializados con los que se llevan a cabo cada tipo de plaquita. Por su parte, la fabricación aditiva permite dentro de los límites de la tecnología y del equipo de impresión una flexibilidad en la geometría que no viene relacionada con el incremento del coste.

Con todos los objetivos propuestos inicialmente cubiertos, y tras completar un estudio teórico, un trabajo práctico siguiendo la metodología expuesta y un análisis de los datos obtenidos, se pasa a exponer las conclusiones a las que se ha llegado.

### ❖ Conclusiones generales

Se ha logrado analizar un nuevo método de fabricación de herramientas de corte gracias a la gran versatilidad que ofrece la fabricación aditiva. Su evolución está siendo progresiva con el tiempo, hecho que se ve reflejado en la gran aparición de nuevas técnicas y máquinas, y en el desarrollo de cada vez más metales que son susceptibles de ser empleados.

Se ha establecido una metodología de desarrollo de plaquitas de corte con el sistema Metal X de Markforged. Aunque esta metodología está desarrollada expresamente para plaquitas de corte para torno, en el caso de querer desarrollar herramientas de corte para otro tipo de mecanizado, serían pocas las modificaciones que se tendrían que llevar a cabo.

Con el uso de plaquitas de corte de fabricación aditiva la calidad superficial de las probetas ha disminuido, la vida útil de las herramientas es corta, no se tiene un cierto control sobre la morfología de la viruta, se ha producido un aumento de la temperatura durante el mecanizado frente a los mecanizados con plaquitas comerciales, ha sido necesario realizar un talón a las probetas para evitar su desplazamiento. Lo que sería definición de una baja maquinabilidad, sin embargo, la experiencia en mecanizados con aleación de aluminio EN AW-2030 refleja todo lo contrario, se la cataloga como un material que presenta una buena maquinabilidad. Lo que hace deducir que son las plaquitas de corte de FA las responsables de todos los aspectos negativos descritos.

La taladrina no ha ayudado a mejorar la vida útil de la herramienta ni el acabado superficial de la pieza. Además, ha habido más herramientas que han sufrido una falla catastrófica que en los ensayos en seco. Por lo que se determina que el uso de taladrina no ha sido efectivo.



## ❖ Conclusiones específicas

### I. Análisis de la herramienta

La impresora no tiene la precisión dimensional requerida para realizar parte de la geometría de la herramienta. Si se quiere subsanar este aspecto sería necesario replantear la forma de elaborar con el sistema Metal X las plaquitas de FA o aplicar operaciones de postprocesado a estas.

El estado final de las herramientas comerciales y las de FA son totalmente distintos. Las plaquitas comerciales presentan principios de desgaste y adhesión de material en el filo y la cara de desprendimiento, frente a las plaquitas de FA, que presentan estos dos fenómenos en la cara de incidencia.

### II. Análisis de la viruta

En las diferentes repeticiones de los mecanizados con plaquitas de corte de fabricación aditiva y bajo las mismas condiciones de corte, se detecta que la morfología de la viruta no es la misma. Esto es un signo de que para unas mismas condiciones de corte una herramienta del mismo tipo que otra no sufre un desgaste similar.

El hecho de aumentar la velocidad de corte y/o la velocidad de avance no ha supuesto una disminución de la aparición de nidos de viruta enmarañados. Por lo que habría que aumentar más las velocidades, aunque inicialmente no sea lo más conveniente para las plaquitas de corte de FA.

### III. Análisis térmico

Respecto al primer conjunto de valores de los parámetros de corte para ensayos con plaquitas de corte de AM y en seco, el aumento de la velocidad de corte no ha generado grandes cambios en los diagramas temperatura-tiempo. Por el contrario, el aumento de la velocidad de avance sí que ha incrementado este rango en unos 50°C. Lo más significativo ha ocurrido al aumentar las dos variables a la vez, donde el rango de valores ha vuelto a ser el mismo que para el primer conjunto.

La temperatura alcanzada en los ensayos con plaquitas AM es muy superior a la alcanzada en los ensayos con plaquitas comerciales para unos mismos parámetros de corte.

El empleo de la taladrina, aunque haya tenido consecuencias negativas en la calidad superficial y la herramienta, ha tenido como efecto reducir la temperatura en la zona de corte enormemente.

### IV. Análisis microgeométrico

Para todas las parejas de valores  $V_c$  y  $F_z$  la calidad superficial de los mecanizados realizados con plaquitas de corte comerciales es considerablemente superior a los mecanizados con plaquitas FA. En las plaquitas de corte comerciales no se aprecia que el desgaste de la herramienta produzca una caída de la calidad superficial de las probetas, como sí pasa en las probetas ensayadas con plaquitas de corte de FA.



En el caso de las plaquitas de corte comerciales no se puede obtener una clara conclusión de cómo afecta el incremento de los parámetros de corte en la calidad superficial de las probetas, esto es debido a la dispersión de los resultados.

En los ensayos con plaquitas de corte comerciales la rugosidad permanece constante a lo largo de la longitud de mecanizado para todos los valores del conjunto de los parámetros de corte. Aquí sí se puede decir que el aumento de la velocidad de corte no ha mostrado una afección sobre los valores de rugosidad. Sin embargo, el incremento de la velocidad de avance sí que ha afectado a la calidad superficial, siendo peor al aumentarla.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## 6. LÍNEAS FUTURAS

---

Como futuros proyectos o estudios que sirvan como continuación de la nueva línea de investigación que se abre con la elaboración del actual Proyecto Final de Grado, se planean diferentes posibles continuaciones que se muestran a continuación:

- Aumentar el número de repeticiones de los ensayos llevados a cabo en este proyecto con los mismos parámetros de corte para poder obtener resultados más concluyentes.
- Ampliar el rango de los parámetros de corte y estudiar de nuevos fluidos de corte para los ensayos lubricados.
- Estudiar cómo mejorar la calidad de la geometría de las plaquitas de corte de fabricación aditiva y el efecto en los mecanizados de la pérdida de algunos detalles geométricos.
- Estudio de nuevas herramientas de corte como plaquitas para fresa o brocas para taladro, con el fin de continuar evaluando las prestaciones del sistema Metal X en la elaboración de herramientas de corte.
- Estudios con probetas de diferentes aleaciones. Sería de interés evaluar la respuesta de las plaquitas frente al mecanizado de otras aleaciones, tanto más blandas como más duras.
- Partiendo de las probetas ya mecanizadas en este estudio, continuar realizando estudios metrológicos sobre estas, como pueden ser desviaciones de forma, estudios de corrosión, etc.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## 7. Bibliografía

---

- 3Dnatives. (s.f.). Obtenido de 3Dnatives: <https://www.3dnatives.com/3D-compare/es/impresoras-3d/m450/>
- ASM International. (1992). *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*.
- Balbás Calvo, A., Espinosa, M., & Dominguez Somonte, M. (2018). Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos. *Lámpsakos* |, 47-54.
- Contreras, V. (2016). *Casiopea*. Obtenido de Casiopea Web: [https://wiki.ead.pucv.cl/V%C3%ADctor\\_Contreras:\\_T%C3%ADtulo\\_II](https://wiki.ead.pucv.cl/V%C3%ADctor_Contreras:_T%C3%ADtulo_II)
- Escuela de Postgrado Industrial. (2022). Obtenido de Escuela de Postgrado Industrial Web: <https://postgradoindustrial.com/fluidos-de-corte-funciones/>
- Gebhardt, A., Kessler, J., & Thurn, L. (2019). *3D printing: understanding additive manufacturing* (Segunda ed.). Munich, Germany: Hanser Publishers.
- Gómez González, S. (2008). *SolidWorks*. Barcelona: MARCOMBO, S.A.
- Ingeniería Mecafenix. (s.f.). Obtenido de Ingeniería Mecafenix Web site: <https://www.ingmecafenix.com/otros/maquinas-herramientas/el-torno/>
- ISCAR eCatalog. (s.f.). Obtenido de ISCAR LDT: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=5594615&fnum=72&mapp=BO&lang=SP>
- ISO 13399-1:2006 Cutting tool data representation and exchange — Part 1: Overview, fundamental principles and general information model. (2006). Genève, Switzerland.
- ISO 3685:1993 Tool-life testing with single-point turning tools. (1993). Genève, Switzerland.
- ISO 4288:1996 Especificación geométrica de productor (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial. (1996). Madrid, España.
- Kalpajian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación.
- Larburu, N. (1989). *Máquinas prontuario. Técnicas, máquinas, herramientas*. Ediciones Paraninfo, S.A.



- Markforged Guides*. (s.f.). Obtenido de Markforged Web Site:  
<https://3d.markforged.com/white-paper-metal-design-guide.html>
- Markforged Printers*. (s.f.). Obtenido de Markforged: <https://www.mark3d.com/en/3d-printers/metal-x/>
- Markforged Resources*. (s.f.). Obtenido de Markforged:  
<https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-atomic-diffusion-additive-manufacturing-adam>
- Mecánicas MECAL, S.L.U.* (s.f.). Obtenido de mecanicasmecal:  
<https://www.mecanicasmecal.com/2019/03/29/que-es-el-torneado/>
- NIPPON GASES*. (s.f.). Obtenido de NIPPON GASES The Gas Professionals:  
<https://blogs.nippongases.es/blog/fabricacion-aditiva-claves-tecnologia-waam/>
- Optris*. (s.f.). Obtenido de Optris Web Site: <https://www.optris.es/camara-infrarroja-optris-pi-640>
- P. Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Pantcho Stoyanov, P. P. (2016). *Estados Unidos Patente nº 14/710644*.
- SICNOVA Blog*. (s.f.). Obtenido de SICNOVA: <https://sicnova3d.com/blog/metal-expansion-kit-ultimaker/>
- Sýkora, J., & Kroft, L. (2021). Additively Manufacturing an Indexable Insert. *World Symposium on Mechanical-Materials Engineering & Science (WMMES 2021)*, (pág. 1190). Prague.
- The Aluminium Association. (2018). *International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys*. Arlington.
- Tienda SICNOVA 3D*. (s.f.). Obtenido de SICNOVA: <https://tienda.sicnova3d.com/>



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## ANEXOS



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## ÍNDICE

---

ANEXO A. PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO EN AW-2030.....	1
ANEXO B. PROPIEDADES DEL ACERO PARA HERRAMIENTAS H13 DE MARKFORGED .....	3
ANEXO C. HOJAS DE DATOS DE LOS ENSAYOS .....	5



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 36. Diagrama resistencia a la tracción-deformación del acero H13 según su procedencia y tratamiento térmico. Fuente: (Markforged Materials, s.f.) .....	3
Figura 37. Microestructura del H13 de Markforged sinterizado. Fuente: (Markforged Materials, s.f.) .....	4



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 62. Composición química en porcentaje en peso de la aleación EN AW-2030.....	1
Tabla 63. Propiedades mecánicas de la aleación EN AW-2030.....	1
Tabla 64. Propiedades físicas de la aleación EN AW-2030.....	1
Tabla 65. Composición química en porcentaje en peso del acero para herramientas H13 de Markforged.....	3
Tabla 66. Propiedades mecánicas de los distintos aceros H13. Fuente: (Markforged Materials, s.f.) .....	4



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## ANEXO A. PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO EN AW-2030

Entre las aleaciones de aluminio aptas para tornos automáticos de alta velocidad, la aleación 2030 presenta las más altas características mecánicas. Esta aleación se selecciona a menudo cuando es necesario tener una buena combinación de maquinabilidad y altas propiedades mecánicas. Sin embargo, tiene baja resistencia a la corrosión. A continuación, se muestran sus propiedades y características de forma detallada.

### ❖ Composición química en porcentaje en peso

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Mínimo (%)	-	-	3,3	0,2	0,5	-	-	-	-
Máximo (%)	0,8	0,7	4,5	1	1,3	0,1	0,5	0,2	Resto

Tabla 62. Composición química en porcentaje en peso de la aleación EN AW-2030.

### ❖ Propiedades mecánicas

Diámetro (mm)	Estado (Mpa)	R <sub>m</sub> (Mpa)	R <sub>p0,2</sub> (Mpa)	A (%)	Dureza (HB)
≤80	T4	250	8	8	115
80-≤200	T4510	340	220	8	115
200-≤2500	T4511	330	210	7	115

Tabla 63. Propiedades mecánicas de la aleación EN AW-2030.

### ❖ Principales características

- Combinación de buena maquinabilidad y elevadas propiedades mecánicas.
- Baja resistencia a la corrosión.

### ❖ Aplicaciones

- Tornillos
- Roscas
- Barras roscadas

### ❖ Propiedades físicas

Densidad	2,85 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	71000 Mpa
Coefficiente de dilatación lineal	23,5 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Conductividad térmica	140 W/mK
Conductividad eléctrica	53-49 MS/m

Tabla 64. Propiedades físicas de la aleación EN AW-2030.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## ANEXO B. PROPIEDADES DEL ACERO PARA HERRAMIENTAS H13 DE MARKFORGED

### ❖ Composición química en porcentaje en peso

Elementos	Cr	Mo	Si	V	C	Mn	P	S	Fe
Mínimo (%)	4,7	1,3	0,8	0,8	0,3	0,2	-	-	-
Máximo (%)	5,5	1,7	1,2	1,2	0,45	0,5	0,03	0,03	Resto

Tabla 65. Composición química en porcentaje en peso del acero para herramientas H13 de Markforged.

Fuente: (Markforged Materials, s.f.)

### ❖ Resistencia a la tracción

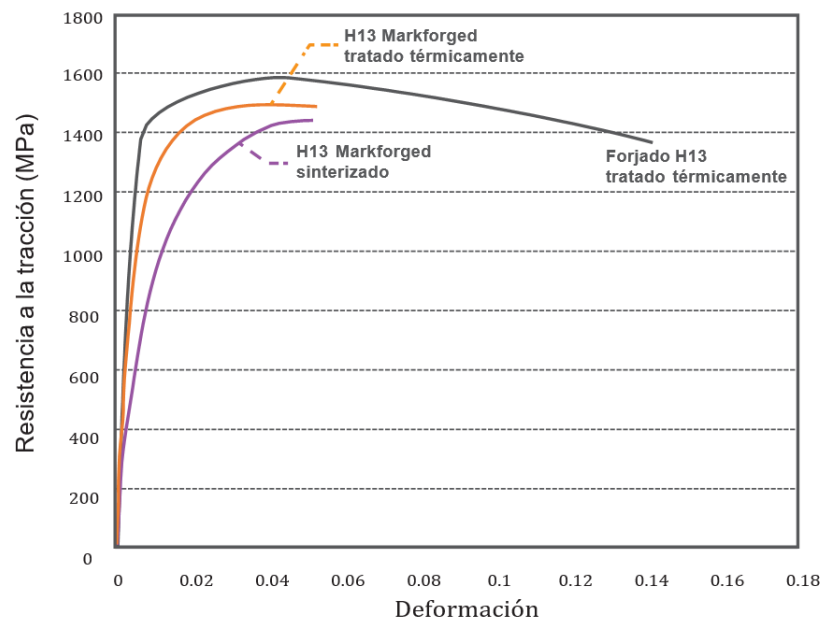


Figura 36. Diagrama resistencia a la tracción-deformación del acero H13 según su procedencia y tratamiento térmico. Fuente: (Markforged Materials, s.f.)

- H13 de Markforged sinterizado

Acero para herramientas H13 impreso en la impresora Metal X, lavado en el sistema Wash-1 y sinterizado en el horno Sinter-1.

- H13 de Markforged tratado térmicamente

Acero para herramientas H13 impreso con el sistema Metal X, templado al aire a 1010°C, y con temple doble a 600°C.

- Forjado H13 tratado térmicamente

Estándar de acero forjado para herramientas H13 del manual *ASM Specialty Handbook* - templado al aire a 1010°C y con temple doble a 600°C.

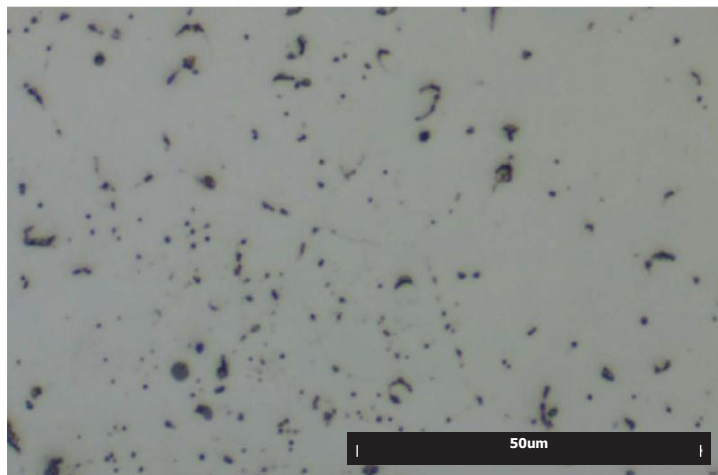


Figura 37. Microestructura del H13 de Markforged sinterizado. Fuente: (Markforged Materials, s.f.)

❖ Propiedades mecánicas

Propiedades mecánicas típicas	Estándar	Markforged sinterizado	Markforged tratado térmicamente	Forjado tratado térmicamente*
Resistencia a la tracción óptima	ASTM E8	1420 MPa	1500 MPa	1580 MPa
Límite de fluencia de 0,2 %	ASTM E8	800 MPa	1250 MPa	1360 MPa
Alargamiento de rotura	ASTM E8	5%	5%	14%
Dureza	ASTM E18	40 HRC	45 HRC	46 HRC
Densidad relativa	ASTM B923	94,50%	94,50%	100%

Tabla 66. Propiedades mecánicas de los distintos aceros H13. Fuente: (Markforged Materials, s.f.)

\* Datos de forjado tratado térmicamente solo incluidos en la tabla. Datos del manual ASM Specialty Handbook: Tool Materials, página 140.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## ANEXO C. HOJAS DE DATOS DE LOS ENSAYOS



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## HOJA DE DATOS

Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	DCMT 11T308-14 IC20	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\alpha$	2	CP

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HCM_C $\alpha$ _P2CP_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R1
--------	--

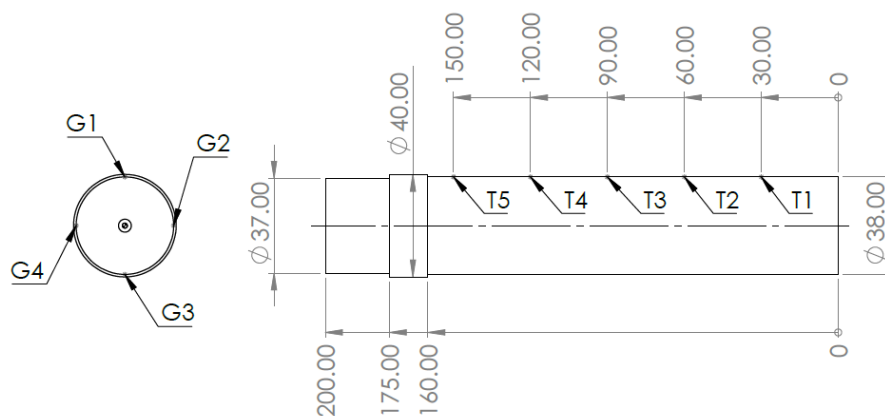
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: desde el inicio se ha generado un gran nido de viruta que se ha arrastrado durante todo el mecanizado.</p> <p>-Probeta: aparentemente buena calidad superficial y uniforme a lo largo de la probeta.</p> <p>-Viruta: durante el mecanizado se produce viruta larga y corta. La larga es inicialmente de tipo helicoidal cónica larga y posteriormente helicoidal enmarañada. La corta es de tipo espiral cónica.</p> <p>-Herramienta: sin daños.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,633	3,543	0,691	3,900
G2	0,490	2,736	0,503	3,128
G3	0,507	2,917	0,585	3,067
G4	0,662	3,314	0,535	2,918

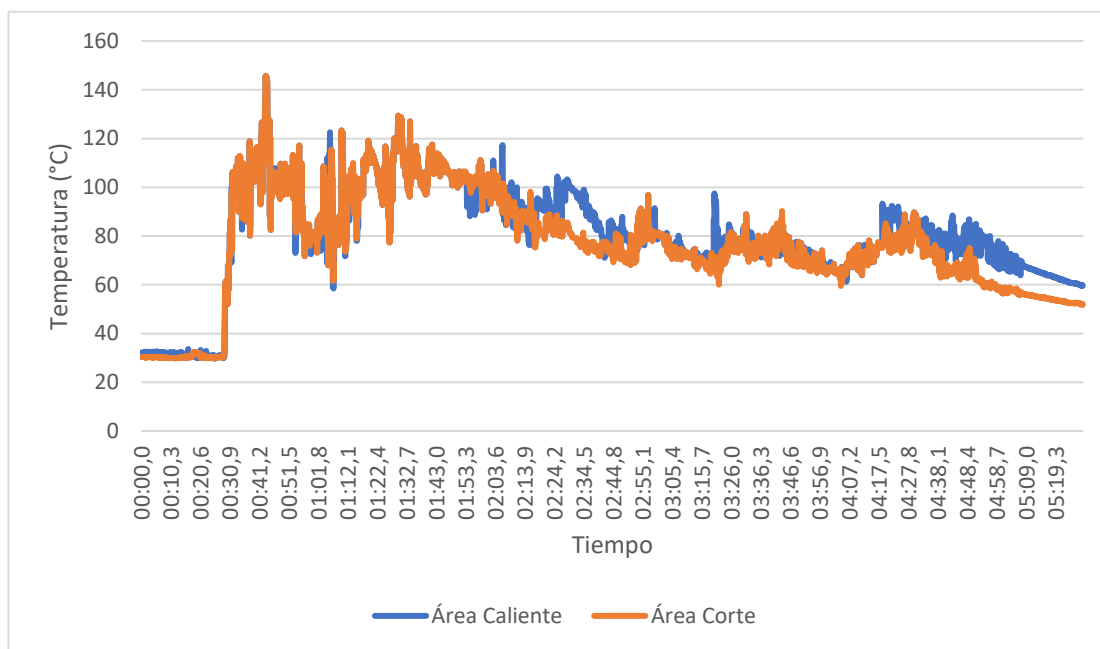
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,696	4,309	0,650	3,779
G2	0,578	3,274	0,489	3,360
G3	0,646	3,678	0,490	3,050
G4	0,561	2,947	0,550	2,986

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,667	3,607
G2	0,554	3,301
G3	0,450	3,167
G4	0,586	3,644

Observaciones	Con los datos obtenidos, se observa valores de rugosidad bajos y constantes a lo largo de toda la probeta.
---------------	--

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones	<p>Los nidos de viruta han dificultado ver con claridad el contacto herramienta-probeta en varios momentos del mecanizado. De ahí que haya tramos donde la temperatura del área caliente sea superior a la del área de corte.</p>
---------------	---

## HOJA DE DATOS



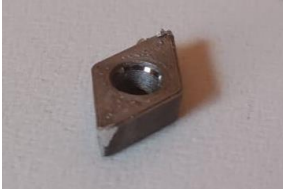
Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	3	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P3CN_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R1
--------	---

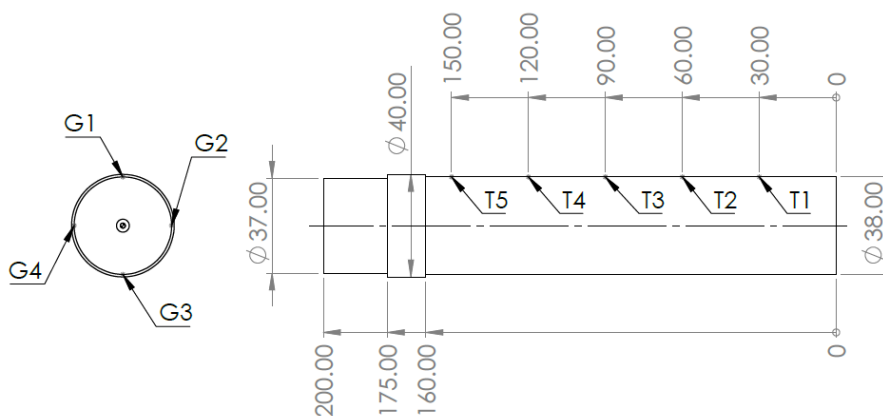
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: desde el inicio se han producido nidos de viruta enmarañada. La viruta se ha enredado en la probeta y en la herramienta.</p> <p>-Probeta: aparentemente se aprecia una superficie un tanto rugosa que aumenta al final de la probeta.</p> <p>-Viruta: de tipo arqueada conectada.</p> <p>-Herramienta: gran aparición de filo recrecido.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,330	7,747	1,357	7,668
G2	1,345	7,488	2,120	12,319
G3	1,466	8,607	1,753	9,483
G4	1,088	6,498	2,120	12,189

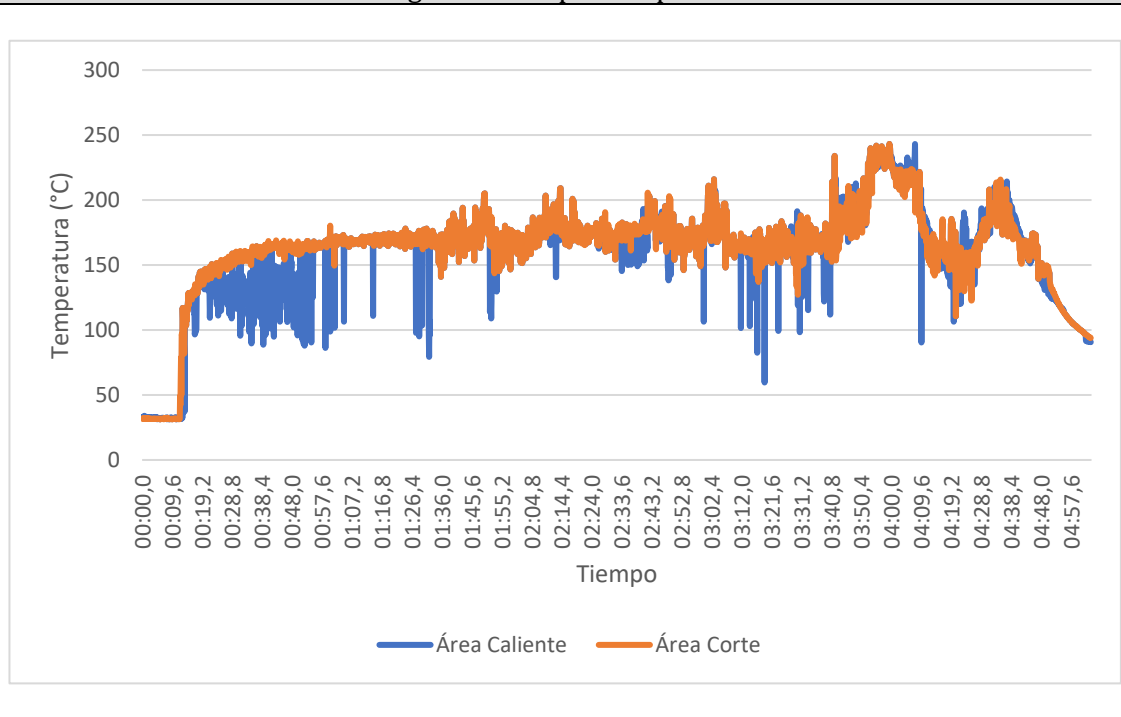
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,338	8,757	1,512	9,375
G2	1,094	6,254	1,578	8,713
G3	2,363	15,312	1,835	9,886
G4	2,092	11,121	1,432	8,403

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,409	14,407
G2	2,388	14,432
G3	2,374	12,970
G4	2,315	13,000

Observaciones	Con los datos obtenidos se confirma que la rugosidad en el tramo final aumenta considerablemente.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones	Al inicio se produce tanta diferencia entre el área caliente y el área de corte debido a que el área caliente está dando saltos de la zona de corte a la zona donde se acumula la viruta.
---------------	---

## HOJA DE DATOS

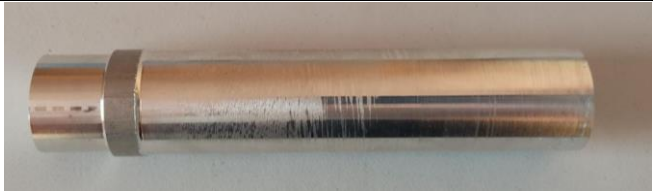


Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	3	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P3SN_VC45,24_VA0,1_P1_MS_R2
--------	---

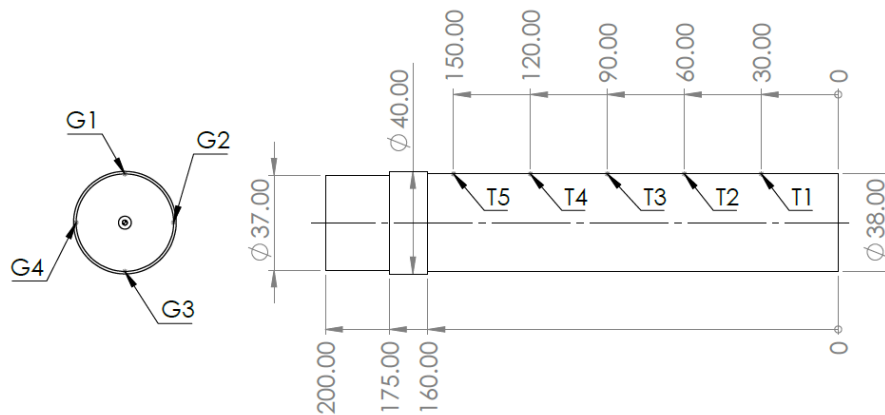
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se ha producido viruta continua que se iba acumulando delante de la herramienta y finalmente se ha enredado en la probeta y la herramienta.</p> <p>-Probeta: se aprecia un buen acabado superficial al inicio de la probeta que empeora al final.</p> <p>-Viruta: de tipo arqueada conectada que se enmaraña.</p> <p>-Herramienta: gran aparición de filo recrecido.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,640	3,696	1,961	12,411
G2	0,662	4,040	0,791	4,863
G3	1,073	5,812	1,344	7,967
G4	0,777	4,419	1,549	10,742

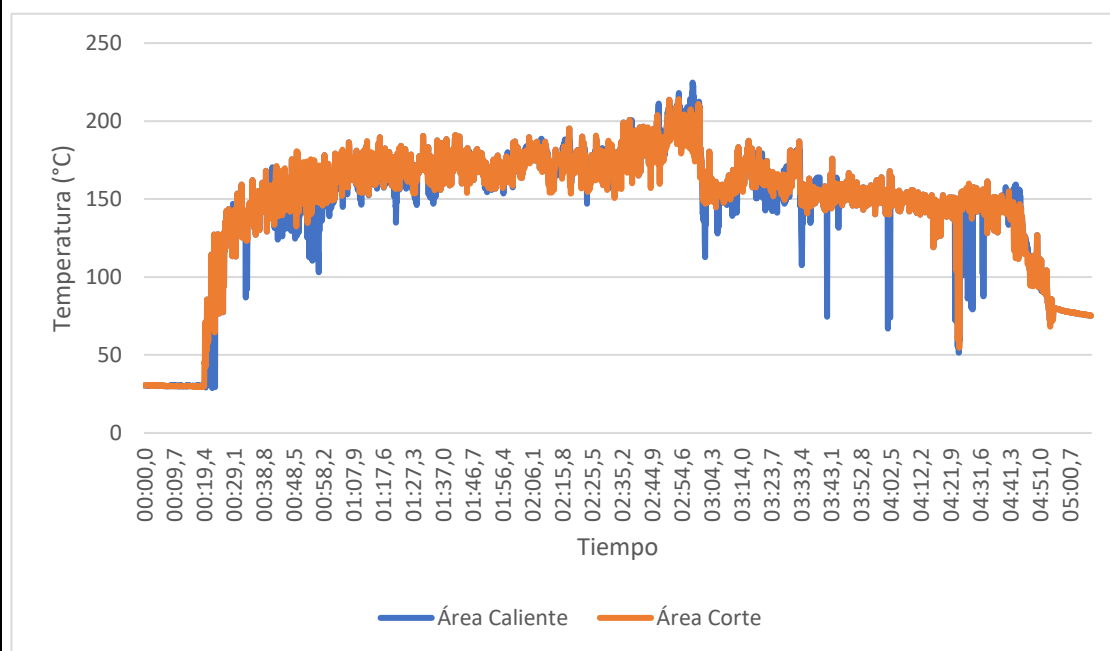
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,854	15,992	1,327	9,285
G2	1,117	7,006	2,766	15,154
G3	2,527	13,743	2,450	14,410
G4	3,178	16,465	3,232	16,947

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,725	10,446
G2	1,613	11,267
G3	1,311	8,840
G4	3,177	16,301

Observaciones	Los datos muestran que la rugosidad al inicio es relativamente baja, pero a partir del tramo 3 comienza a aumentar.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

## HOJA DE DATOS

Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	DCMT 11T308-14 IC20	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	4	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P4CN_VC45,24_VA0,1_P1_ML_R1
--------	---

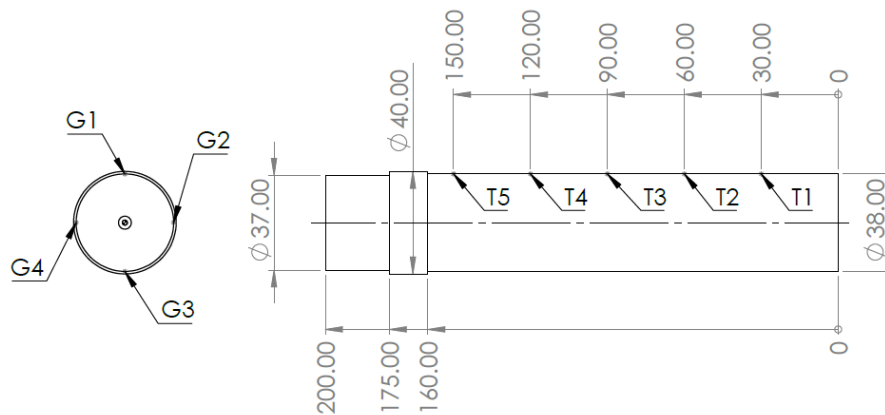
Fluido de corte	Taladrina blanca plus
-----------------	-----------------------

Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se han producido nidos de viruta que han golpeado el sistema de lubricación. Se ha acumulado viruta en la herramienta en forma de grandes nidos.</p> <p>-Probeta: al principio de a probeta se observa una zona donde la profundidad del mecanizado es mayor, quedando una forma similar a un valle.</p> <p>-Viruta: de tipo plana corta y plana enmarañada. Aparentemente la viruta parece frágil.</p> <p>-Herramienta: pequeña deformación plástica en la punta y aparición de filo recrecido.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,151	6,768	1,505	9,439
G2	1,283	7,577	1,217	7,139
G3	1,349	7,499	1,657	10,482
G4	1,223	7,554	1,451	9,509

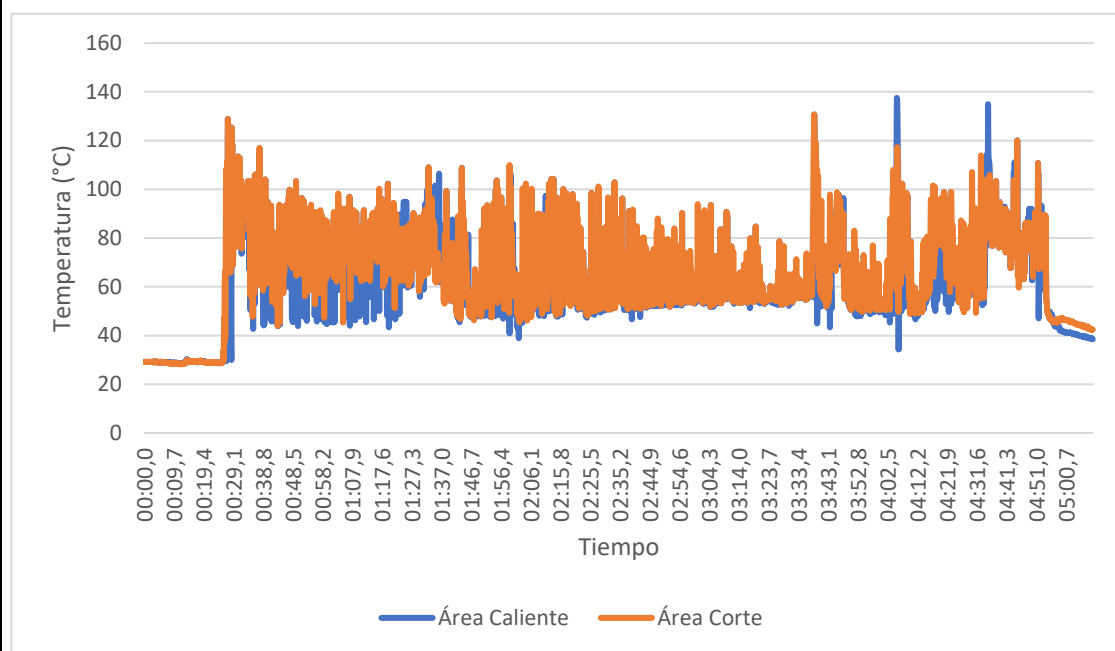
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,863	10,380	2,184	10,980
G2	2,377	11,759	2,374	12,224
G3	2,054	11,082	3,035	15,043
G4	2,049	10,995	2,342	13,100

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,882	16,847
G2	2,898	16,783
G3	2,701	15,508
G4	2,818	16,822

Observaciones	Desde el inicio se observa que los datos indican que la rugosidad es algo elevada y que a partir del tramo 3 aumenta.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

## HOJA DE DATOS




Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	DCMT 11T308-14 IC20	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	4	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P4SN_VC45,24_VA0,1_P1_ML_R2
--------	---

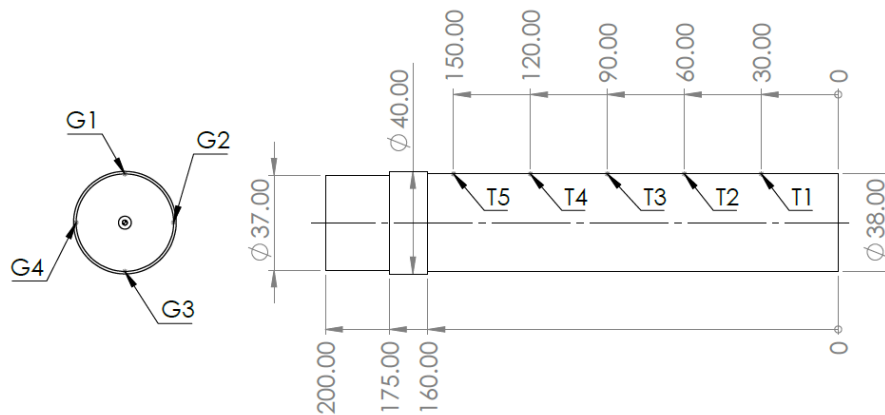
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	Taladrina blanca plus
-----------------	-----------------------

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: al final del mecanizado se produjo una falla en la herramienta.</p> <p>-Probeta: aparenta buen acabado superficial hasta la zona donde se produjo el fallo de la herramienta.</p> <p>-Viruta: primero de tipo plana larga y posteriormente arqueada conectada.</p> <p>-Herramienta: gran deformación plástica en la punta.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,541	12,927	1,184	10,058
G2	2,117	11,411	2,313	12,848
G3	1,908	10,610	3,219	16,065
G4	2,507	13,523	2,133	12,686

	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,274	12,363	2,839	15,121
G2	2,168	12,113	2,456	13,246
G3	2,351	11,885	3,680	17,405
G4	2,026	10,085	2,026	10,085

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,709	4,830
G2	0,782	5,093
G3	1,069	5,882
G4	0,931	5,139

Observaciones	Los cuatro primeros tramos pertenecen al mecanizado antes de fallar la plaquita de corte, por lo que el último no hay que tenerlo en cuenta. Bajo estas condiciones se obtiene una rugosidad no excesivamente alta.
---------------	---



Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura

Observaciones

El archivo de la grabación con la cámara térmica ha resultado dañado por lo que este ensayo se repetirá para subsanar dicho error.

## HOJA DE DATOS

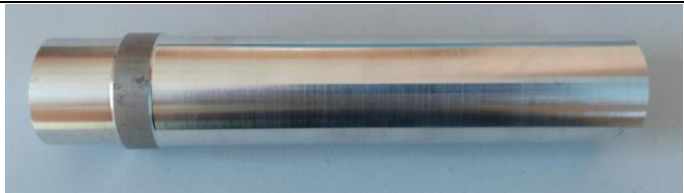

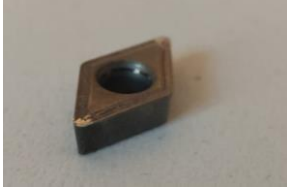
Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	DCMT 11T308-14 IC20	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\alpha$	2	SP

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HCM_C $\alpha$ _P2SP_VC54,03_VA0,1_P1_MS_R1
--------	--

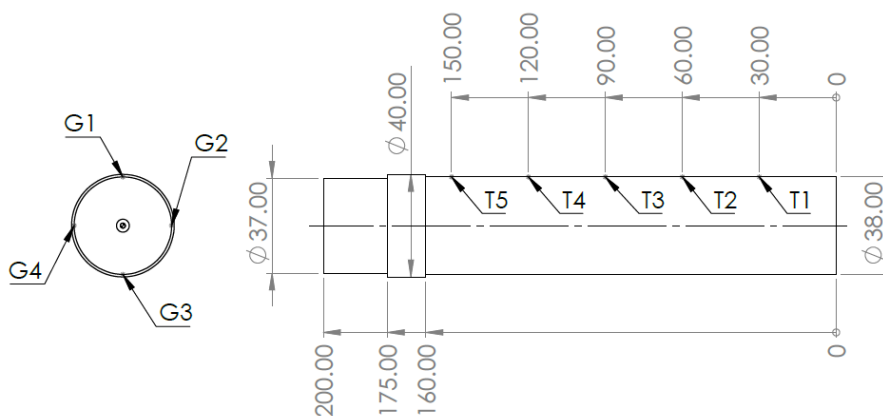
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se han generado grandes nidos de viruta desde inicio que se han ido arrastrando durante todo el mecanizado. Aunque en ocasiones se desplazaban a la zona de recogida de viruta del torno. Al final se ha golpeado la viruta en el plato.</p> <p>-Probeta: buen acabado superficial aparentemente.</p> <p>-Viruta: de tipo tubular enmarañada.</p> <p>-Herramienta: pequeña aparición de filo recrecido.</p>
---------------	---

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,737	4,498	0,738	3,736
G2	0,731	3,993	0,653	3,694
G3	0,791	4,316	0,710	3,772
G4	0,636	5,528	0,669	4,029

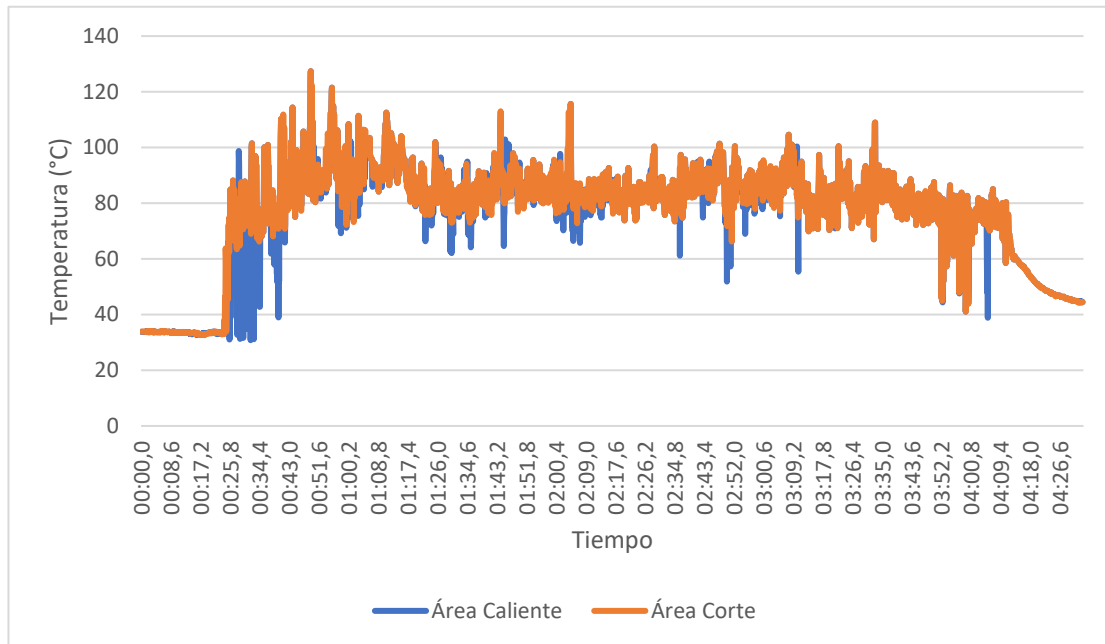
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,613	3,618	0,731	4,570
G2	0,599	3,394	0,716	4,474
G3	0,605	3,664	0,731	4,152
G4	0,675	3,813	0,695	4,015

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,738	4,598
G2	0,762	4,297
G3	0,740	3,871
G4	0,753	4,308

Observaciones	Los datos de rugosidad confirman lo que se podía prever a simple vista. Todos los tramos poseen una rugosidad bastante baja.
---------------	--

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

## HOJA DE DATOS

Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	DCMT 11T308-14 IC20	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	5	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P5CN_VC54,03_VA0,1_P1_MS_R1
--------	---

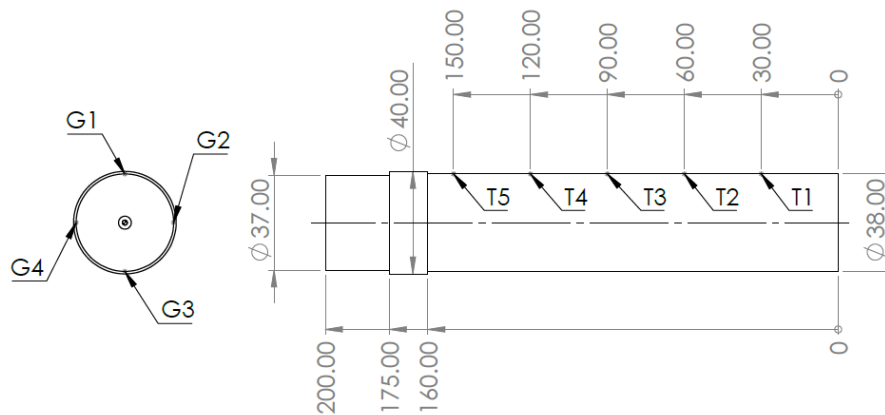
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,01
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: la viruta continua ha ido produciendo nidos. Estos finalmente han chocado con el plato.</p> <p>-Probeta: un corto tramo inicial presenta un acabado muy malo y luego calidad superficial más o menos constante a lo largo de la probeta.</p> <p>-Viruta: de tipo arqueada conectada.</p> <p>-Herramienta: aparición de filo recrecido.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,861	4,993	1,236	8,566
G2	0,687	3,843	1,077	5,580
G3	0,675	3,924	1,112	6,631
G4	0,625	3,965	1,001	5,764

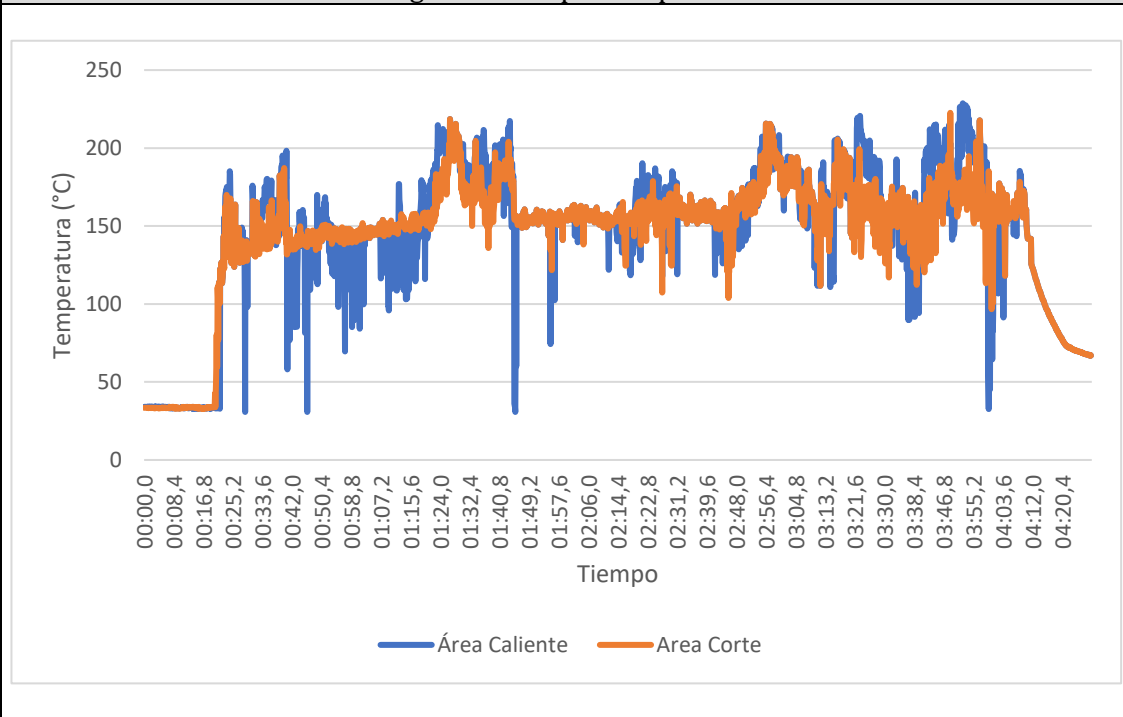
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,051	7,104	1,103	7,122
G2	0,812	5,218	1,197	8,429
G3	1,022	7,273	1,288	8,085
G4	1,308	10,135	0,917	5,425

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,297	8,906
G2	1,706	11,874
G3	1,294	9,567
G4	1,146	7,194

Observaciones	Los valores de rugosidad comienzan bajos, pero dan un salto en el tramo 2 y ahí se mantienen más o menos constantes.
---------------	--

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

El área caliente se sale del área de corte en busca de puntos alientes en la viruta.

## HOJA DE DATOS




Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	5	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P5SN_VC54,03_VA0,1_P1_MS_R2
--------	---

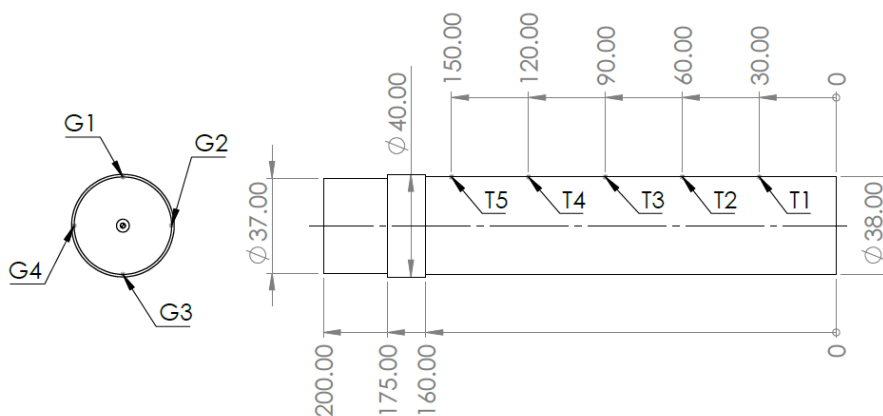
Fluido de corte	No
-----------------	----

Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se ha producido un nido de viruta rápidamente.</p> <p>-Probeta: se aprecia que la calidad superficial es buena al inicio, pero empeora al final de la probeta.</p> <p>-Viruta: de tipo plana larga al inicio pero que rápidamente se enmaraña en forma de zigzag.</p> <p>-Herramienta: aparición de filo recrecido.</p>
---------------	---

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,019	5,303	0,866	5,954
G2	1,176	8,720	2,013	11,136
G3	1,056	5,782	1,063	7,423
G4	0,982	5,200	0,782	4,182

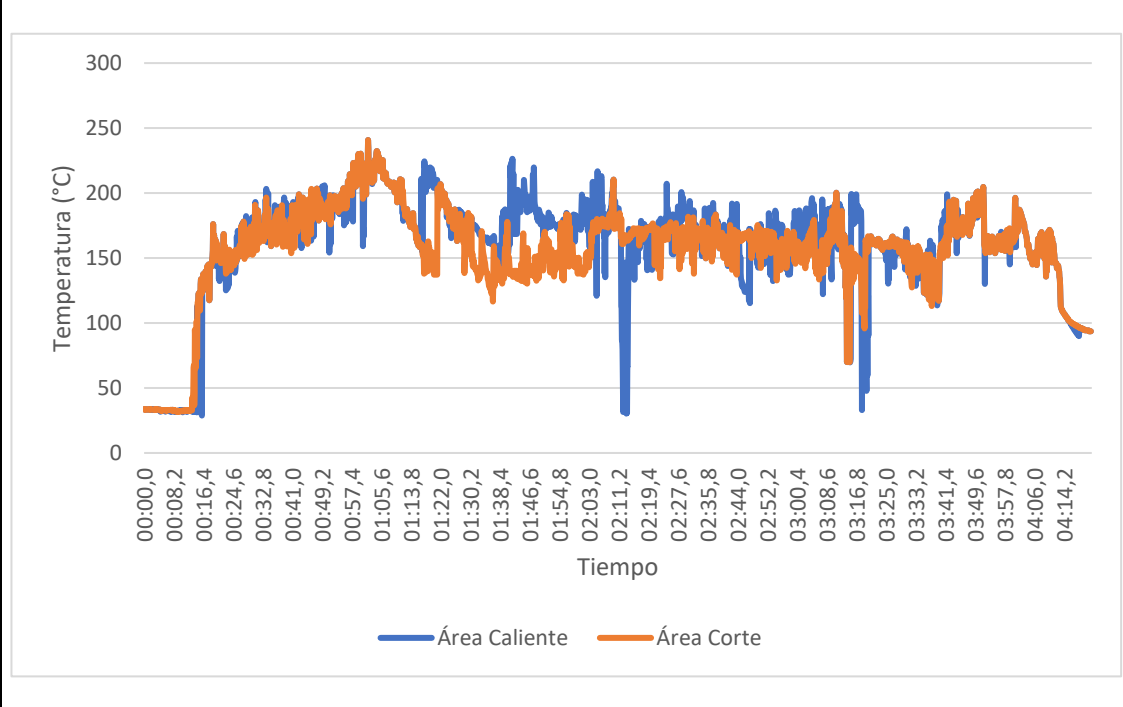
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,741	10,645	1,112	6,610
G2	2,016	12,845	0,893	4,747
G3	1,024	5,527	0,948	5,721
G4	1,322	7,593	1,001	6,243

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,518	9,018
G2	2,229	12,995
G3	1,286	8,556
G4	2,358	16,312

Observaciones	Valores más o menos constantes a lo largo de toda la probeta.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones	El nido de viruta ha dificultado en muchas partes del mecanizado ver la zona de contacto herramienta-probeta. De ahí que el área caliente sobrepase en muchas ocasiones al área de corte.
---------------	---

## HOJA DE DATOS

Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	6	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P6CN_VC54,03_VA0,1_P1_ML_R1
--------	---

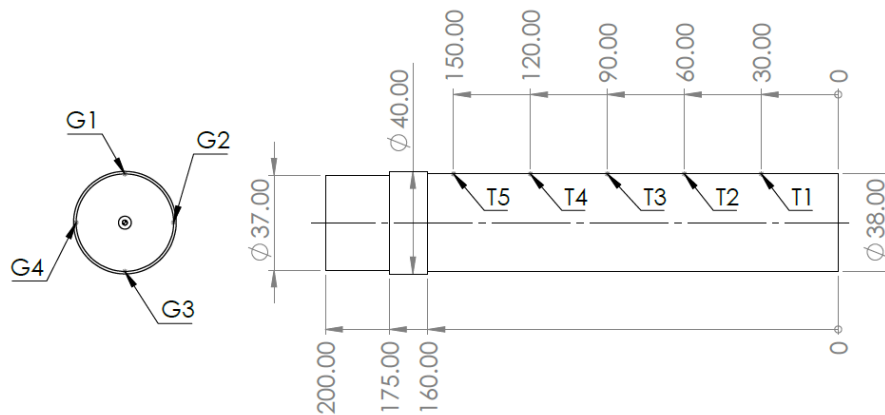
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	Taladrina blanca plus
-----------------	-----------------------

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se han producido grandes nidos de viruta enmarañada que en ocasiones han golpeado a la boquilla del sistema de lubricación.</p> <p>-Probeta: se ha quedado sucia tras el mecanizado.</p> <p>-Viruta: de tipo arqueada conectada.</p> <p>-Herramienta: aparición de filo recrecido.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,781	9,799	3,042	15,639
G2	1,788	9,729	2,829	14,477
G3	1,648	8,595	2,696	13,944
G4	2,021	10,881	1,821	9,615

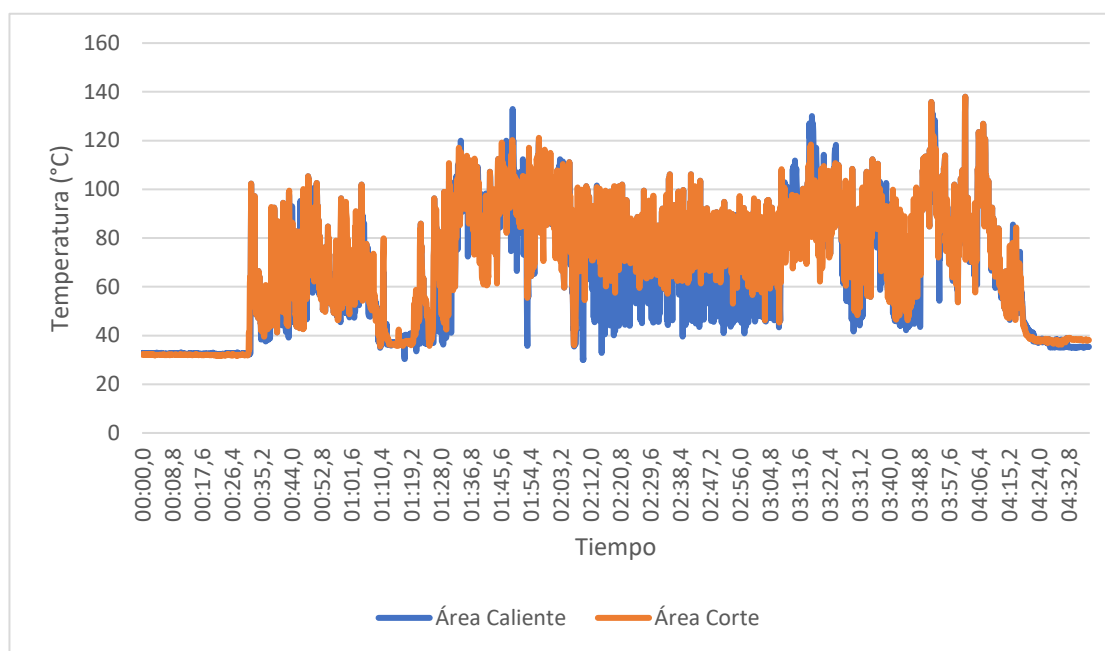
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	3,309	17,534	2,861	14,670
G2	2,592	14,582	3,077	16,702
G3	2,512	11,889	2,902	14,680
G4	2,494	15,905	2,975	17,042

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	3,202	16,518
G2	3,126	16,402
G3	2,721	12,778
G4	2,398	11,374

Observaciones	Los valores dan un salto en el tramo 2 y se mantienen más o menos constantes durante el resto de tramos.
---------------	--

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

## HOJA DE DATOS



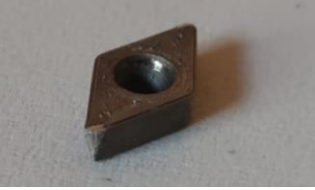
Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	6	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P6SN_VC54,03_VA0,1_P1_ML_R2
--------	---

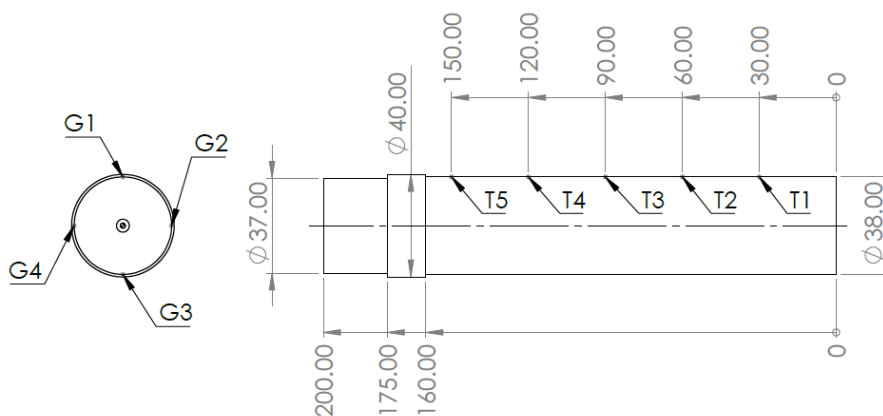
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	Taladrina blanca plus
-----------------	-----------------------

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: ninguna anomalía durante el mecanizado.</p> <p>-Probeta: el tramo inicial aparenta baja calidad superficial, mejora en el tramo central y en el final empeora notablemente.</p> <p>-Viruta: de tipo helicoidal larga y helicoidal corta. Viruta frágil.</p> <p>-Herramienta: aparición de filo recrecido.</p>
---------------	---

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,268	10,663	2,036	10,618
G2	2,233	11,885	2,055	10,154
G3	2,533	11,202	2,221	10,937
G4	2,843	13,402	1,966	10,819

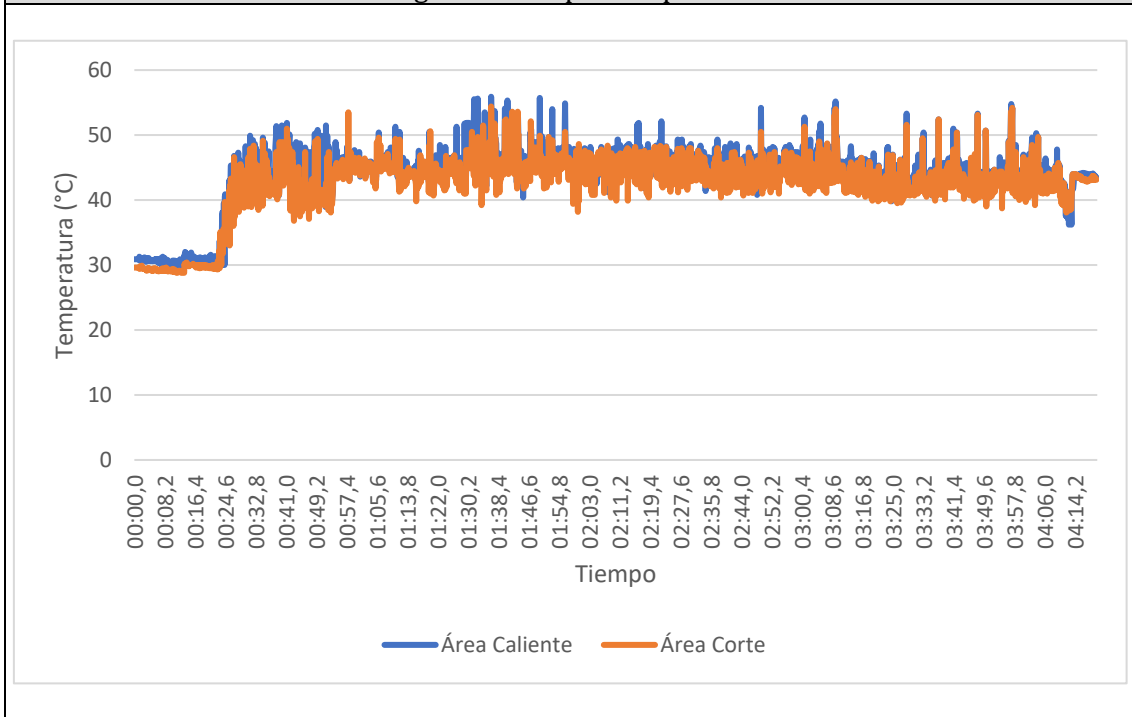
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,298	7,774	3,542	18,807
G2	1,398	7,343	3,339	17,681
G3	1,135	6,626	3,347	18,292
G4	1,266	7,798	3,821	23,081

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	3,306	16,672
G2	3,407	17,535
G3	3,950	19,824
G4	3,152	15,471

Observaciones	Valores de rugosidad algo altos y parejos en los dos primeros tramos, en el tercero disminuyen y en el cuarto aumentan bastante hasta el final.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones	El área caliente se ha situado sobre la taladrina que envolvía la probeta y que había pasado por la zona de corte.
---------------	--

## HOJA DE DATOS



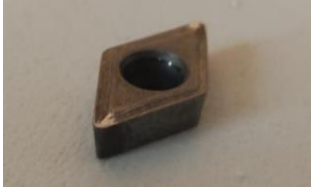
Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	DCMT 11T308-14 IC20	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\alpha$	3	CP

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HCM_C $\alpha$ _P3CP_VC45,24_VA0,15_P1_MS_R1
--------	---

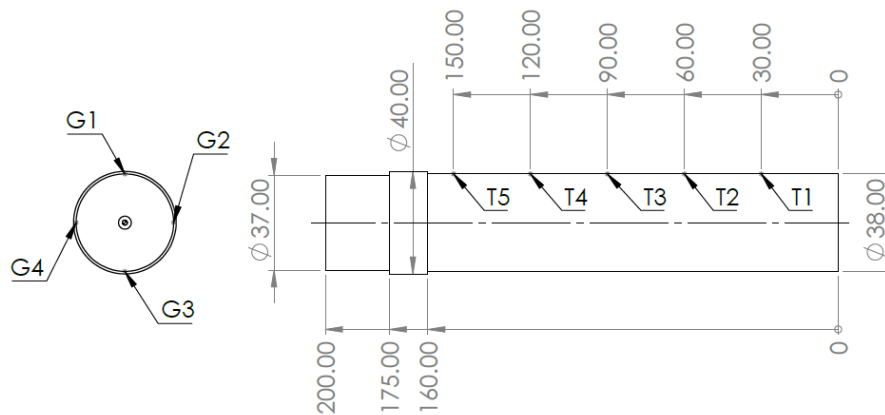
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se ha producido al inicio una viruta tubular que rápidamente se ha enmarañado formando un gran nido que ha sido arrastrado durante todo el mecanizado. Al final se ha golpeado en el plato del torno.</p> <p>-Probeta: aparenta buena calidad superficial a lo largo de toda la probeta.</p> <p>-Viruta: primero de tipo tubular larga y después tubular enmarañada.</p> <p>-Herramienta: muy buen estado salvo pequeña aparición de filo recrecido.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,423	9,134	1,438	8,923
G2	1,407	8,676	1,422	8,932
G3	1,455	8,998	1,544	9,610
G4	1,341	8,350	0,947	5,166

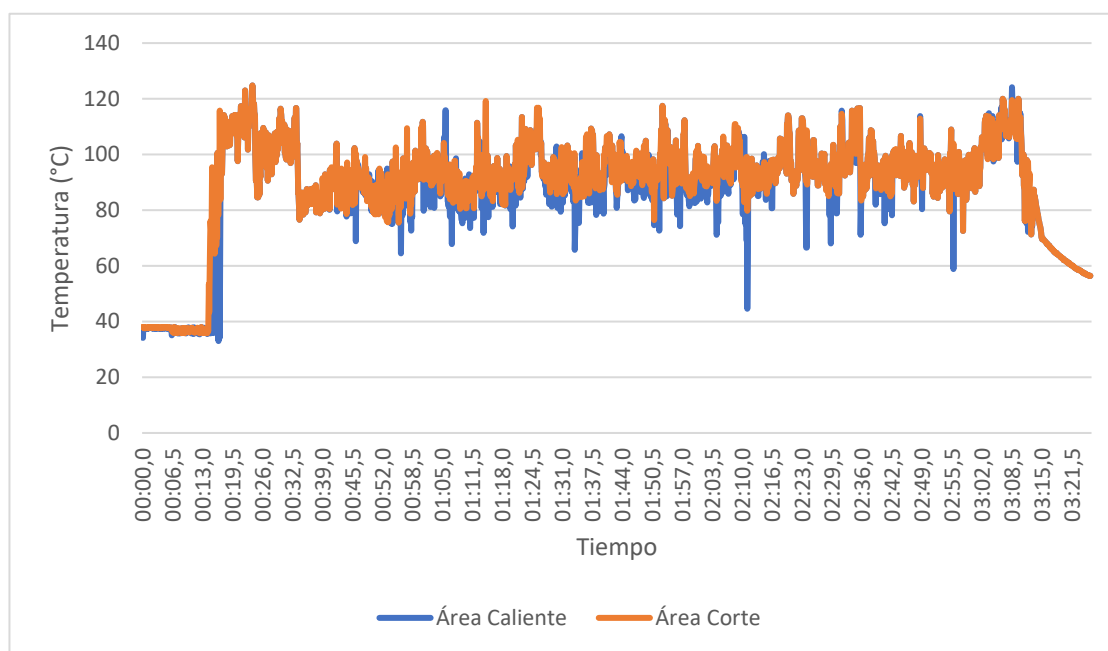
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,932	5,366	0,745	4,564
G2	0,829	4,904	0,821	5,118
G3	0,834	5,104	0,710	4,301
G4	0,839	5,104	0,796	4,811

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,716	4,546
G2	0,747	4,743
G3	0,798	4,553
G4	0,623	3,584

Observaciones	Con los datos se observa que la rugosidad ha ido disminuyendo a lo largo de la probeta.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

## HOJA DE DATOS



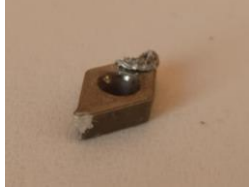
Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	7	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P7CN_VC45,24_VA0,15_P1_MS_R1
--------	--

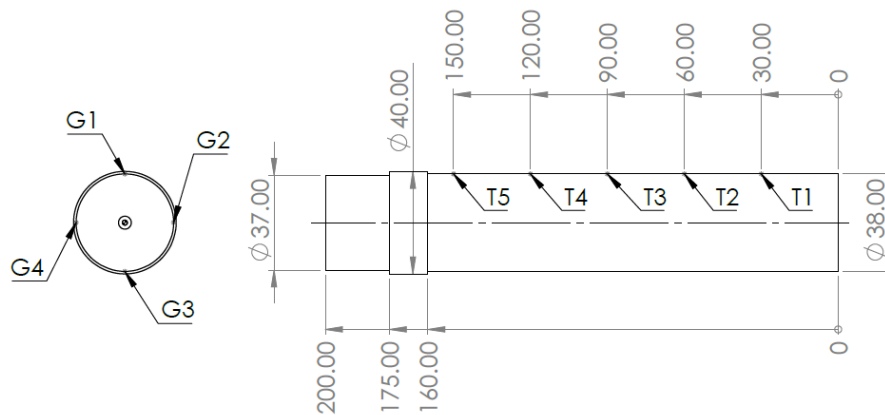
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se ha formado un gran nido de viruta que se ha ido arrastrando durante todo el mecanizado.</p> <p>-Probeta: aparentemente buena calidad superficial, pero que disminuye al final.</p> <p>-Viruta: al inicio de tipo plana tubular y posteriormente tubular enmarañada.</p> <p>-Herramienta: ligera deformación plástica en la punta.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,382	11,687	1,587	8,413
G2	2,147	12,414	1,823	9,442
G3	2,141	11,550	1,517	7,954
G4	2,190	11,226	1,450	8,590

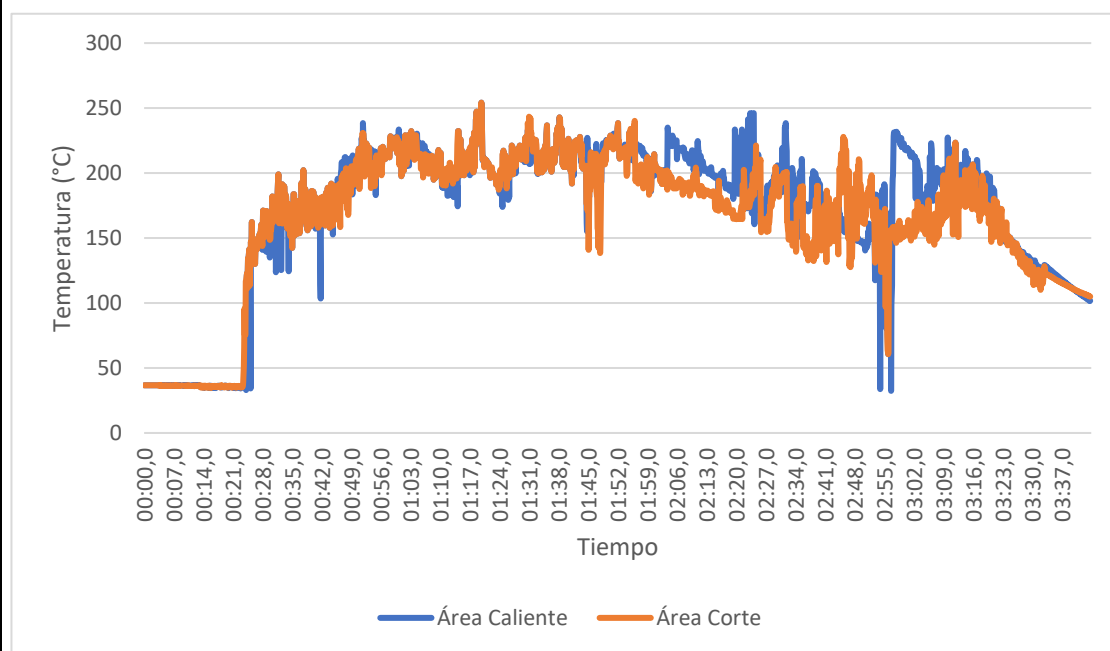
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,069	11,188	2,942	15,590
G2	1,746	9,556	3,666	22,255
G3	1,872	10,077	2,835	15,987
G4	2,047	10,199	2,759	16,112

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	4,812	20,277
G2	5,633	26,449
G3	5,004	20,280
G4	4,673	19,013

Observaciones	Valores de rugosidad altos y con saltos de unos tramos con otros.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

El nido de viruta ha entorpecido la toma de datos de temperatura en el área de corte a partir de la mitad del mecanizado más o menos.

## HOJA DE DATOS




Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	7	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P7SN_VC45,24_VA0,15_P1_MS_R2
--------	--

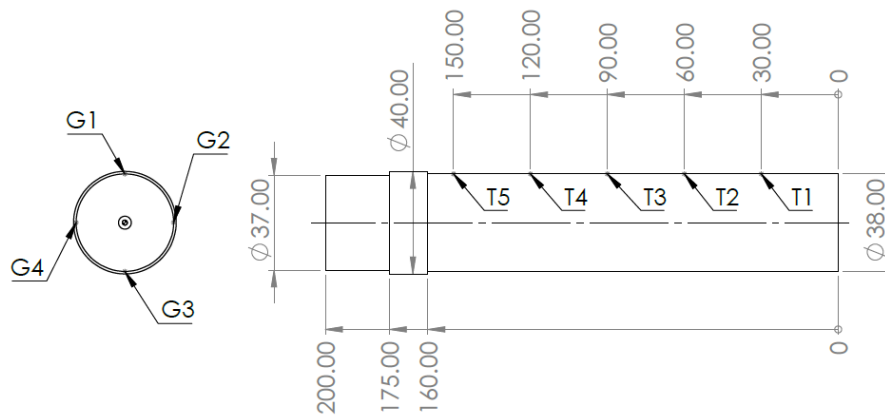
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se ha producido un nido de viruta delante de la herramienta.</p> <p>-Probeta: superficie aparentemente algo rugosa pero uniforme a lo largo de toda la probeta.</p> <p>-Viruta: de tipo arqueada conectada.</p> <p>-Herramienta: gran aparición de filo recrecido.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,827	15,582	1,456	8,266
G2	2,480	12,991	1,681	8,809
G3	1,924	10,153	1,899	10,462
G4	3,065	15,251	2,820	15,374

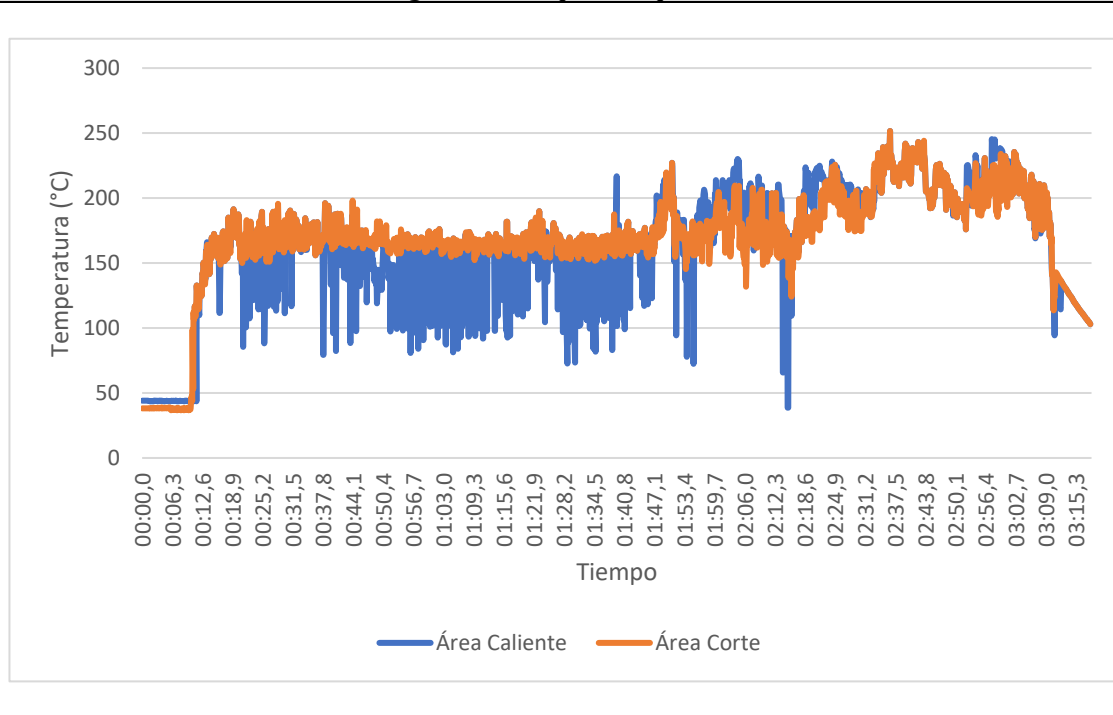
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,596	8,887	2,263	13,089
G2	2,330	14,487	1,937	12,324
G3	2,495	13,165	1,696	12,332
G4	2,496	15,390	2,261	14,424

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,651	11,203
G2	1,554	8,315
G3	2,125	14,561
G4	2,070	14,345

Observaciones	Valores desiguales dentro de un mismo tramo y distintas generatrices.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones



### HOJA DE DATOS

Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	8	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P8CN_VC45,24_VA0,15_P1_ML_R1
--------	--

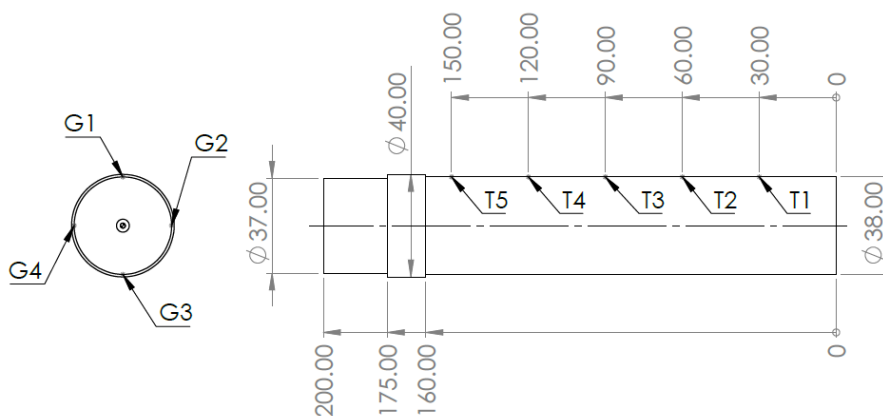
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	Taladrina blanca plus
-----------------	-----------------------

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	Por un error humano se inició el mecanizado sin encender la bomba de la taladrina, por lo que este ensayo deberá de repetirse.
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1				
G2				
G3				
G4				

	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1				
G2				
G3				
G4				

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1		
G2		
G3		
G4		

Observaciones	
---------------	--



Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura

Observaciones

## HOJA DE DATOS




Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	DCMT 11T308-14 IC20	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	8	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P8SN_VC45,24_VA0,15_P1_ML_R2
--------	--

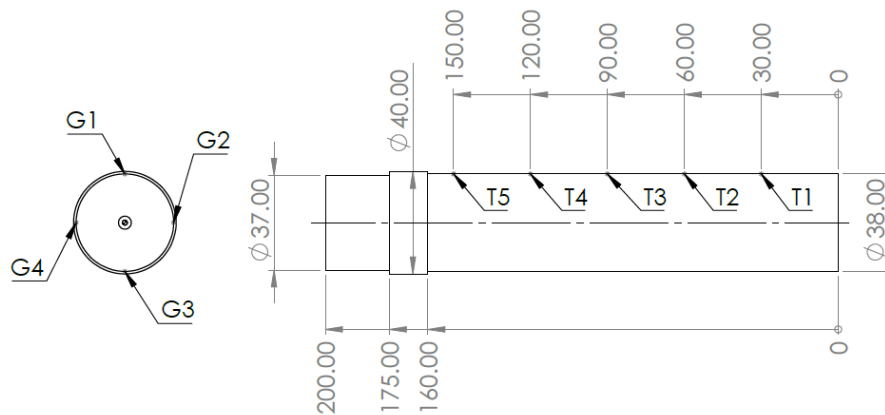
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	Taladrina blanca plus
-----------------	-----------------------

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: aproximadamente a la mitad del mecanizado se produjo la rotura de la herramienta.</p> <p>-Probeta: superficie muy rugosa hasta la rotura de la herramienta.</p> <p>-Viruta: de tipo arqueada conectada.</p> <p>-Herramienta: punta totalmente deformada.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	3,036	14,993	3,601	18,409
G2	3,961	21,686	3,611	19,39
G3	3,346	16,561	3,631	17,701
G4	3,267	16,403	2,631	13,467

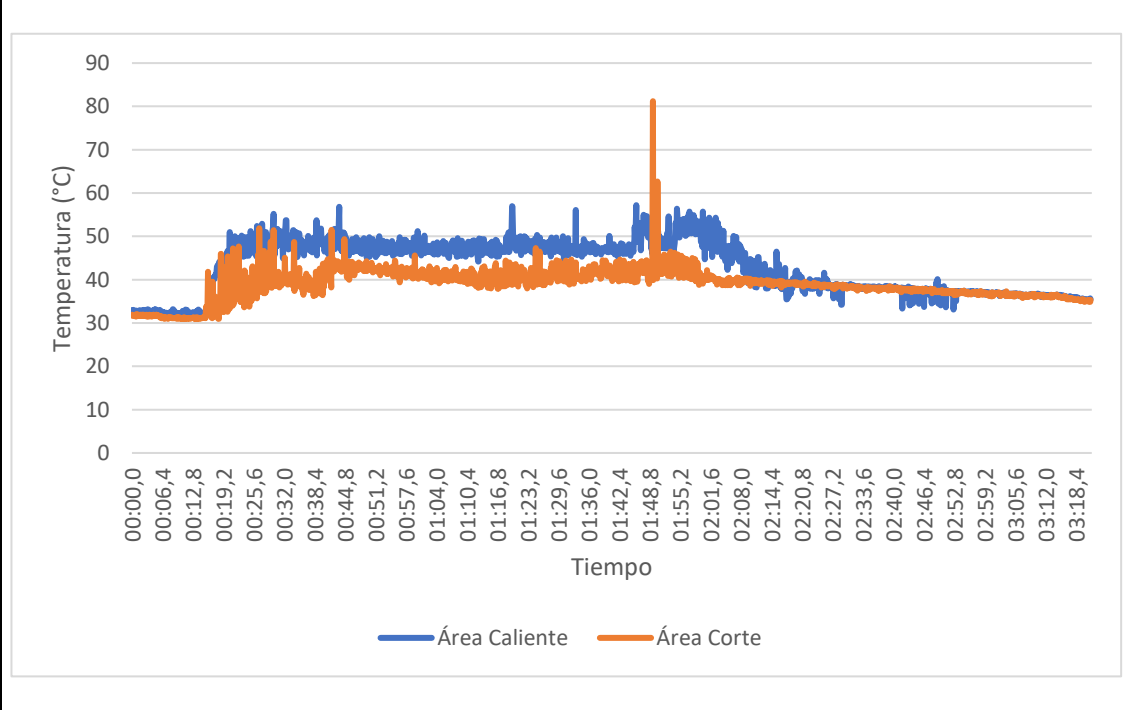
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	3,448	17,691		
G2	2,962	16,798		
G3	3,353	16,263		
G4	3,392	20,154		

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1		
G2		
G3		
G4		

Observaciones	A partir del tramo 4 se dejan de tomar valores de rugosidad puesto que la zona que le sigue está sin mecanizar por la falla de la herramienta.
---------------	--

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

La falla de la herramienta se aprecia en el diagrama ya que se registra una caída del valor de la temperatura tanto en el área de corte como en el área caliente.

## HOJA DE DATOS

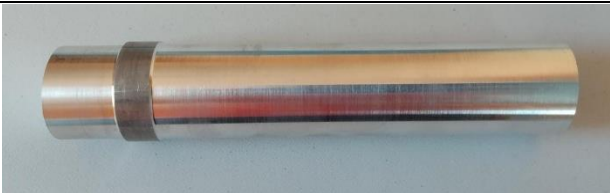

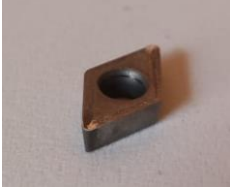
Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	DCMT 11T308-14 IC20	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\alpha$	3	SP

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HCM_C $\alpha$ _P3SP_VC54,03_VA0,15_P1_MS_R1
--------	---

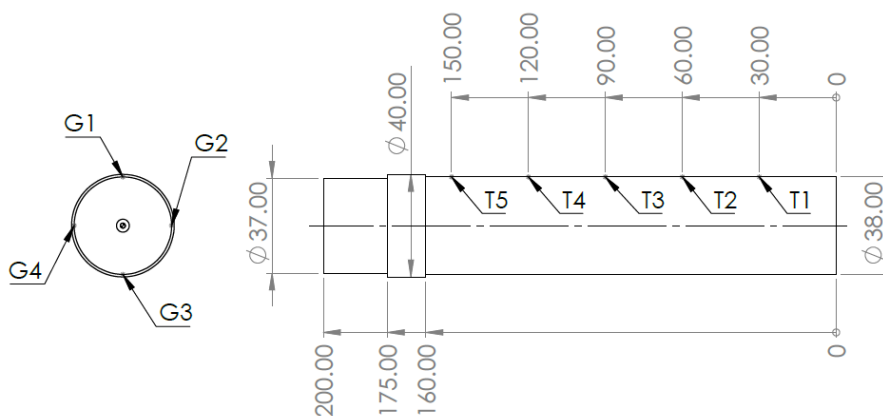
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: viruta enmarañada desde el inicio acumulada en un gran nido, al final se rompe debido a los golpes con los elementos del torno.</p> <p>-Probeta: buen acabado superficial aparentemente.</p> <p>-Viruta: de tipo tubular enmarañada.</p> <p>-Herramienta: ningún daño salvo los arañazos en el filo de corte.</p>
---------------	---

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,953	5,503	0,993	5,318
G2	0,898	5,098	1,018	5,447
G3	1,052	5,597	0,930	5,207
G4	0,869	5,019	0,932	5,134

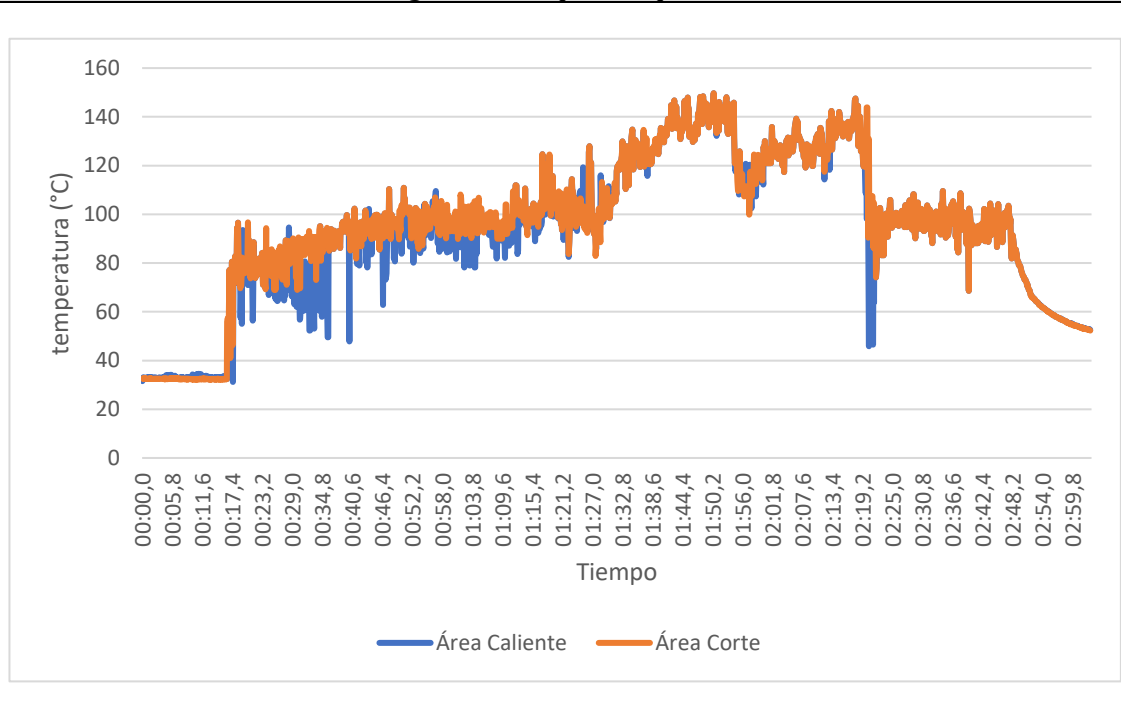
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,004	5,392	0,918	5,132
G2	1,020	5,556	0,987	5,650
G3	0,966	5,310	1,032	5,374
G4	0,894	5,620	0,915	4,875

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	0,985	5,848
G2	1,020	5,642
G3	1,036	5,427
G4	1,029	5,677

Observaciones	Valores relativamente bajos y constantes a lo largo de toda la probeta.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones	El diagrama muestra como afectan los nidos de viruta a la temperatura.
---------------	--

## HOJA DE DATOS

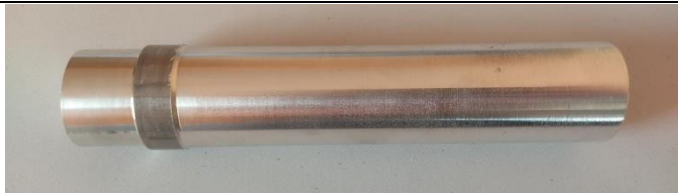


Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	1B	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P1BCN_VC54,03_VA0,15_P1_MS_R1
--------	---

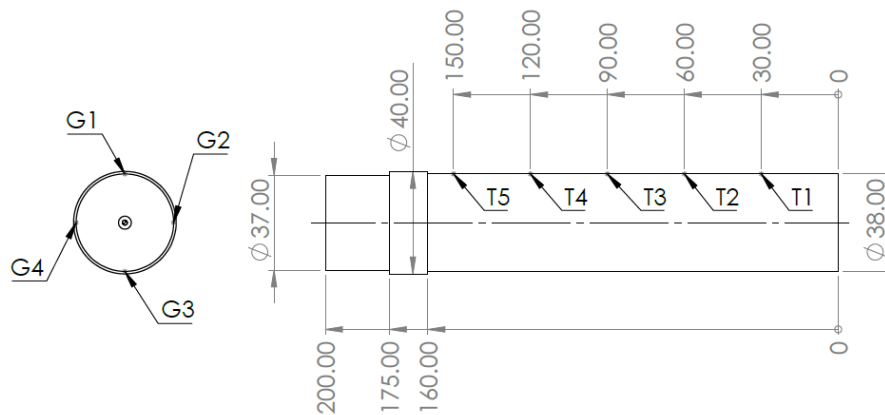
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: se produce una viruta continua que hasta casi al final se dirige a la zona de recogida de viruta del torno pero al final acaba enredándose en la probeta y la herramienta.</p> <p>-Probeta: aparentemente buena calidad superficial, que va disminuyendo ligeramente a lo largo de la probeta.</p> <p>-Viruta: inicialmente de tipo plana enmarañada y posteriormente arqueadas conectadas.</p> <p>-Herramienta: presenta deformación plástica en la punta.</p>
---------------	---

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,494	16,154	1,853	10,064
G2	1,956	13,962	1,759	10,965
G3	1,424	9,568	1,570	9,677
G4	1,136	7,799	1,597	9,646

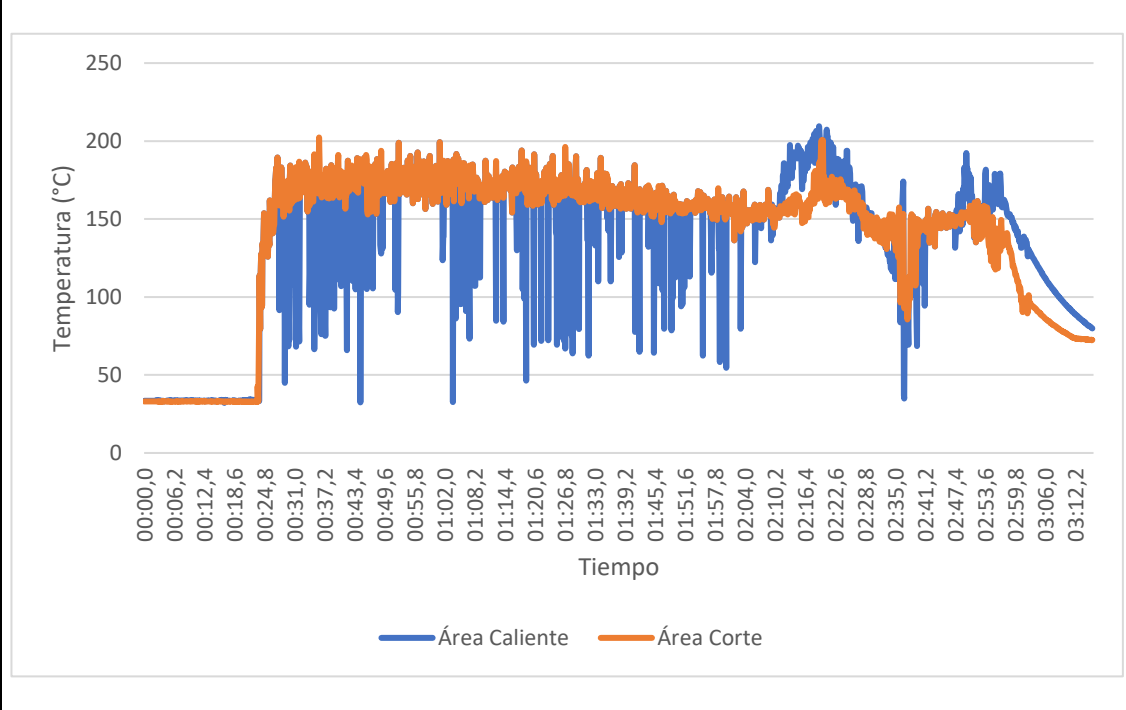
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,505	16,094	2,001	14,457
G2	1,861	11,838	1,834	12,935
G3	1,973	12,956	1,855	12,946
G4	1,973	12,956	1,575	10,107

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,185	15,335
G2	2,478	15,279
G3	2,467	14,880
G4	2,502	16,512

Observaciones	En el tramo 1 destaca la irregularidad de la rugosidad superficial dependiendo de la generatriz. Por otro lado, se observa que a partir del tramo 5 la calidad superficial comienza a caer.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

## HOJA DE DATOS




Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	1B	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P1BSN_VC54,03_VA0,15_P1_MS_R2
--------	---

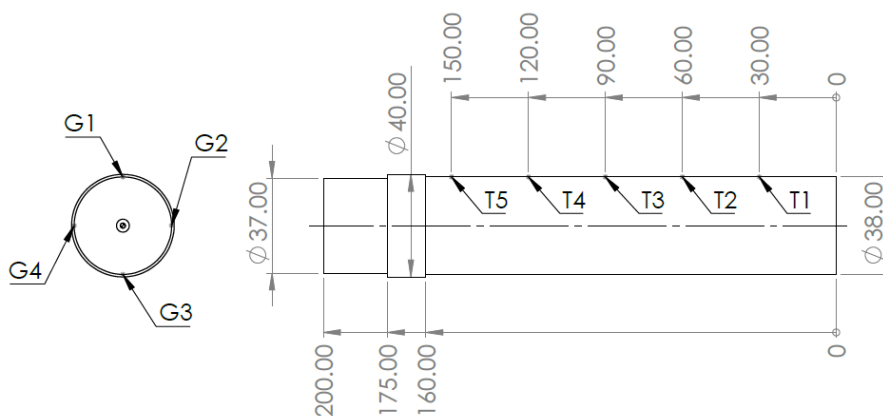
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: ninguna anomalía durante el mecanizado.</p> <p>-Probeta: presenta un salto pequeño de diámetro y de calidad superficial al paso del primer tramo con respecto al resto de la probeta.</p> <p>-Viruta: de tipo arqueada conectada.</p> <p>-Herramienta: gran aparición de filo recrecido.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,550	13,295	2,738	13,781
G2	3,010	13,583	2,873	14,713
G3	3,071	14,263	2,728	14,611
G4	3,158	17,059	2,089	11,983

	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,595	14,365	1,514	8,956
G2	2,440	14,612	1,713	10,437
G3	2,099	15,087	1,689	9,841
G4	1,982	11,886	1,647	10,931

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,213	15,955
G2	1,964	13,046
G3	1,874	13,961
G4	1,776	11,301

Observaciones	Los valores son altos en los tres primeros tramos y en los dos siguientes disminuyen.
---------------	---



Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura

Observaciones

El archivo de la grabación con la cámara térmica ha resultado dañado por lo que este ensayo se repetirá para subsanar dicho error.

HOJA DE DATOS




Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	2B	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P2BCN_VC54,03_VA0,15_P1_MS_R1
--------	---

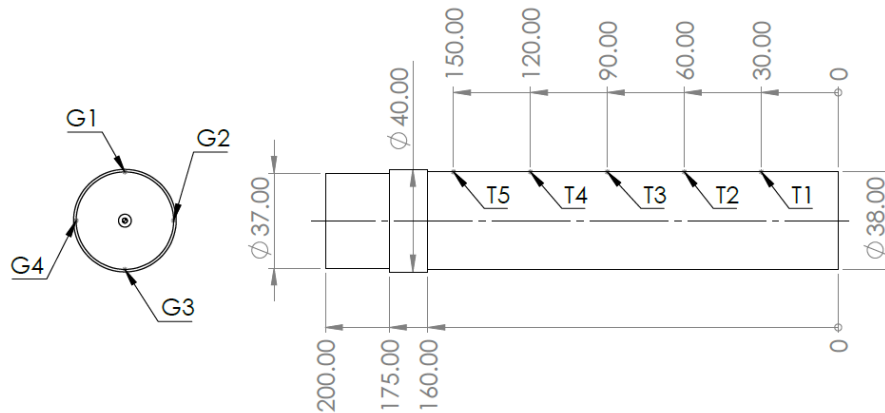
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>-Mecanizado: ninguna anomalía durante el mecanizado.</p> <p>-Probeta: aparentemente presenta una calidad superficial uniforme a lo largo de la probeta.</p> <p>-Viruta: de tipo helicoidal corta.</p> <p>-Herramienta: gran deformación plástica en la punta.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,093	11,269	2,234	12,031
G2	1,786	8,800	2,223	11,931
G3	2,476	12,053	2,320	12,654
G4	2,704	13,545	2,135	11,747

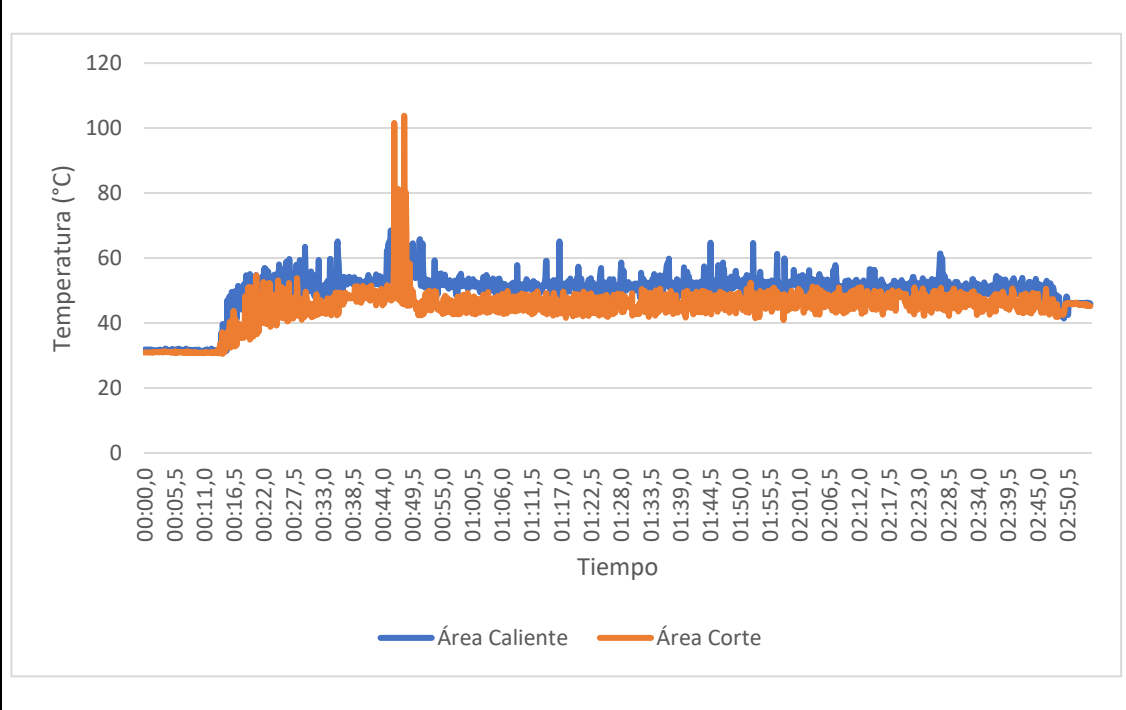
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,382	12,067	2,564	13,096
G2	2,631	11,699	2,076	11,979
G3	1,974	9,849	2,713	13,492
G4	2,200	11,757	3,299	17,916

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,114	11,187
G2	2,622	14,151
G3	2,975	14,480
G4	2,847	15,278

Observaciones	Valores relativamente altos y constantes a lo largo de toda la probeta.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

El área caliente durante el mecanizado se sitúa en la taladrina que envuelve a la probeta tras haber pasado por la zona de corte.

## HOJA DE DATOS

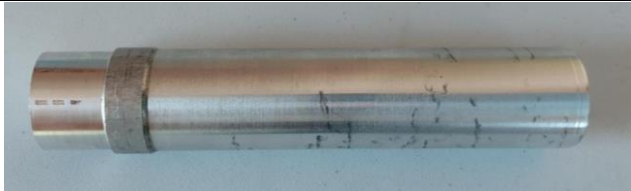


Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\beta$	2B	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\beta$ _P2BSN_VC54,03_VA0,15_P1_MS_R2
--------	---

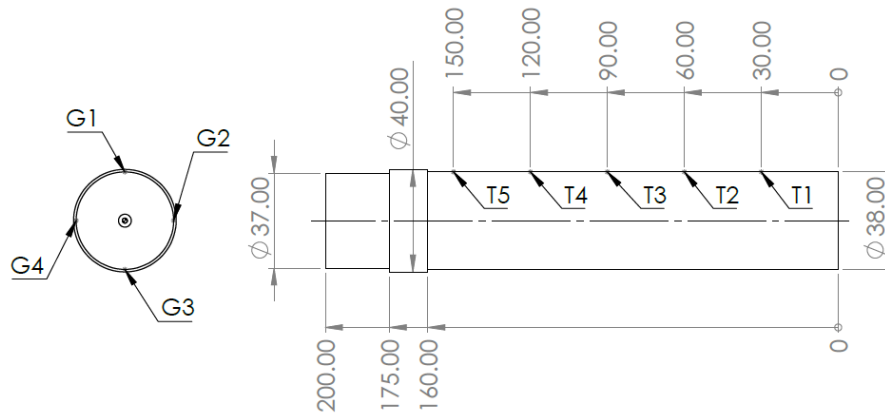
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mecanizado: ninguna anomalía durante el mecanizado.</li> <li>-Probeta: presenta zonas sucias.</li> <li>-Viruta: de tipo plana larga.</li> <li>-Herramienta: punta deformada y con filo recrecido.</li> </ul>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,931	11,174	2,552	13,435
G2	2,572	13,960	2,641	15,143
G3	2,448	13,870	2,213	10,592
G4	2,003	11,724	2,608	12,997

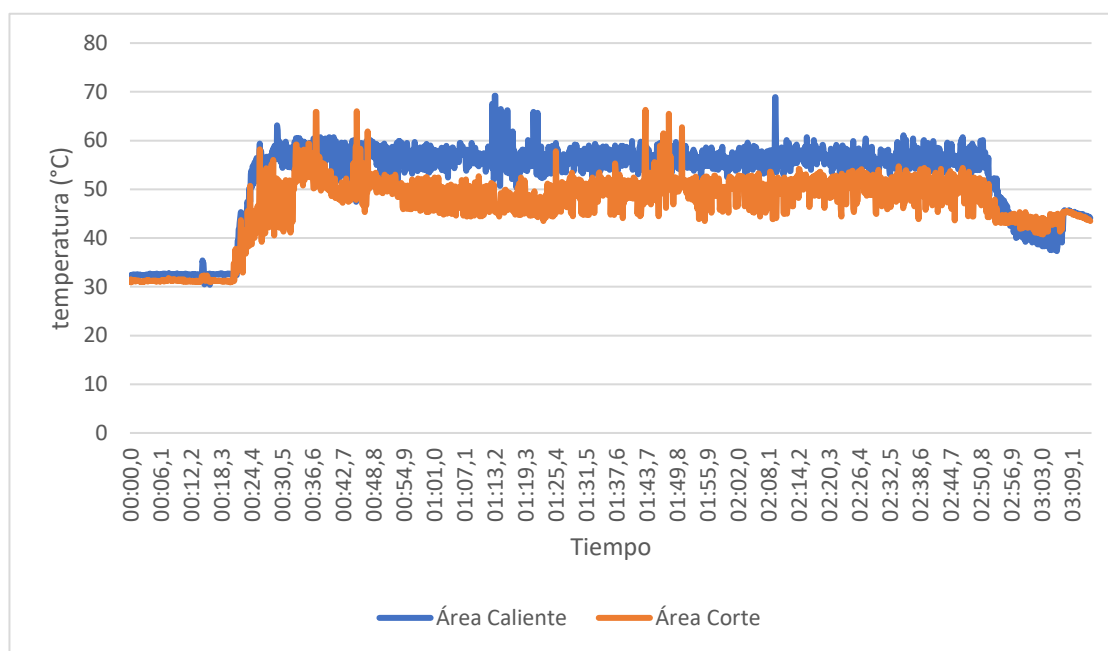
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,448	12,459	2,456	10,910
G2	2,260	10,427	3,384	19,623
G3	2,723	16,042	2,970	14,856
G4	3,026	16,942	2,805	14,788

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,764	14,976
G2	2,988	17,780
G3	2,161	12,744
G4	2,598	15,198

Observaciones	
---------------	--

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

## HOJA DE DATOS

Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\gamma$	3B	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\gamma$ _P3BCN_VC45,24_VA_0,1_P1_ML_R3
--------	--

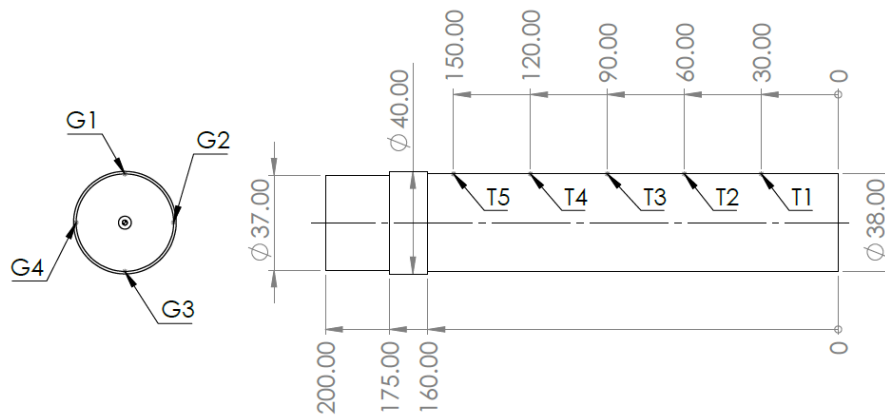
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,1
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	Taladrina blanca plus
-----------------	-----------------------

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>Este ensayo representa la repetición del ensayo ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C<math>\beta</math>_P4SN_VC45,24_VA_0,1_P1_ML_R2 para subsanar el error.</p> <p>-Mecanizado: al inicio del mecanizado se produjo la rotura prematura de la herramienta.</p> <p>-Probeta: prácticamente sin mecanizar.</p> <p>-Herramienta: punta totalmente deformada.</p>
---------------	--

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1				
G2				
G3				
G4				

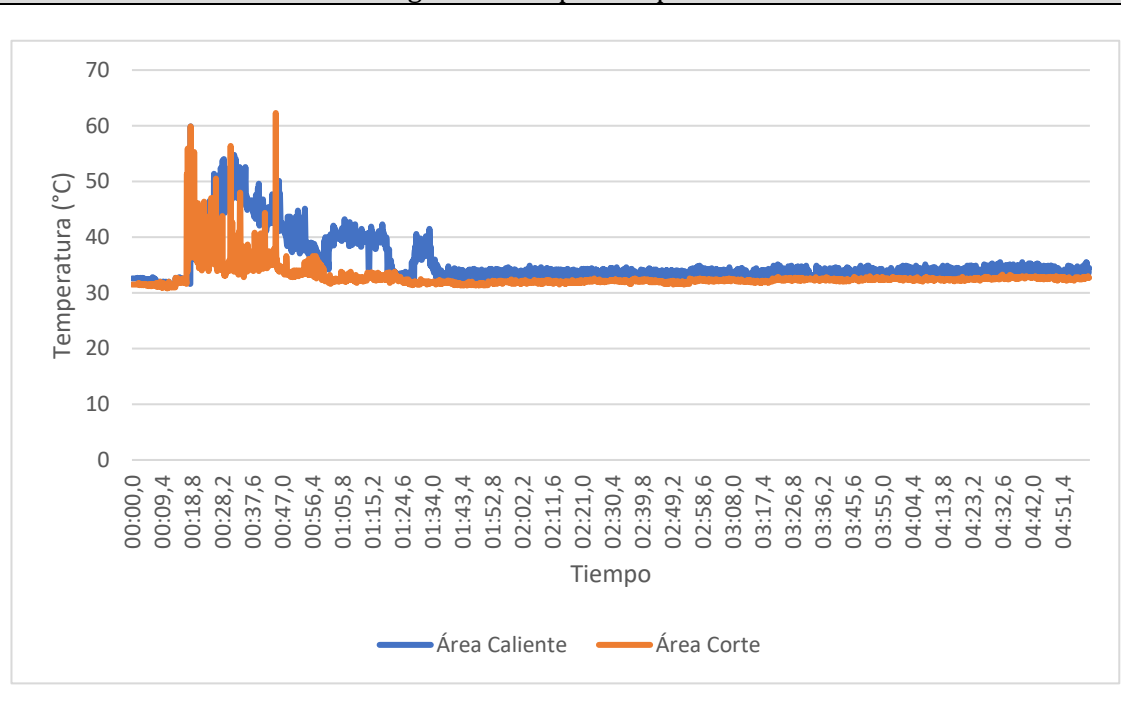
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1				
G2				
G3				
G4				

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1		
G2		
G3		
G4		

Observaciones	No se han tomado datos de la rugosidad en ningún tramo de la probeta puesto que se produjo un fallo repentino de la herramienta que invalida cualquier tipo de dato.
---------------	--

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

En el diagrama se aprecia cuando falla la herramienta ya que se produce un descenso significativo de la temperatura.

## HOJA DE DATOS




Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\gamma$	3B	SN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\gamma$ _P3BSN_VC45,24_VA0,15_P1_ML_R3
--------	--

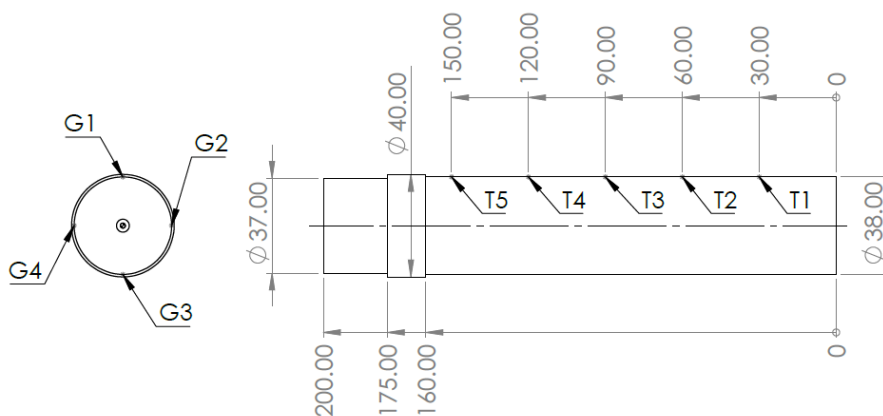
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	45,24
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	Taladrina blanca plus
-----------------	-----------------------

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>Este ensayo es la repetición del ensayo ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C<math>\beta</math>_P8CN_VC45,24_VA0,15_P1_ML_R1 para subsanar la pérdida de datos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Mecanizado: en el último tramo se reduce la penetración debido a la deformación de la herramienta.</li> <li>-Probeta: superficie muy rugosa.</li> <li>-Viruta: de tipo larga helicoidal. Viruta continua durante todo el mecanizado.</li> <li>-Herramienta: gran deformación plástica en la punta.</li> </ul>
---------------	---

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	3,429	17,324	3,379	18,444
G2	3,221	17,274	3,235	18,086
G3	2,427	13,595	3,702	21,476
G4	3,616	21,042	3,757	24,321

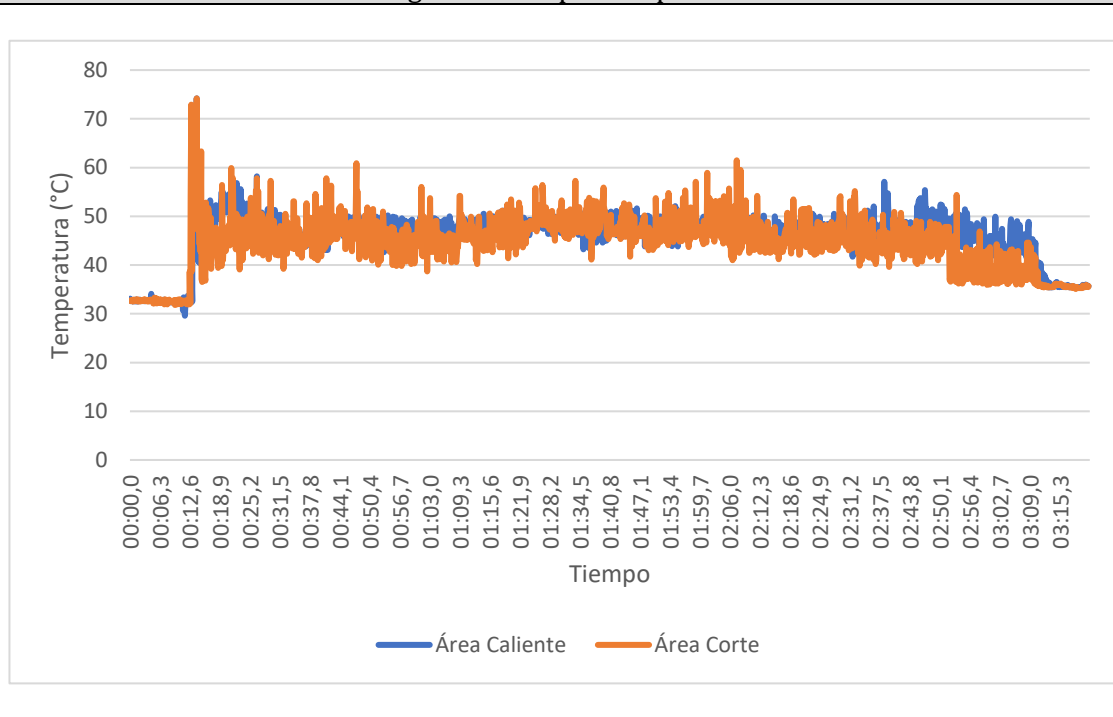
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	5,691	35,302	2,791	14,056
G2	4,516	23,456	2,941	14,524
G3	3,975	20,927	2,394	12,593
G4	3,406	18,812	3,516	18,148

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	1,792	8,509
G2	0,85	4,88
G3	0,905	5,246
G4	1,144	6,188

Observaciones	Como se podía intuir a simple vista, la rugosidad es bastante alta a lo largo de toda la probeta. En el último tramo la calidad superficial aumenta enormemente, pero este pertenece a la zona cuando la herramienta ya estaba dañada, por lo que hay que obviarlo.
---------------	---

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones

El área caliente se ha situado en la taladrina que envuelve a la probeta tras pasar por la zona de corte.

## HOJA DE DATOS




Material de la pieza de trabajo	EN AW-2030
---------------------------------	------------

Herramienta	FA	Ubicación		
		Caja	Número	Filo
		$\gamma$	4B	CN

Ensayo	ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C $\gamma$ _P4BCN_VC54,03_VA0,15_P1_MS_R3
--------	--

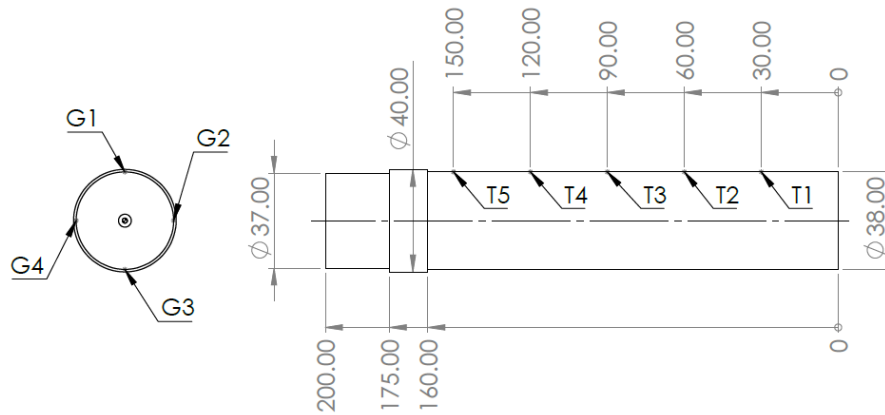
Parámetros de corte	$V_c$ (m/min)	54,03
	$F_z$ (mm/rev)	0,15
	$A_p$ (mm)	1

Fluido de corte	No
-----------------	----

Imágenes	Probeta	
	Viruta	
	Herramienta	

Observaciones	<p>Este ensayo es la repetición del ensayo ENAW2030_TN_D40_L160_HFA_C<math>\beta</math>_P1BSN_VC54,03_VA0,15_P1_MS_R2 para subsanar la pérdida de datos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Mecanizado: hasta aproximadamente la mitad del mecanizado la viruta continua no ha generado nidos, pero a partir de ahí sí. Al final se produce el choque de la viruta con el plato.</li> <li>-Probeta: superficie bastante rugosa a simple vista.</li> <li>-Viruta: de tipo arqueada conectada.</li> <li>-Herramienta: gran aparición de filo recrecido en la punta.</li> </ul>
---------------	---

Calidad superficial



	T1		T2	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	3,076	18,132	3,263	20,210
G2	4,489	22,722	2,635	17,588
G3	3,787	21,425	2,832	14,802
G4	2,335	12,315	2,413	14,642

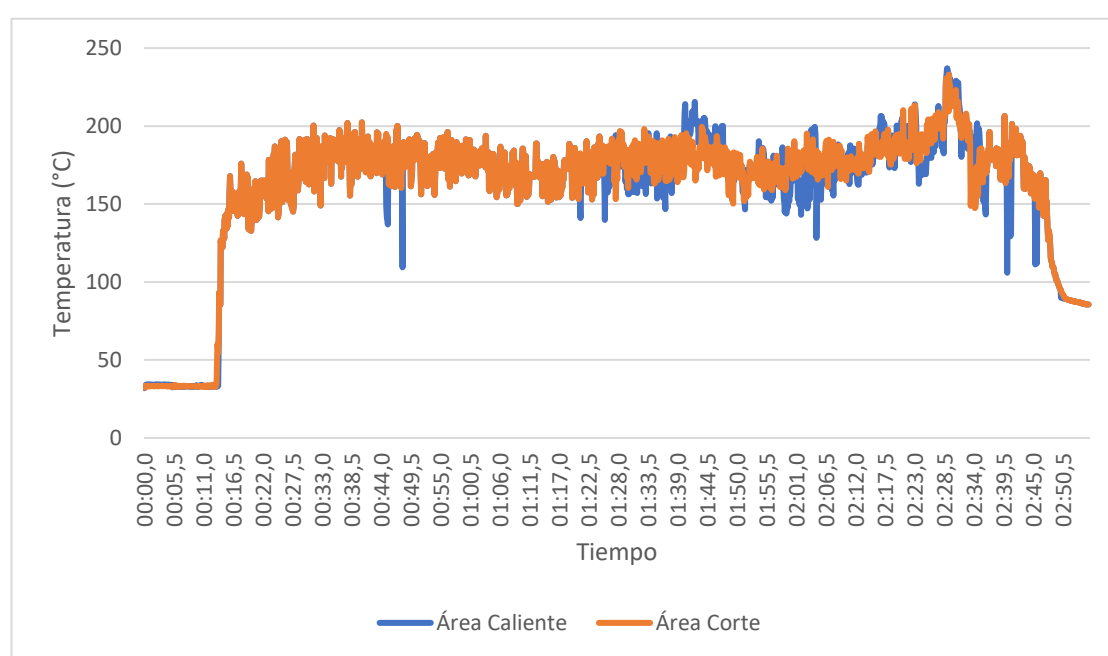
	T3		T4	
	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	3,848	17,773	4,449	21,892
G2	3,798	18,251	4,668	23,15
G3	3,769	17,253	4,450	20,946
G4	3,826	15,901	4,317	20,330

	T5	
	Ra(μm)	Rz(μm)
G1	2,286	15,249
G2	2,432	15,213
G3	2,604	14,387
G4	2,419	15,840

Observaciones	
---------------	--

Análisis térmico

Diagrama Tiempo-Temperatura



Observaciones



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



# PLANOS



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## ÍNDICE DE PLANOS

---

1. PLAQUITA DE FABRICACIÓN ADITIVA
2. TOCHO DE BARRA
3. PROBETA PREPARADA PARA ENSAYAR
4. PROBETA ENSAYADA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

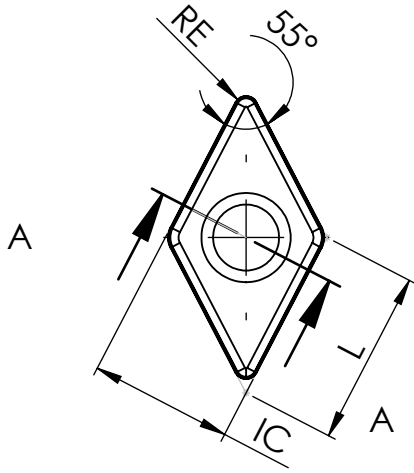
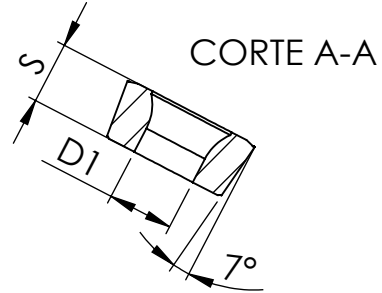
C

B

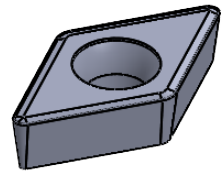
B

A

A



L	IC	S	RE	D1
11,60	9,52	3,97	0,8	4,40



	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	07/10/2022	Héctor G.M	
Comprobado	07/10/2022	Francisco M.F	
Revisado	07/10/2022	M <sup>a</sup> Jesús M.S.	



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Material: Acero para herramientas H13

Escala:	Plaquita de fabricación aditiva
1:1	

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica
Nº de plano: 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

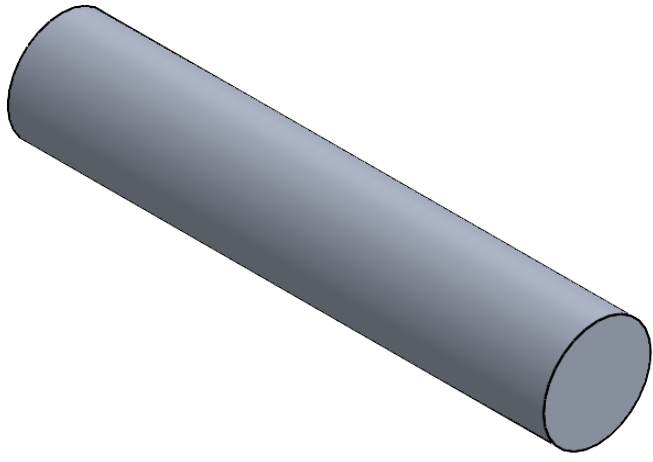
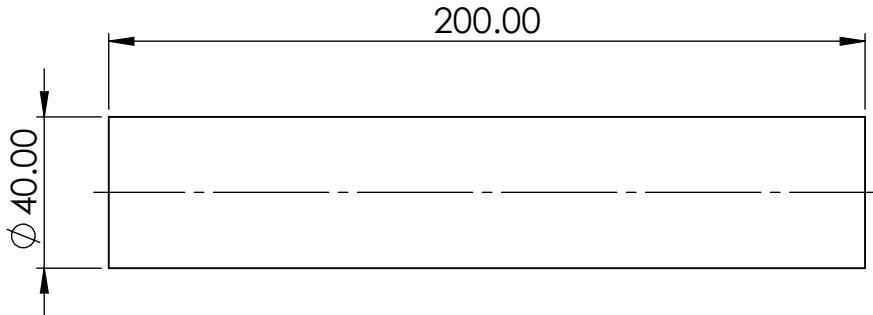
C



B

B

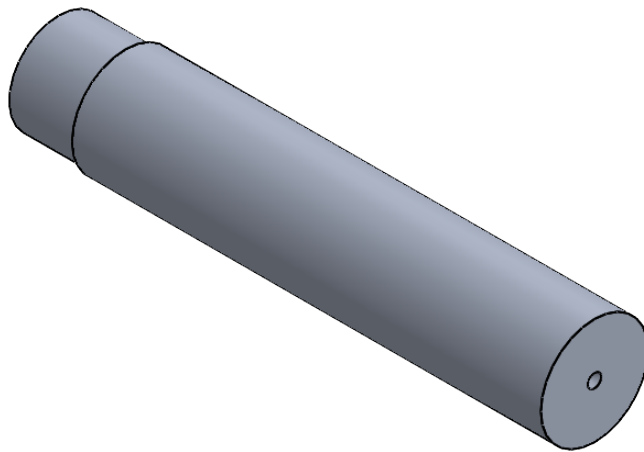
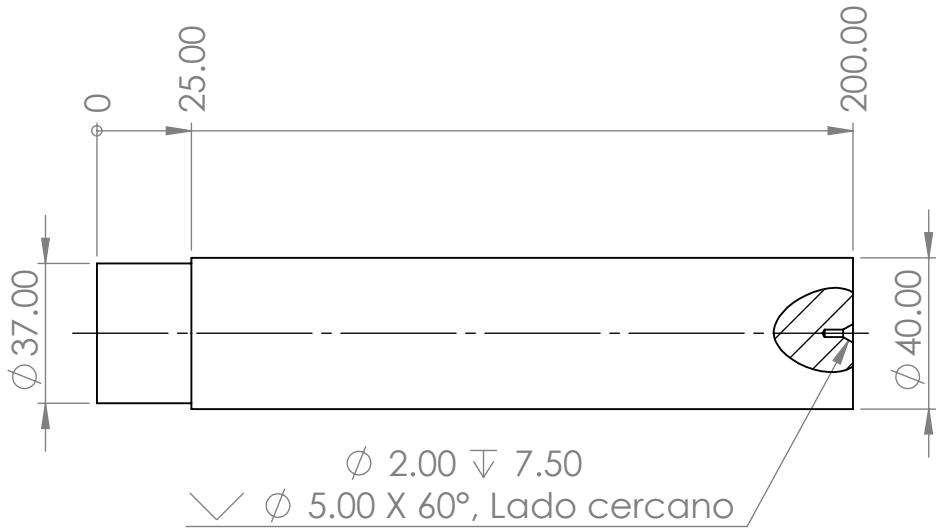
A


A

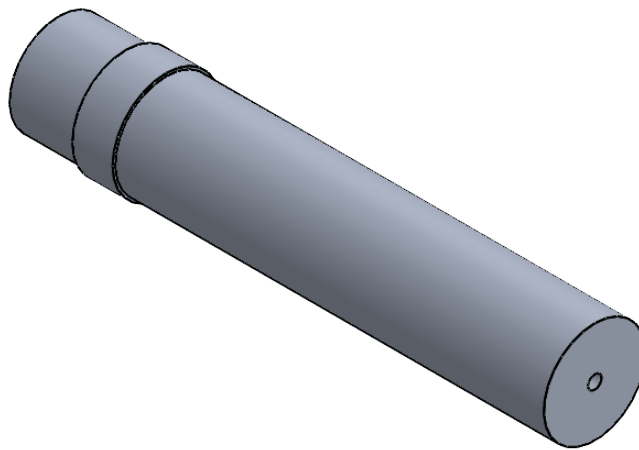
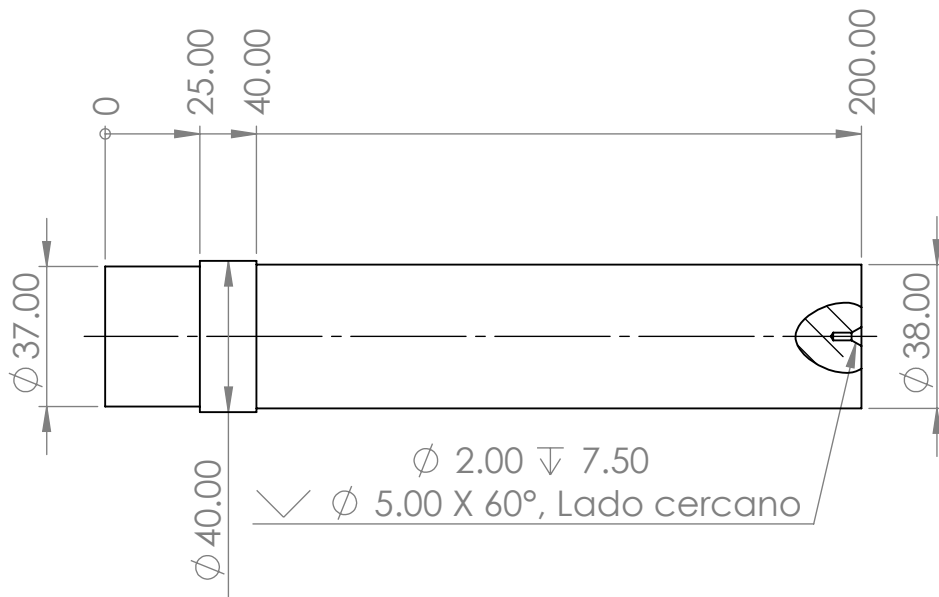




	Fecha	Nombre	Firma	 <b>UNIVERSIDAD DE MÁLAGA</b>
Dibujado	07/10/2022	Héctor G.M		
Comprobado	07/10/2022	Francisco M.F		
Revisado	07/10/2022	M <sup>a</sup> Jesús M.S.		
Material: EN AW-2030				
Escala:	Tocho de barra		Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica	
1:2			Nº de plano: 2	

4 3 2 1



	Fecha	Nombre	Firma	
Dibujado	07/10/2022	Héctor G.M		 <b>UNIVERSIDAD DE MÁLAGA</b>
Comprobado	07/10/2022	Francisco M.F		
Revisado	07/10/2022	M <sup>a</sup> Jesús M.S.		
Material: EN AW-2030				
Escala:	Probeta preparada para ensayar			Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica
1:2				Nº de plano: 3



	Fecha	Nombre	Firma	
Dibujado	07/10/2022	Héctor G.M		
Comprobado	07/10/2022	Francisco M.F		
Revisado	07/10/2022	M <sup>a</sup> Jesús M.S.		
Material: EN AW-2030				
Escala:	Probeta ensayada			Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica
1:2				Nº de plano: 4