

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Estudio de estrategias de mecanizado para fresado CNC de cavidades en
Duralón”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Roosevelt Alberto Santos Pazmiño

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios y a la Santísima Virgen María, a mis queridos padres Roosevelt y Violeta y, a mis hermanas Aneyra Violeta y Violeta Bellaneyra.

AGRADECIMIENTO

A Dios por el regalo de alcanzar una profesión.

A mis padres por su incondicional apoyo.

A mis tutores Fausto Maldonado Galarza MSc y Jorge Luis Amaya PhD.

A todos los profesores que me formaron y transmitieron sus experiencias a lo largo de mis estudios.

Y a los laboratorios de FIMCP, CAMPRO y LEMAT.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Roosevelt Alberto Santos Pazmiño* y doy mi consentimiento para que la ESPOC realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Roosevelt Santos Pazmiño

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**FRANCIS RODERICH
LOAYZA PAREDES**

Francis Roderich Loayza Paredes PhD

PROFESOR DE LA MATERIA

**FAUSTO
ANDRES
MALDONADO
GALARZA**

Firmado digitalmente
por FAUSTO ANDRES
MALDONADO
GALARZA
Fecha: 2021.09.21
22:16:58 -05'00'

Fausto Maldonado Galarza MSc

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El fresado de cavidades es una de las operaciones de mecanizado más utilizada por la industria, permitiendo elaborar moldes, cajas, cojinetes, etc., en materiales como aceros, aleaciones y termoplásticos, este último aplicado principalmente por el sector alimenticio y médico. Por tanto, se pretende estudiar la influencia de los parámetros de corte en diferentes estrategias para fresado CNC de cavidades en Duralón. El desarrollo de la metodología estableció el proceso de experimentación, seleccionando las estrategias corte en espiral, zigzag y en un sentido. Se utilizó la fresadora Roland MDX 40A, un cortador HSS de 6 mm de diámetro con cuatro filos para un descenso de 1 mm. Las condiciones de corte a variar fueron la velocidad de rotación, el avance, y como parámetros de control el tiempo de mecanizado, consumo energético, potencia y rugosidad superficial. El equipo empleado para la medición de energía fue BaLDR y para la rugosidad Phase II SRG 4500. Para el análisis se presentaron gráficos de avance vs tiempo, tipo de fresado, consumo energético, potencia consumida a lo largo del tiempo, potencia sobre la trayectoria de corte, rugosidad superficial vs avance, emisión acústica vs tiempo y el ranking de estrategias. Finalmente, la mejor rugosidad, tiempo de mecanizado y consumo energético combinados fue obtenida con la estrategia en espiral (1.257 μ m, 6.13 min y 7 Wh) con 15000 RPM y 2700 mm/min. Sin embargo, la mejor calidad superficial se encuentra en la estrategia de corte en un sentido con 1.099 μ m, 12.57 min y 14Wh a 10800RPM y 2100 mm/min.

Palabras Clave: Fresado de cavidades, duralón, estrategias de corte, rugosidad superficial, tiempo de mecanizado.

ABSTRACT

Cavity milling is one of the most widely used machining operations by the industry, allowing the production of molds, pockets, bearings, etc., in materials such as steels, alloys and thermoplastics, the latter mainly applied by the food and medical sector. Therefore, it is intended to study the influence of cutting parameters in different strategies for CNC milling of cavities in Duralon. The development of the methodology established the experimentation process, selecting the spiral, zigzag and one-way cutting strategies. The Roland MDX 40A milling machine was used, a 6 mm diameter HSS cutter with four cutting edges for a 1 mm descent. The cutting conditions to be varied were rotational speed, feed rate, and as control parameters machining time, energy consumption, power and surface roughness. The equipment used for energy measurement was BaLDR and for roughness Phase II SRG 4500. For the analysis, graphs of feed rate vs. time, type of milling, energy consumption, power consumed over time, power over the cutting path, surface roughness vs. feed rate, acoustic emission vs. time and the ranking of strategies were presented. Finally, the best combined roughness, machining time and power consumption was obtained with the spiral strategy (1.257 μm , 6.13 min and 7 Wh) with 15000 RPM and 2700 mm/min. However, the best surface quality is found in the one-way cutting strategy with 1.099 μm , 12.57 min and 14Wh at 10800RPM and 2100 mm/min.

Keywords: *Cavity milling, duralon, cutting strategies, surface roughness, machining time.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XV
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Justificación del proyecto.....	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Caracterización del material	3
1.4.2 Fresado de cavidades	4
1.4.3 Definición de parámetros de corte	5
1.4.4 Consumo energético en el proceso de corte	7
1.4.5 Rugosidad superficial	9
CAPÍTULO 2.....	14
2. Metodología.....	14
2.1 Análisis del problema.....	14
2.1.1 Caja negra.....	14
2.1.2 Planteamiento de metodología.....	15
2.2 Selección de la mejor alternativa	16
2.2.1 Ponderación de criterios.....	18

2.2.2 Matriz de priorización	20
2.3 Planteamiento experimental	21
2.4 Diseño detallado.....	22
2.4.1 Selección de estrategias de mecanizado	22
2.4.2 Caracterización de materia prima	23
2.4.3 Características de la fresadora CNC	23
2.4.4 Dimensiones de la probeta y cavidad	24
2.4.5 Selección de herramienta de corte	25
2.4.6 Diseño de la trayectoria de corte.....	25
2.4.7 Cálculo de los parámetros de corte.....	26
2.4.8 Selección de variables y parámetros de control.....	29
2.4.9 Instrumentos de medición	29
2.4.10 Métodos de fijación.....	31
2.4.11 Número de probetas	32
2.4.12 Toma de datos.....	34
2.5 Proceso iterativo de la metodología experimental.....	35
2.6 Análisis de resultados.....	36
CAPÍTULO 3.....	37
3. Resultados y análisis.....	37
3.1 Tiempo de mecanizado.....	37
3.2 Análisis de la dirección de mecanizado en cada estrategia de corte	37
3.3 Consumo energético	40
3.4 Potencia consumida- gráficos 2d	41
3.5 Potencia consumida- gráfico 3d	46
3.6 Rugosidad superficial.....	47
3.7 Emisión acústica	50
3.8 Selección de estrategia óptima	55
3.9 Discusión	58
3.10 Análisis de costos.....	59
CAPÍTULO 4.....	60
4. Conclusiones y recomendaciones	60
4.1 Conclusiones.....	60

4.2 Recomendaciones.....61

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
UHMW	Polietileno de ultra alto peso molecular
HSS	High Speed Steel
CNC	Computer Numerical Control
CAM	Computer Aided Manufacturing

SIMBOLOGÍA

<i>PSI</i>	Libra por pulgada cuadrada
<i>g/cm³</i>	Peso específico
<i>Cal/g°C</i>	Calor específico
<i>cal/cm³s</i>	Conductividad térmica
<i>W</i>	Vatios o Watt
<i>dB</i>	Decibelio o decibel
<i>Tm</i>	Tiempo de mecanizado [s]
<i>Ra</i>	Rugosidad media aritmética
<i>RPM</i>	Revoluciones por minuto
<i>Vc</i>	Velocidad de corte [m/min]
<i>N</i>	Velocidad de rotación del husillo [RPM]
<i>f</i>	Avance por diente [mm/diente]
<i>fx_y</i>	Avance radial [mm/min]
<i>fz</i>	Avance axial [mm/min]
<i>Ap</i>	Descenso axial [mm]
<i>n</i>	Número de filos del cortador
<i>l</i>	Incremento de pasada lateral [mm]
<i>D</i>	Diámetro del cortador [mm]
<i>R</i>	Radio del cortador [mm]
<i>Nc</i>	Velocidad de husillo calculado [RPM]
<i>Na</i>	Velocidad del husillo ajustado con límites de máquinas [RPM]
<i>fc</i>	Avance lineal calculado [mm/min]
<i>fa</i>	Avance lineal ajustado con <i>Na</i> [mm/min]
<i>fks</i>	Avance lineal con <i>Nc</i> y <i>ks</i> =0.6 [mm/min]
<i>fke</i>	Avance lineal con <i>Nc</i> y <i>ke</i> [mm/min]
<i>fka</i>	Avance lineal ajustado a partir de <i>fk</i> [mm/min]
<i>ke</i>	Factor de corrección experimental - 0.526

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: Duralón disponible en barras y planchas.	3
FIGURA 1.2: Descomposición del consumo de energía de una máquina herramienta...8	8
FIGURA 1.3: Diagrama esquemático del perfil de potencia del proceso de fresado.9	9
FIGURA 1.4: Características de la textura superficial.	10
FIGURA 1.5: Representación gráfica del parámetro Ra.....	10
FIGURA 1.6: Rugosidad superficial esperados en procesos de manufactura	11
FIGURA 1.7: Factores que afectan a la rugosidad superficial.....	11
FIGURA 1.8: Componentes del rugosímetro.	12
FIGURA 2.1: Caja negra.	14
FIGURA 2.2: Diagrama de flujo del planteamiento experimental.	21
FIGURA 2.3: Fresadora ROLAND MDX-40A.	23
FIGURA 2.4: Área de trabajo.....	24
FIGURA 2.5: Probeta cuadrada.....	24
FIGURA 2.6: Tipos de incremento en pasada lateral: a) especificaciones 26B) visualización del corte.	26
FIGURA 2.7: Comparación entre parámetros de corte.....	28
FIGURA 2.8: Medidor de parámetros eléctricos BALDR - BA3091-2.	30
FIGURA 2.9: Rugosímetro PHASE II SRG 4500.....	31
FIGURA 2.10: Distribución de la cinta en la parte posterior de la probeta.	32
FIGURA 2.11: Plantilla de centrado: a) perspectiva b) detalle de acceso a esquina.....	32
FIGURA 2.12: Pasos seguidos en el ensayo.....	34
FIGURA 2.13: Equipos que integran el ensayo.	34
FIGURA 2.14: Orientación para la toma de rugosidad superficial a) corte espiral b) zigzag c) corte en un sentido.....	35
FIGURA 2.15: Resumen del proceso experimental desarrollado.	36

FIGURA 2.16: Nomenclatura utilizada para el diagrama del proceso experimental.....	36
FIGURA 3.1: Avance vs tiempo de mecanizado entre trayectorias con 10800RPM.	37
FIGURA 3.2: Corte en espiral a) primera y tercera capa con fresado descendente b) segunda y cuarta capa con fresado ascendente.	38
FIGURA 3.3: Corte zigzag a) primera y tercera capa con fresado ascendente b) primera y tercera capa con fresado descendente c) segunda y cuarta capa fresado descendente d) segunda y cuarta capa fresado ascendente.....	38
FIGURA 3.4: Corte en un sentido a) primera y tercera capa fresado ascendente b) segunda y cuarta capa fresado descendente.....	39
FIGURA 3.5: Diseño de la estrategia de corte en zigzag.	40
FIGURA 3.6: Diseño de la estrategia de corte en un sentido: fresado (prisma azul), retorno a posición de corte (prisma rojo)	40
FIGURA 3.7: Consumo energético entre estrategias para las velocidades de avance a)1500 mm/min b) 2100 mm/min c) 2700 mm/min.	41
FIGURA 3.8: Curvas de potencia consumida vs tiempo con avance de 1500 mm/min y para a) 10800 RPM, b) 12900 RPM y c) 15000 RPM.....	42
FIGURA 3.9: Curvas de potencia consumida vs tiempo con avance de 2100 mm/min y para a) 10800 RPM, b) 12900 RPM y c) 15000 RPM.....	43
FIGURA 3.10: Curvas de potencia consumida vs tiempo con avance de 2700mm/min y para a) 10800 RPM, b) 12900 RPM y c) 15000 RPM.....	44
FIGURA 3.11: Detalles en la curva de potencia durante: a) penetración de corte, b) incremento de potencia.....	45
FIGURA 3.12: Vista en 3d de la potencia consumida durante el recorrido de la primera capa para la trayectoria de corte en espiral.....	46
FIGURA 3.13: Rugosidad vs avance entre trayectorias con 10800RPM.....	47
FIGURA 3.14: Rugosidad vs avance entre trayectorias con 12900RPM.....	49
FIGURA 3.15: Rugosidad vs avance entre trayectorias con 15000RPM.....	50
FIGURA 3.16: Señales de potencia y emisión acústica para las probetas con mejores acabados superficiales: a) corte en espiral, b) corte zigzag y c) corte en un sentido; y	

con peores acabados superficiales: d) corte en espiral, e) corte zigzag y f) corte en un sentido.....	53
FIGURA 3.17: Ponderación cuantitativa de las probetas según rugosidad y tiempo para cada estrategia de corte.....	56
FIGURA 3.18: Ponderación de las probetas según consumo energético, rugosidad superficial y tiempo de mecanizado.....	57
FIGURA C1: Características de la fresa de dos filos marca izar tool.	73
FIGURA D.1: Potencia vs tiempo para corte espiral con A_p de 0.5, 0.8 y 1 mm.....	85
FIGURA E.1: Potencia vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 1500mm/min	91
FIGURA E.2: Potencia vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 1500mm/min	91
FIGURA E.3: Potencia vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 1500mm/min	91
FIGURA E.4: Potencia vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 2100mm/min	92
FIGURA E.5: Potencia vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 2100mm/min	92
FIGURA E.6: Potencia vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 2100mm/min	92
FIGURA E.7: Potencia vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 2700mm/min	93
FIGURA E.8: Potencia vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 2700mm/min	93
FIGURA E.9: Potencia vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 2700mm/min	93
FIGURA E.10: D_b vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 1500mm/min	94
FIGURA E.11: D_b vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 1500mm/min	94
FIGURA E.12: D_b vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 1500mm/min	94
FIGURA E.13: D_b vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 2100mm/min	95
FIGURA E.14: D_b vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 2100mm/min	95
FIGURA E.15: D_b vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 2100mm/min	95
FIGURA E.16: D_b vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 2700mm/min	96
FIGURA E.17: D_b vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 2700mm/min	96
FIGURA E.18: D_b vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 2700mm/min	96
FIGURA E.19: Potencia sobre trayectoria en espiral 10800RPM -1500mm/min.....	97

FIGURA E.20: Potencia sobre trayectoria en espiral 12900RPM -1500mm/min.....	97
FIGURA E.21: Potencia sobre trayectoria en espiral 15000RPM -1500mm/min.....	98
FIGURA E.22: Potencia sobre trayectoria en espiral 10800RPM - 2100mm/min.....	98
FIGURA E.23: Potencia sobre trayectoria en espiral 12900RPM - 2100mm/min.....	99
FIGURA E.24: Potencia sobre trayectoria en espiral 15000RPM - 2100mm/min.....	99
FIGURA E.25: Potencia sobre trayectoria en espiral 10800RPM - 2700mm/min.....	100
FIGURA E.26: Potencia sobre trayectoria de corte en espiral 12900RPM - 2700mm/min.....	100
FIGURA E.27: Potencia sobre trayectoria en espiral 15000RPM - 2700mm/min.....	101
FIGURA E.28: Potencia sobre trayectoria zigzag 10800RPM - 1500mm/min.....	101
FIGURA E.29: Potencia sobre trayectoria zigzag 12900RPM - 1500mm/min.....	102
FIGURA E.30: Potencia sobre trayectoria zigzag 15000RPM - 1500mm/min.....	102
FIGURA E.31: Potencia sobre trayectoria zigzag 10800RPM - 2100mm/min.....	103
FIGURA E.32: Potencia sobre trayectoria zigzag 12900RPM - 2100mm/min.....	103
FIGURA E.33: Potencia sobre trayectoria zigzag 15000RPM - 2100mm/min.....	104
FIGURA E.34: Potencia sobre trayectoria zigzag 10800RPM - 2700mm/min.....	104
FIGURA E.35: Potencia sobre trayectoria zigzag 12900RPM - 2700mm/min.....	105
FIGURA E.36: Potencia sobre trayectoria zigzag 15000RPM - 2700mm/min.....	105
FIGURA E.37: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 10800RPM - 1500mm/min.....	106
FIGURA E.38: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 12900RPM - 1500mm/min.....	106
FIGURA E.39: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 15000RPM - 1500mm/min.....	107
FIGURA E.40: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 10800RPM - 2100mm/min.....	107
FIGURA E.41: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 12900RPM - 2100mm/min.....	108

FIGURA E.42: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 15000RPM - 2100mm/min.....	108
FIGURA E.43: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 10800RPM - 2700mm/min.....	109
FIGURA E.44: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 12900RPM - 2700mm/min.....	109
FIGURA E.45: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 15000RPM - 2700mm/min.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1: Características del UHMW 1900 – Duralón.....	4
TABLA 2.1: Matriz de importancia relativa entre criterios.....	16
TABLA 2.2: Pesos específicos de los criterios	16
TABLA 2.3: Descripción de alternativas de diseño.....	18
TABLA 2.4: Matriz para el criterio 2 “cantidad de variables y parámetros de control” ...	18
TABLA 2.5: Matriz para el criterio 1 “disponibilidad de equipos”	19
TABLA 2.6: Matriz para el criterio 4 “menor tiempo de ejecución y análisis”	19
TABLA 2.7: Matriz para el criterio 3 “menor costo de implementación”	19
TABLA 2.8: Matriz de priorización	20
TABLA 2.9: Alternativa implementada	20
TABLA 2.10: Estrategias de mecanizado.....	22
TABLA 2.11: Características de la máquina.....	23
TABLA 2.12: Dimensiones de la probeta [mm].....	24
TABLA 2.13: Ajuste de parámetros de corte mediante experimentación.....	28
TABLA 2.14: Parámetros de corte finales	29
TABLA 2.15: Características del medidor de energía.....	30
TABLA 2.16: Características del rugosímetro PHASE II SRG 4500.....	31
TABLA 2.17: Combinación de parámetros de corte.....	33
TABLA 3.1: Parámetros de corte para probeta con mejor y peor rugosidad de cada estrategia.....	55
TABLA 3.2: Costos de insumos.....	59
TABLA 3.3: Costo de alquiler de equipos.....	59
TABLA C1: Entorno posteriormente al maquinado – corte en espiral	74
TABLA C2: Entorno posteriormente al maquinado – zigzag.....	75
TABLA C3: Entorno posteriormente al maquinado – corte en un sentido	77

TABLA C4: Acabado de probetas – corte en espiral	79
TABLA C5: Acabado de probetas – zigzag	81
TABLA C6: Acabado de probetas – corte en un sentido	83
TABLA D.1: Detalles de ensayos previos.....	86
TABLA E.1: Valores de rugosidad superficial	88

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Dimensiones de la probeta

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

En la industria metalmecánica, una de las geometrías más comunes a mecanizar son las cavidades. Para el mecanizado de cavidades, es muy común utilizar el proceso de fresado CNC debido a la precisión que se puede obtener. Sin embargo, existen múltiples trayectorias (estrategias de mecanizado) que las herramientas de corte pueden realizar. Cada trayectoria de la herramienta de corte o estrategia de mecanizado brindan ventajas y desventajas de acuerdo con los parámetros y condiciones de corte aplicadas en el proceso.

Reconociendo la importancia del desarrollo y tecnificación de los procesos de fabricación para la industria, el presente proyecto genera un impacto directo a la **seguridad y bienestar del personal**, debido que, con la adecuada elección de la estrategia de corte, se evitan errores y posibles riesgos de impactos durante el proceso de mecanizado. En cuanto al **aspecto ambiental** el proyecto busca optimizar los procesos de mecanizado promoviendo el desarrollo de la manufactura sustentable, teniendo como principal objetivo la optimización de recursos (eléctricos, materiales, etc.) y los efectos que generen en su tiempo de vida. Finalmente, tiene un gran impacto en el **aspecto económico**, evaluando parámetros de control como el tiempo de mecanizado, el consumo energético, y la rugosidad superficial; enfocándose en la selección de una estrategia de corte que disminuya los costos asociados en la fabricación de piezas por volumen.

1.2 Justificación del proyecto

En la fabricación de cavidades se busca la trayectoria de la herramienta de corte (o estrategia de corte) que brinde la mejor calidad superficial, en el menor tiempo posible y a un bajo costo. Para ello, se deben evaluar las diferentes estrategias disponibles y analizar cuáles son las condiciones en las

que van a trabajar de la manera más eficiente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Estudiar la influencia de los parámetros de corte en diferentes estrategias para fresado CNC de cavidades en Duralón.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Detallar los aspectos implicados en el estudio de estrategias de mecanizado, así como los parámetros a medir durante el proceso de corte.
2. Definir la metodología más adecuada para el estudio de la influencia de los parámetros de corte en diferentes estrategias de mecanizado.
3. Analizar la influencia de los parámetros de corte en la rugosidad superficial, tiempo de corte, potencia demandada y consumo energético.

1.4 Marco teórico

En la fabricación de piezas complejas mediante operaciones de fresado con equipos CNC se busca diseñar la mejor metodología para la optimización de recursos, debido a que el tiempo de corte y los costos de insumos se incrementa en comparación a los procesos convencionales. Por ende, surge la necesidad de seleccionar las estrategias o trayectorias de corte adecuadas para las etapas de desbaste y acabado, optando muchas veces por combinar varias estrategias para reducir los tiempos de fabricación implicados.

El fresado de cavidades con sección rectangular en aluminio como materia prima, es abordado en el trabajo “Estudio de estrategias de corte en el proceso de fresado”, en dicho documento se rescata la importancia del estudio de tres estrategias (espiral, zigzag y corte en un sentido); estableciendo como variables el descenso axial, el diámetro del cortador, la velocidad de corte, la velocidad de avance y como parámetros de control el tiempo de mecanizado

y la rugosidad superficial. (Cervantes et al., 2012)

En cuanto a la importancia de este tipo de estudio enfocado hacia la industria, el proyecto “Selección de estrategias de cajeado para reducir el tiempo de mecanizado en la fabricación de llantas de automóvil” analiza las estrategias de mecanizado que permitan mecanizar los componentes de un aro para llanta (aluminio) en el menor tiempo posible; teniendo como variables el diámetro del cortador, los filos de corte, la velocidad de corte, el avance por diente y otros. Como parámetro de control midieron el tiempo de mecanizado. (Romero, Pablo;Rodriguez, Oscar; Guerrero, Guillermo; Dorado, 2018)

1.4.1 Caracterización del material

“Duralón”, figura 1.1, es el nombre comercial que toma los termoplásticos del grupo UHMW 1900 (Polietileno de ultra alto peso molecular) de los Etilenos; el nombre de UHMWPE corresponde a la nomenclatura otorgada por ASTM. A nivel mundial el consumo y fabricación de termoplásticos “Polietileno” representa cerca del 40%, esperándose así un gradual aumento en las próximas décadas. (Ullmann, 2016).



Figura 1.1: Duralón disponible en barras y planchas.

Entre las principales ventajas que presenta este material están: su baja densidad, baja reactividad química, auto lubricación, facilidad de procesamiento, entre otros. Además, posee excelentes propiedades físicas destinadas a aplicaciones ingenieriles, por lo cual, tiene buena capacidad para ser maquinado. Las aplicaciones más comunes de este tipo de

material son: revestimiento para el interior de equipos transportadores, tanques y equipos en contacto con agentes abrasivos; fabricación de elementos mecánicos en el sector alimenticio y rótulas en el campo de la medicina.

En la tabla 1.1, se presenta un resumen con las propiedades químicas y físicas.

Tabla 1.1: Características del UHMW 1900 – Duralón

#	PROPIEDADES	NORMA ASTM	UNIDAD	UHMW 1900
1	Resistencia a la tracción	D638	PSI	2500 – 3500
2	Elongación %	D638	%	300 – 500
3	Resistencia a la compresión	D695	PSI	2400
4	Resistencia a la flexión	D790	PSI	1000
5	Dureza Rockwell	D785	-	D60 – 70 Shore
6	Módulo de flexión	D790	PSI x 10E5	1.30 -1.40
7	Módulo de tracción	D638	PSI x 10E5	0.20 – 1.10
8	Módulo de compresión	D695	PSI x 10E5	-
9	Peso específico	D638	g/cm ³	0.94
10	Conductividad térmica	C177	10E-1 cal/cm ³ s	11 – 12.4
11	Calor específico	-	Cal/ g °C	0.55
12	Resistencia al calor continuo	-	°C	119
13	Absorción de agua (24 h 1/8" esp)	D570	%	<0.01
Información proporcionada por el distribuidor "HERRAQUIN S.A"				

1.4.2 Fresado de cavidades

El fresado de cavidades corresponde a una operación del fresado frontal, es decir, el eje de rotación de la herramienta de corte es perpendicular a la superficie de trabajo, y la presencia de descensos en el interior de la materia prima (área de trabajo) generan la cavidad. (Groover, 2020)

Las geometrías adoptadas para la cavidad van a depender de los requerimientos geométricos de la pieza final, pero básicamente se pueden presentar secciones transversales como: cuadrados, círculos, óvalos y la combinación eficaz de todos ellos. Para cualquier caso, se desarrolla un

proceso de desbaste (remoción de material) y luego el proceso de acabado (forma y dimensiones finales).

Una limitante de la fabricación de cavidades de sección cuadrada es la presencia de esquinas redondeadas y empalmes en el fondo de la pieza producto del radio de la punta del cortador, por lo que se lo establece como una restricción en el diseño.

Las piezas como: moldes de inyección, troqueles, bocines, cajas para alojar mecanismos están conformados por varias formas básicas en las que se puede aplicar la técnica de fresado de cavidades. En cuanto a los tipos de trayectorias para fresar una cavidad los más comunes son: el zigzag y corte en un sentido (de adentro hacia afuera, de afuera hacia a dentro), pero en el caso de optar por una programación mediante software, se puede disponer muchas más trayectorias como la de corte en espiral, esférica, etc., pudiendo incluso, presentar variantes dependiendo de la complejidad de la cavidad o del tipo de entrada disponible a la materia prima a cortar. (Smid, 2007)

La selección adecuada de la trayectoria de corte favorecerá al tiempo de mecanizado, desalojo de viruta con efectos en la rugosidad superficial, vibraciones presentes, etc.

1.4.3 Definición de parámetros de corte

Los parámetros de corte o condiciones de corte son el conjunto de variables que se necesitan controlar para que se efectúe el arranque de viruta, siendo estas: la velocidad de corte, velocidad de rotación del husillo, la velocidad de avance y la profundidad de penetración. (Groover, 2020)

- **Velocidad de corte:** Es la relación que determina la razón de giro del filo cortante respecto al material de trabajo; esta magnitud es estudiada para cada material en particular, por lo que es proporcionada por catálogos de selección de herramientas o por fabricantes de materias

primas. (Hanson, 2018)

La fórmula 1.1 se utiliza para calcular esta variable:

$$V_c \left[\frac{m}{min} \right] = \frac{N * \pi * \phi}{1000} \quad (1.1)$$

Donde, N es la velocidad de rotación del husillo en RPM y ϕ es el diámetro de la fresa en mm. Si se despeja N de la ecuación anterior, es posible calcular la velocidad del husillo.

- **Velocidad de rotación del husillo:** Corresponde a la velocidad angular transferida a la herramienta de corte desde la máquina, para calcularla se relaciona a la velocidad corte V_c (m/min) y el diámetro de la fresa (mm) con la misma fórmula presentada en la ecuación 1.1.
- **Avance:** Definida como la velocidad con la que se desplaza lateralmente el husillo, es decir, en el plano xy. (Groover, 2020)

La fórmula 1.2 se emplea para calcular la velocidad de avance:

$$f_{xy} \left[\frac{mm}{min} \right] = nNfk \quad (1.2)$$

Donde; n es el número de dientes o filos de corte de la fresa, N la velocidad de rotación del husillo (RPM), f es el avance por diente y k corresponde a un factor adimensional de corrección (el factor de corrección k tiene como finalidad aumentar o disminuir la proporción entre la velocidad del husillo y el avance en xy).

El avance por diente, se lo entiende como la longitud del material que recorre por cada filo de la herramienta de corte; este suele ser un parámetro proporcionado por fabricante de la materia prima o por el fabricante de la herramienta de corte, f se lo expresa en mm/diente.

(Kalpakjian, Serope; Schmid, 2009)

- **Profundidad de corte:** También conocida como descenso axial, es la profundidad de penetración de la herramienta de corte en el material; generalmente se nombra con las letras “Ap”.

La proporción o magnitud de las condiciones de corte están generalmente definidas por la materia prima y por la capacidad de la máquina. Sin embargo, también se considera la forma de sujeción y la presencia de refrigerante. En base a dichas condiciones, se establecen variables de control, como, por ejemplo: tolerancias geométricas y dimensionales, fuerza y potencia de corte, acabado superficial (rugosidad), fallo y desgaste de la herramienta de corte; y aspectos ligados a la economía del mecanizado. (El-Hofy, 2019)

Para el mecanizado de Duralón (UHMW 1900), el fabricante de herramientas de corte “IZAR Tool” recomienda revoluciones en el rango de las 9000-9500 RPM y un avance de 478 mm/min para el corte de termoplásticos en procesos de acabado; utilizando un cortador de HSS de 2 filos con 6 mm de diámetro. Por otra parte, (Kalpakjian, Serope; Schmid, 2009) en la tabla 24.2 establece que para el fresado de termoplásticos la velocidad de corte debe estar en el rango de 270 a 460 m/min y el avance en el rango 0.13 a 0.23 mm/diente. La selección de los parámetros de corte depende de varios factores que faciliten la maquinabilidad de los termoplásticos, que está estrechamente relacionada con las propiedades del material y condiciones de corte. Existen recomendaciones muy básicas proporcionadas por fabricantes, por lo que, cada laboratorio o taller mecánico deberá definir sus propios valores. (Kurtz, 2004)

1.4.4 Consumo energético en el proceso de corte

El análisis del consumo energético es un campo relativamente nuevo que surge por las normativas en favor del medio ambiente y de la necesidad de la industria por optimizar sus procesos. Para realizar un estudio profundo de los consumos en las máquinas herramientas, es necesario seccionar el sistema global de acuerdo con el funcionamiento del equipo, esto se refleja

en la Figura 1.3. De esta forma, es posible conocer que componente implica un mayor consumo de energía con la finalidad de optimizarlo.

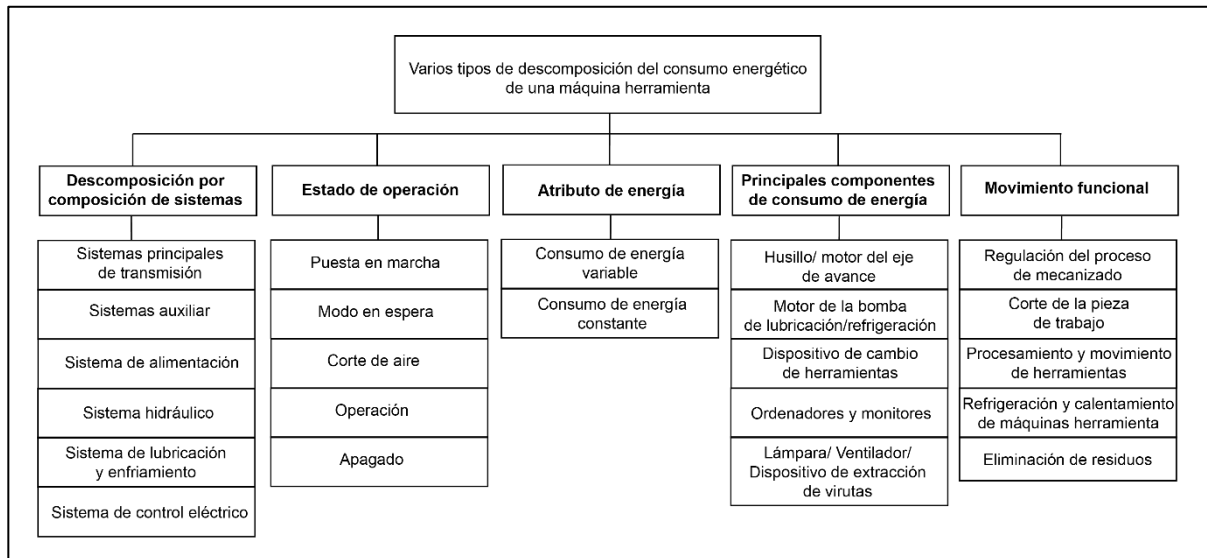


Figura 1.2: Descomposición del consumo de energía de una máquina herramienta.
(L. Zhou et al., 2016)

Se entiende por **potencia eléctrica** a la cantidad de energía transferida en un sistema en función del tiempo, dicho de otra forma, es la cantidad de energía demandada por los componentes eléctricos para ejecutar un trabajo. El consumo energético es una métrica implicada en la generación y el consumo de energía, expresada en Kwh (Kilovatio hora). (LEADER Carlow, 2007)

La potencia demandada durante el proceso de fresado debe de considerar todas sus fases, esto garantizará que el análisis sea real. En la figura 1.3 se puede apreciar los picos en fases preparatorias y un consumo constante durante el proceso de corte.

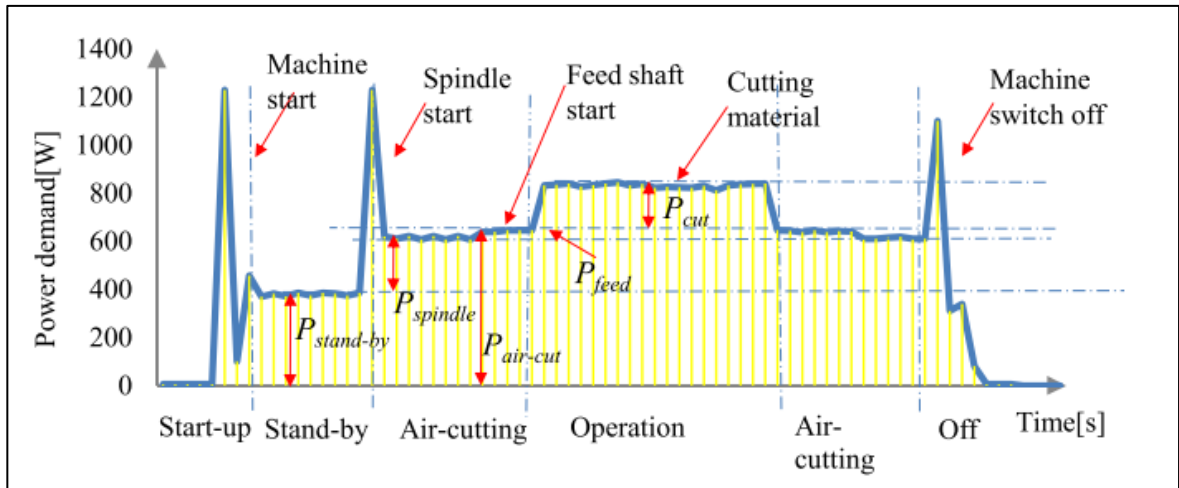


Figura 1.3: Diagrama esquemático del perfil de potencia del proceso de fresado.
(L. Zhou et al., 2016)

Los estudios enfocados en la eficiencia energética se pueden centrar en dos áreas: modelos de predicción y optimización de consumo energético. (Shin et al., 2017) Los modelos de predicción de energía consisten en modelos matemáticos que buscan explicar el comportamiento del flujo de energía en un sistema, en base a parámetros de consumo, entre ellos: SEC (Specific Energy Consumption), MRR (Material Removal Rate), Potencia y Energía de Corte. (He et al., 2012) Por otra parte, la optimización de consumo energético se lleva a cabo mediante datos recopilados sobre el proceso de fabricación (potencia, consumo, amperaje, etc) para relacionarlos con la trayectoria programada de la geometría a fresar, recordando la presencia de varios elementos que demandan potencia. (Shin et al., 2017)

1.4.5 Rugosidad superficial

La rugosidad superficial (figura 1.4) es un término que describe la textura superficial microscópica de un objeto, revelando la integridad que posee después de formar parte de un proceso de manufactura. (Groover, 2020) Desde un punto de vista técnico, la rugosidad superficial mide la distancia entre picos y valles presente en la superficie, entre más grande sea este valor, favorecerá el agarre mecánico entre dos superficies puestas en contacto, es decir, aumenta la fricción entre ellos. Sin embargo, la presencia de valles profundos genera concentradores de esfuerzos,

aparición de grietas y desgaste, por tal motivo surge la necesidad de analizar y controlar la textura superficial. (Dwivedi, 2018)

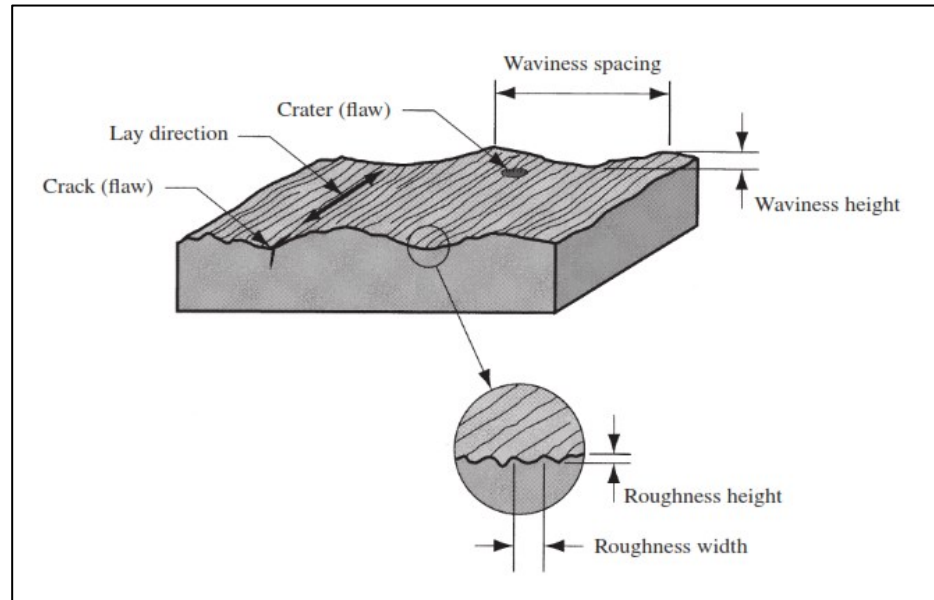


Figura 1.4: Características de la textura superficial.(Groover, 2020)

Rugosidad media aritmética (R_a): Es el parámetro de textura superficial que proporciona el promedio aritmético de las desviaciones de rugosidad filtradas a partir de la línea central, considerando el tramo evaluado. Utilizar el valor de R_a resulta práctico y fiable para piezas procedentes de procesos de mecanización con marcas definidas claramente, pese a esto, presenta cierta desventaja al no caracterizar completamente al perfil medido. (Black et al., 2002)

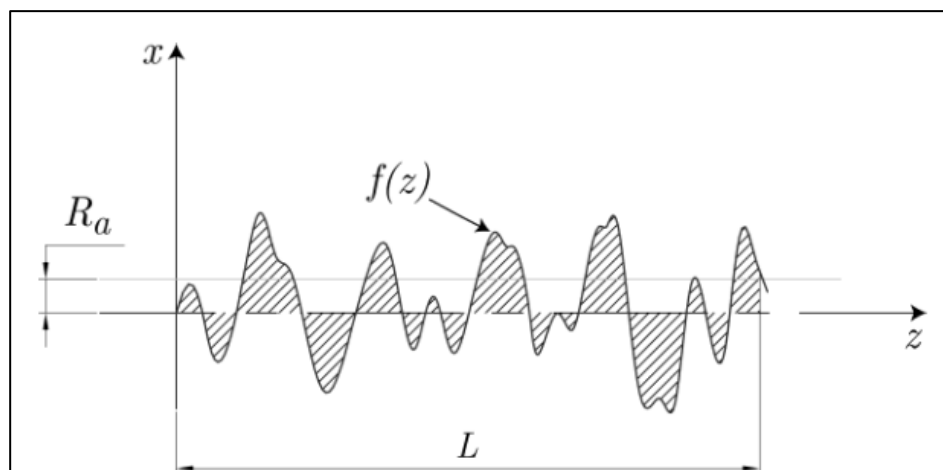


Figura 1.5: Representación gráfica del parámetro R_a . (Bacca et al., 2015)

Como se muestra en la figura 1.6, para cada proceso de fabricación se obtiene una rugosidad superficial específica, que, es medida por medio de un rango de valores Ra. Por ejemplo, los valores típicos esperados en el proceso de fresado se encuentran en el rango de 0.8 a 6 μm .

Process	Typical Finish	Roughness Range (μm (μ -in)) ^a	Process	Typical Finish	Roughness Range (μm (μ -in)) ^a
Casting			Abrasive		
Die casting	Good	1-2 (30-65)	Grinding	Very good	0.1-2 (5-75)
Investment	Good	1.5-3 (50-100)	Honing	Very good	0.1-1 (4-30)
Sand casting	Poor	12-25 (500-1000)	Lapping	Excellent	0.05-0.5 (2-15)
Metal forming			Polishing	Excellent	0.1-0.5 (5-15)
Cold rolling	Good	1-3 (25-125)	Superfinishing	Excellent	0.02-0.3 (1-10)
Sheet metal draw	Good	1-3 (25-125)	Nontraditional		
Cold extrusion	Good	1-4 (30-150)	Chemical milling	Medium	1.5-5 (50-200)
Hot rolling	Poor	12-25 (500-1000)	Electrochemical	Good	0.2-2 (10-100)
Machining			Electric discharge	Medium	1.5-15 (50-500)
Boring	Good	0.5-6 (15-250)	Electron beam	Medium	1.5-15 (50-500)
Drilling	Medium	0.8-6 (30-250)	Laser beam	Medium	1.5-15 (50-500)
Milling	Good	0.8-6 (30-250)	Thermal		
Reaming	Good	1-3 (30-125)	Arc welding	Poor	5-25 (250-1000)
Shaping/planning	Medium	1.5-12 (60-500)	Flame cutting	Poor	12-25 (500-1000)
Sawing	Poor	3-25 (100-1000)	Plasma arc cutting	Poor	12-25 (500-1000)
Turning	Good	0.5-6 (15-250)			

Figura 1.6: Rugosidad superficial esperados en procesos de manufactura (Groover, 2020)

El acabado superficial, en procesos de mecanizado, se ve afectado por factores propios de la operación de corte, externos o aleatorios (choque, arrastre de viruta, etc.). En la figura 1.7 se presenta un resumen de los factores que afectan a la rugosidad superficial durante el proceso de corte.

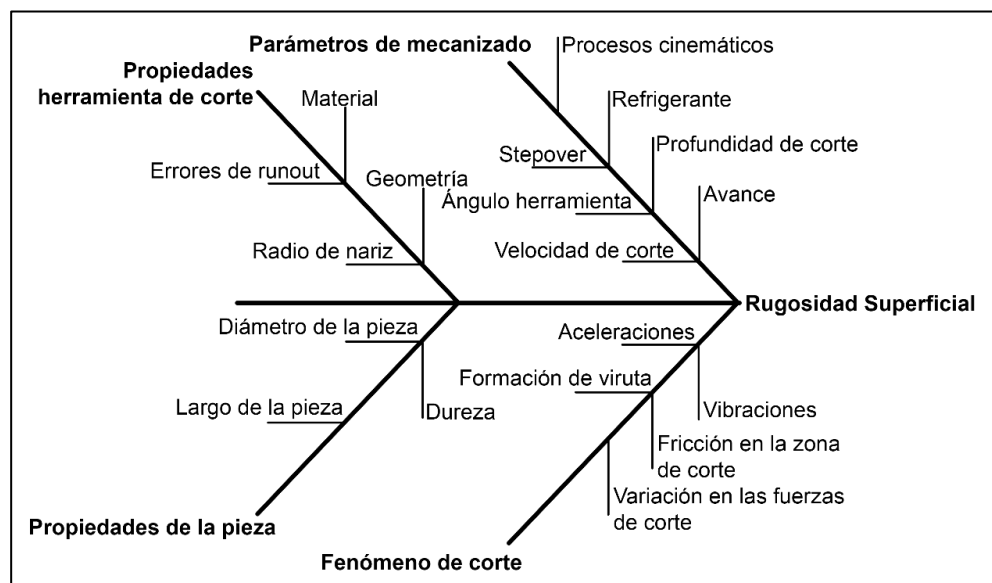


Figura 1.7: Factores que afectan a la rugosidad superficial (Correa et al., 2004)

Para la medición de rugosidad superficial, existen tres métodos: comparación con patrones de rugosidad (visual y táctil), instrumentos electrónicos de aguja y técnicas ópticas. (Groover, 2020)

El método más empleado es el de instrumentos electrónicos de aguja, que es un sistema conformado por un brazo integrado a un mecanismo de arrastre. La finalidad es provocar que un palpador con punta de diamante, radio finito y un patín se adapten al perfil superficial de la muestra, de tal manera que, permitan promediar la rugosidad.

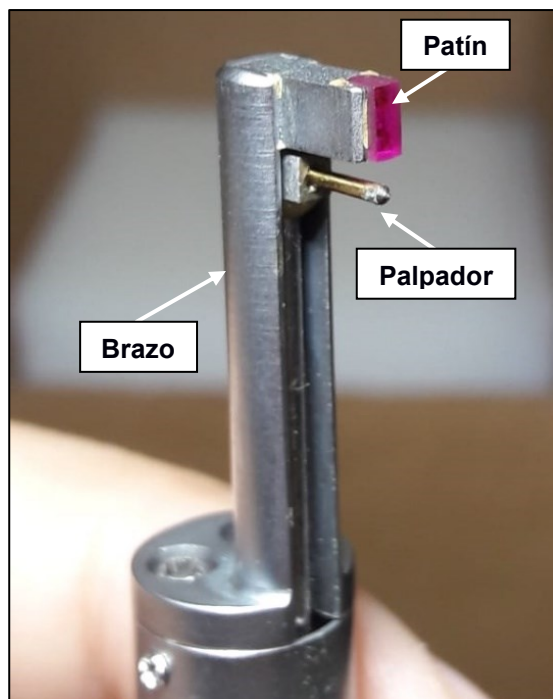


Figura 1.8: Componentes del rugosímetro.

Entre las principales limitaciones al medir con este sistema están:

- La ola del perfil de rugosidad es afectada por el desplazamiento del patín, esto se puede apreciar cuando se realiza una segunda toma en el mismo tramo.
- La punta del palpador no puede penetrar en surcos de menor tamaño que su radio.
- Los gráficos proporcionados por dichos instrumentos presentan cierta distorsión de escala entre ejes, ya que buscan presentar una curva comprensible del perfil de rugosidad. (Black et al., 2002)

Es necesario tener presente la complejidad involucrada al intentar definir la rugosidad superficial con un valor numérico, ya que, posee un carácter tridimensional. Además, por diversos factores inmersos en el mecanizado se pueden presentar fallos puntuales. (Black et al., 2002)

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Análisis del problema

Al proyectar la experimentación involucrada en este estudio se presentaron limitaciones económicas, tiempo de ejecución, disponibilidad de equipos y sistemas para la adquisición de datos. Por lo tanto, se plantearon alternativas que cumplan con la intención del estudio, es decir, seleccionar la mejor trayectoria de corte para el fresado de cavidades que brinde el menor tiempo de mecanizado, proporcione el mejor acabado superficial y optimice los recursos disponibles. La metodología para la selección de la mejor alternativa corresponde a la “matriz de priorización” con “el método del criterio analítico completo”(Camisón et al., 2006)

2.1.1 Caja negra

La intención del estudio se puede visualizar a través de la caja negra mostrada en la figura 2.1:

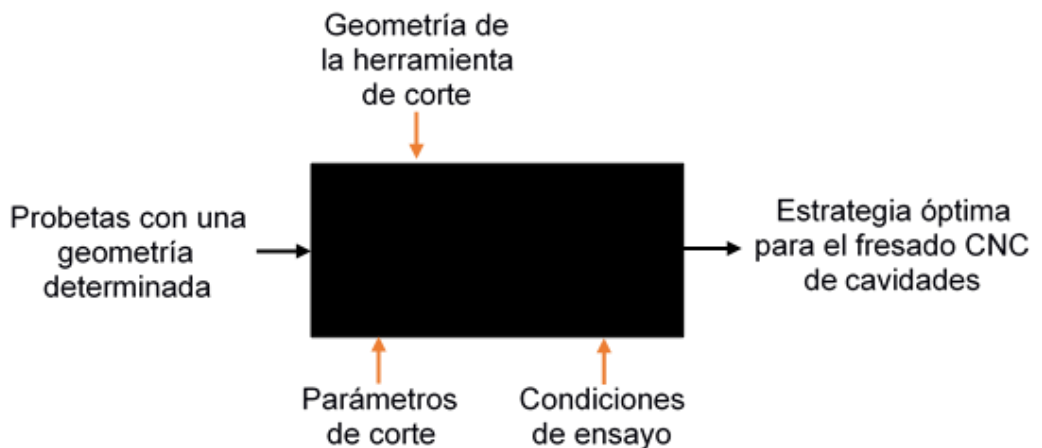


Figura 2.1: Caja negra.

Dentro de la “caja negra”, o metodología desconocida, se encuentran aspectos como: selección de materia prima, tipo de máquina, variables de corte, parámetros de control, instrumentos de medición, procesamiento de

datos, análisis de resultados e inclusive el proceso iterativo para optimizar la experimentación.

2.1.2 Planteamiento de metodología

Para el planteamiento de la metodología se deben definir: el objetivo del estudio, los criterios de selección, la importancia y los pesos de cada criterio.

- **Objetivo por conseguir**

“Estudiar la influencia de los parámetros de corte en diferentes estrategias para fresado CNC de cavidades”

- **Criterios de selección**

- ✓ **Criterio 1:** Disponibilidad de equipos (maquinaria e instrumentos).
- ✓ **Criterio 2:** Cantidad de variables y parámetros de control.
- ✓ **Criterio 3:** Menor costo de implementación.
- ✓ **Criterio 4:** Menor tiempo de ejecución y análisis.

- **Importancia relativa entre criterios**

La escala utilizada para juzgar los criterios (Camisón et al., 2006) fue la siguiente:

1 = Igualdad en importancia – preferencia

2 = Más importante – preferido

5 = Significativamente más importante – preferido

El orden para leer y evaluar se realizó desde cada fila, como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Matriz de importancia relativa entre criterios

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Total (% Total Global)
Criterio 1		1	2	1	4 (0.25)
Criterio 2	1/1		5	2	8 (0.5)
Criterio 3	1/2	1/5		1	1.7 (0.1)
Criterio 4	1/1	1/2	1/1		2.5 (0.15)
Total columna	2.5	1.7	8	4	16.2

La tabla 2.1 cuantifica la importancia relativa de cada criterio entre ellos mismos. Se puede observar que, el criterio 1 (disponibilidad de la máquina) tiene igual importancia que el criterio 2 (cantidad de variables y parámetros de control) porque ambos son un limitante del proyecto, de no existir uno de ellos no habría razón de estudio. A su vez, el criterio 1 es más importante que el criterio 3 (costo de implementación) e igual de importante que el criterio 4 (tiempo de ejecución). Estos grados de importancia son fijados de acuerdo con los requerimientos del estudio y por los objetivos planteados.

- **Pesos específicos**

La tabla 2.2 muestra los pesos específicos asignados a cada criterio evaluado.

Tabla 2.2: Pesos específicos de los criterios

Criterio 2	Cantidad de variables y parámetros de control	50%
Criterio 1	Disponibilidad de equipos	25 %
Criterio 4	Menor tiempo de ejecución y análisis	15 %
Criterio 3	Menor costos de implementación	10 %

La cantidad de variables y parámetros de control tiene el mayor peso debido a la necesidad de enriquecer la experimentación con la mayor cantidad de datos, lo que permite analizar y concluir varios aspectos.

2.2 Selección de la mejor alternativa

El proyecto tuvo como finalidad analizar tres estrategias de corte (las más empleadas en industria) para el fresado CNC de una cavidad de sección cuadrada con 4 mm de espesor. Por lo tanto, las alternativas para la

experimentación correspondieron a la combinación de las variables de corte y los parámetros de control en el proceso de mecanizado.

A continuación, se describen las alternativas en base a los equipos disponibles en el laboratorio y equipos deseables por utilizar:

- **Alternativa 1:** Ensayar cavidades en el centro de mecanizado industrial “LUNAN XH7 132A” con un cortador de cuatro filos y 4 mm de descenso, para ello, se utilizarán probetas elaboradas de AISI P-20 (material para moldes). Los parámetros variables serán: velocidad del husillo, avance, diámetro de fresa, por lo que se deberán ensayar 81 probetas. En cuanto a los parámetros de control, se medirá: tiempo de mecanizado, fuerza de corte y rugosidad superficial.
- **Alternativa 2:** Ensayar cavidades en termoplástico “Duralón”, debido a que es un material utilizado ampliamente por la industria, es económico, requiere un proceso más “liviano” para mecanizarlo y puede ser utilizado para el proceso de prototipado. Se empleará la fresadora de precisión “Roland MDX- 40A” equipada con un cortador de dos filos con 1 mm de descenso por capa. Los parámetros a variar son: velocidad del husillo, avance, diámetro de fresa, siendo necesario ensayar 81 probetas. En cuanto a los parámetros de control, se medirá: tiempo de mecanizado, potencia, consumo energético y rugosidad superficial.
- **Alternativa 3:** Ensayar “Duralón” como material base en el centro de mecanizado Roland con un cortador de cuatro filos y 1 mm de descenso. Los parámetros variables serán: velocidad del husillo y avance, por lo que, se requieren 27 probetas. Como parámetros de control se medirán: tiempo de mecanizado, potencia, consumo energético y rugosidad superficial.

En la tabla 2.3 se describen a detalle las diferentes alternativas de diseño planteadas.

Tabla 2.3: Descripción de alternativas de diseño.

ASPECTOS	ALTERNATIVAS		
	1	2	3
Material	AISI P-20	Duralón	Duralón
Máquina	Fresadora CNC LUNAN XH7 132A	Roland MDX 40A	Roland MDX 40A
Filos de corte	4	2	4
Ap [mm]	4	1	1
Variables	Velocidad del husillo Avance lineal Diámetro de fresa	Velocidad del husillo Avance lineal Diámetro de fresa	Velocidad del husillo Avance lineal
Parámetros de control	Tiempo de mecanizado Fuerza de corte Rugosidad superficial	Tiempo de mecanizado Potencia Consumo energético Rugosidad superficial	Tiempo de mecanizado Potencia Consumo energético Rugosidad superficial
Cantidad de probetas	81	81	27

2.2.1 Ponderación de criterios

A continuación, en las tablas 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 se determina por medio de comparación por pares la contribución de cada alternativa para cada uno de los criterios de selección.

La escala utilizada para evaluar fue la siguiente:

1= Igualdad de impacto en el criterio

2= Más impacto en el criterio

5=Significativamente más impacto

Tabla 2.4: Matriz para el criterio 2 “Cantidad de variables y parámetros de control”

Criterio 2	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Total (% Total Global)
Alternativa 1		1/2	1/2	1 (0.133)
Alternativa 2	2		2	4 (0.533)
Alternativa 3	2	1/2		2.5(0.333)
Total columna	4	1	2.5	7.5

La tabla 2.4 muestra que las alternativas 2 y 3 tienen mayor impacto en el criterio de implementar mayor cantidad de variables y parámetros de control.

Tabla 2.5: Matriz para el criterio 1 “Disponibilidad de equipos”

Criterio 1	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Total (% Total Global)
Alternativa 1		1/5	1/5	0.4 (0.032)
Alternativa 2	5		1/1	6 (0.484)
Alternativa 3	5	1		6 (0.484)
Total columna	10	1.2	1.2	12.4

La tabla 2.5 muestra que las alternativas 2 y 3 tienen mayor impacto en el criterio sobre implementar equipos de fácil acceso.

Tabla 2.6: Matriz para el criterio 4 “Menor tiempo de ejecución y análisis”

Criterio 4	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Total (% Total Global)
Alternativa 1		1/1	1/5	1.2 (0.097)
Alternativa 2	1		1/5	1.2 (0.097)
Alternativa 3	5	5		10 (0.806)
Total columna	6	6	0.4	12.4

Como se muestra en la tabla 2.6, al tratarse del criterio “menor tiempo de ejecución” se observa que la alternativa 3 puede ser implementada en menor tiempo, ya que tiene como objetivo el maquinado y análisis de 27 probetas.

Tabla 2.7: Matriz para el criterio 3 “Menor costo de implementación”

Criterio 3	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Total (% Total Global)
Alternativa 1		1/1	1/5	1.2 (0.097)
Alternativa 2	1		1/5	1.2 (0.097)
Alternativa 3	5	5		10 (0.806)
Total columna	6	6	0.4	12.4

La tabla 2.7 muestra que la alternativa 3 tiene mayor impacto en el criterio “Menor costos de implementación”, esto se debe a que, utiliza el menor número de probetas con un material de ensayo de menor costo y las fresas rectas de 4 filos son relativamente más económicas que las de dos filos.

2.2.2 Matriz de priorización

En la tabla 2.8 se muestra la matriz de priorización con los resultados de impacto obtenidos por cada alternativa en base a los criterios de diseño establecidos.

Tabla 2.8: Matriz de priorización

	Cantidad de variables y parámetros de control	Disponibilidad de equipos	Menor tiempo de ejecución y análisis	Menos costos de implementación	Totales de fila (% Total)
Alt 1	0.133x0.5 (0.067)	0.032 x0.25 (0.008)	0.097x0.15 (0.015)	0.097x0.1 (0.010)	(0.099)
Alt 2	0.533 x0.5 (0.267)	0.484 x0.25 (0.121)	0.097x0.15 (0.015)	0.097x0.1 (0.010)	(0.412)
Alt 3	0.333 x0.5 (0.167)	0.484x0.25 (0.121)	0.806x0.15 (0.121)	0.806x0.1 (0.081)	(0.489)
% Total Global	0.5	0.25	0.15	0.10	1

De acuerdo con la tabla 2.8, se determinó que la alternativa 3 posee el mayor peso (0.489/1) con respecto al resto de opciones, es decir, cumple mayormente con los criterios o intensidad del estudio. Por tal motivo, el ensayo a implementar contó con las siguientes características:

Tabla 2.9: Alternativa implementada

ASPECTOS	Alternativa 3
Material	Duralón
Máquina	Roland MDX-40A
Filos de corte	4
Ap [mm]	1
Variables	Velocidad del husillo Avance lineal
Parámetros de control	Tiempo de mecanizado Potencia Consumo energético Rugosidad superficial
Cantidad de probetas	27

2.3 Planteamiento experimental

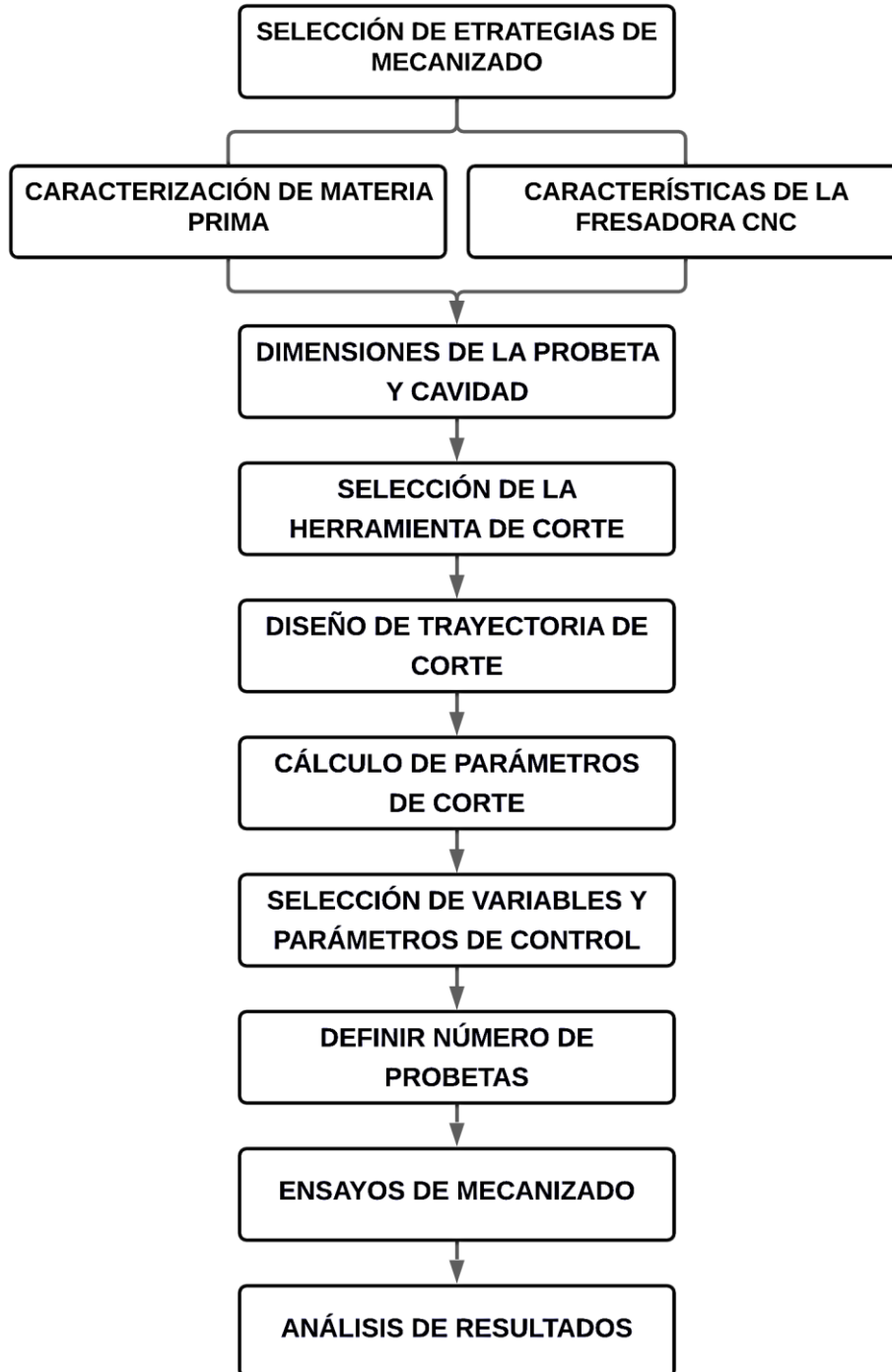


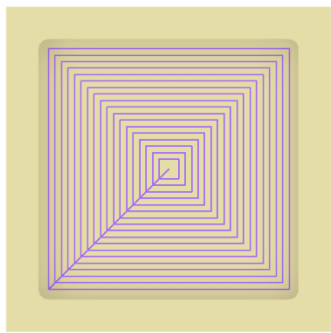
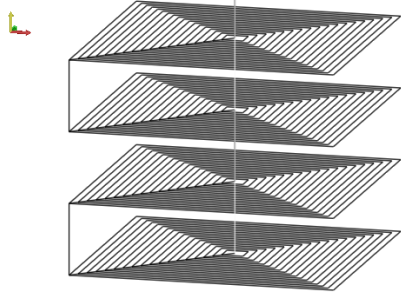
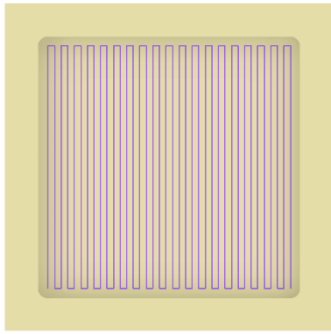
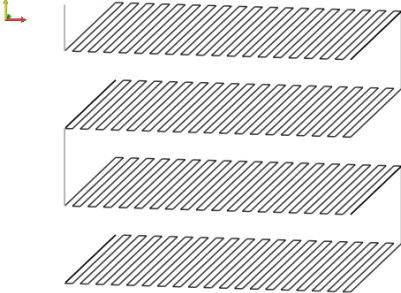
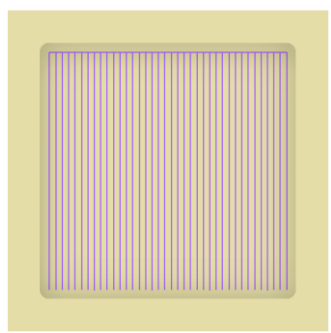
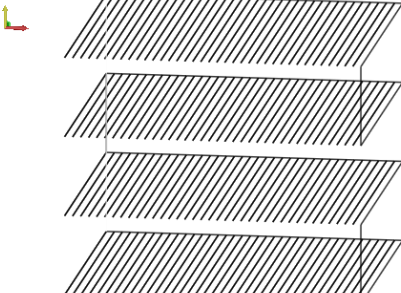
Figura 2.2: Diagrama de flujo del planteamiento experimental.

2.4 Diseño detallado

2.4.1 Selección de estrategias de mecanizado

La tabla 2.10, resume las estrategias empleadas para los ensayos de mecanizado (corte en espiral, zigzag y corte en un sentido) y las cuales fueron ensayadas para determinar, bajo los aspectos de tiempo, rugosidad, consumo energético y potencia demandada, su eficiencia en el fresado de cavidades.

Tabla 2.10: Estrategias de mecanizado.

ESQUEMA	TRAYECTORIA DE CORTE	NOMBRE
		CORTE ESPIRAL
		ZIGZAG
		CORTE EN UN SENTIDO

2.4.2 Caracterización de materia prima

El desarrollo de este componente fue presentado en la sección 1.4.1, además, se proporciona en la tabla 1.1 las principales características físicas y químicas del Duralón.

2.4.3 Características de la fresadora CNC

El equipo seleccionado fue la fresadora de precisión Roland MDX-40A (Figura 2.2).



Figura 2.3: Fresadora Roland MDX-40A.

En la tabla 2.11 se presentan las características técnicas de la fresadora CNC mencionada:

Tabla 2.11: Características de la máquina.

Modelo	MDX40A
Dimensiones de bancada	305 x 305 mm
Desplazamientos verticales	105 mm
Velocidad del husillo	4500 a 15000 RPM
Avance (f) eje xy **	7 a 3000 mm/min *
Avance (f) eje z **	7 a 1800 mm/min *
Motor de husillo	Motor de CC sin escobillas -máximo 100 W
Consumo energético	Aprox. 210 W
*Paso de 2 mm/min. para 7 a 60 mm/min Paso de 60 mm/min. para 60 a 3000 mm/min ** Cuando no se indica el avance, por defecto se definirá 120 mm/min (Roland, 2010)	

Adicionalmente, la figura 2.3 muestra las dimensiones de la bancada, la cual fue considerada para definir las dimensiones de las probetas y la ubicación del área de fijación.

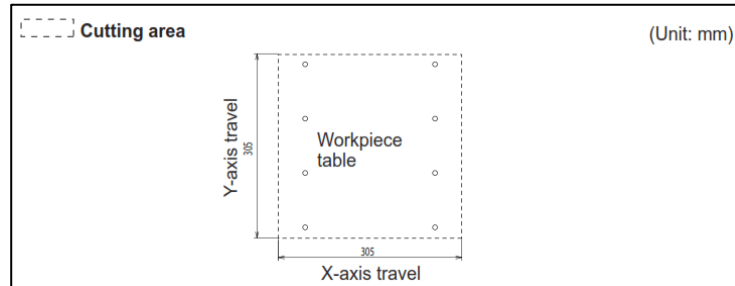


Figura 2.4: Área de trabajo (Roland, 2010)

2.4.4 Dimensiones de la probeta y cavidad

Debido que, la geometría de la cavidad establecida para el estudio es un cuadrado, se consideró también dicha geometría para la forma de la probeta (figura 2.4), adicionalmente es una forma sencilla de fabricar.

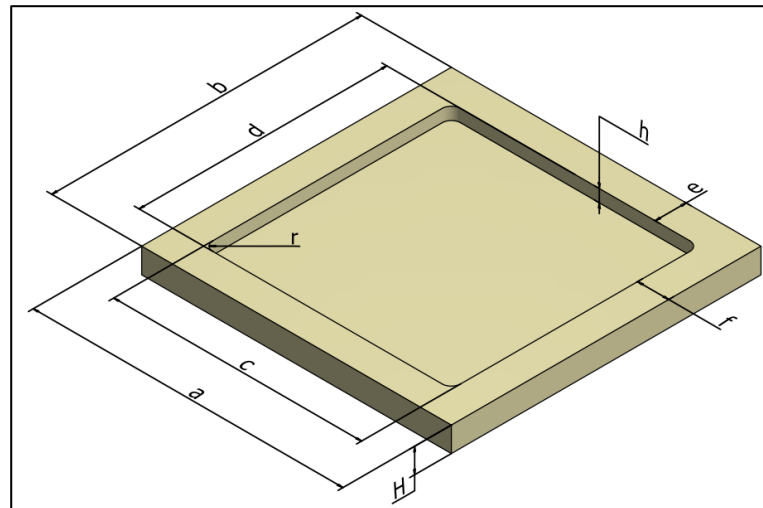


Figura 2.5: Probeta cuadrada.

En la tabla 2.12 se establecen las dimensiones de la probeta diseñada para el estudio.

Tabla 2.12: Dimensiones de la probeta [mm]

	a	b	c	d	e	f	r	H	h
PROBETA	100	100	80	80	10	10	3	8	4

2.4.5 Selección de herramienta de corte

La literatura técnica recomienda mecanizar termoplásticos con el menor número de filos de corte, esto permite mejorar la formación de viruta y adicionalmente, disminuye el tiempo de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, generando menos temperatura de corte.

La herramienta utilizada fue una fresa recta de cuatro puntas, de acero rápido (HSS) y de 6 mm de diámetro. Se optó por la fresa de cuatro puntas debido a que el número de filos (n) es un factor en el cálculo del avance (ecuación 1.3), el mismo que determina un bajo tiempo de mecanizado.

2.4.6 Diseño de la trayectoria de corte

Las trayectorias de corte fueron diseñadas de forma manual o tradicional (sin ayuda de un software CAM), ya que se buscó ensayar las estrategias desde su forma “básica”, es decir, sin acciones o comandos que optimicen el proceso de corte, como por ejemplo: entradas de rampa, trayectorias mixtas, diferentes posiciones de entrada y salida de una capa, desfoces de viruta, etc.(Yin et al., 2015)

A continuación, se presentan los detalles de las trayectorias de corte:

- **Radio en equinas de la cavidad:** Se lo consideró igual al radio de la herramienta de corte, es decir, 3 mm. Por lo tanto, la última línea de corte posee un desfase igual al radio y diferente a la distancia entre líneas de corte.
- **Incremento de pasada lateral:** Este término corresponde al espaciado entre las líneas de corte en una estrategia; la finalidad de definir correctamente este valor se debe a que, si es superior al radio de la herramienta, se dejará exceso de material, pero si es menor al radio, ese exceso será arrancado por la herramienta.

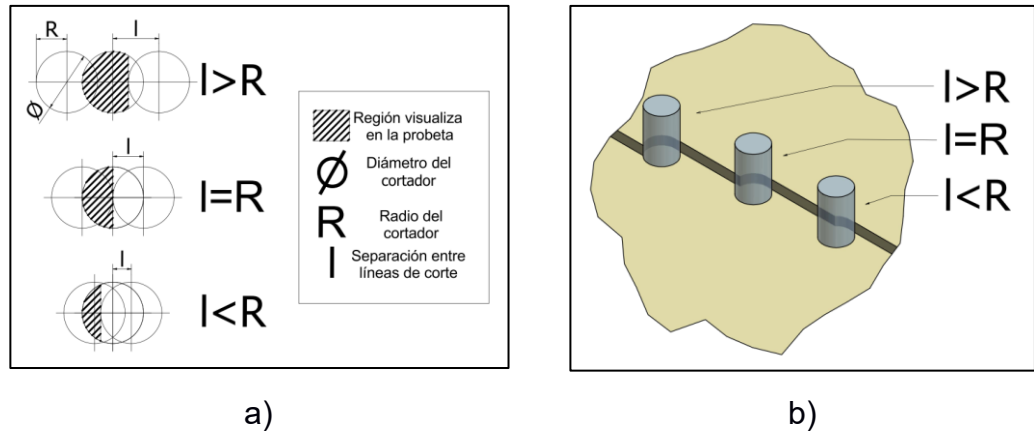


Figura 2.6: Tipos de incremento en pasada lateral: a) especificaciones, b) visualización del corte.

Para este ensayo, se optó por 2 mm de espaciado entre líneas de corte, considerando que, de esta forma existirá menor área de contacto entre la fresa y el material, es decir, el tercer caso de la figura 2.6.

- **Profundidad de corte axial:** Para el mecanizado de Duralón, el fabricante (RedWood, 2021) recomienda utilizar descensos superiores a 0.3 mm (A_p), independientemente de la etapa (desbaste o acabado). Para definir este valor se tuvo presente los siguientes factores: potencia de la máquina, rigidez del porta-herramienta y material de la herramienta de corte. Por lo tanto, se trabajó con un descenso de 1 mm por capa (correspondiente a la etapa de desbaste) permitiendo completar la cavidad en cuatro descensos.

2.4.7 Cálculo de los parámetros de corte

Los valores de la velocidad de corte y avance lineal fueron fijados teniendo presente los máximos admitidos por la máquina (ROLAND), es decir, 15000 RPM y 3000 mm/min (f_{xy}). Al consultar en la bibliografía se obtuvo que para mecanizar termoplásticos la velocidad de corte debe de estar entre 90 y 1370 m/min. Finalmente, Todos los valores de los parámetros de corte fueron seleccionados teniendo en cuenta que, para la experimentación van a variarse en incrementos y decrementos del 25%.

La velocidad de corte seleccionada fue 271.50 m/min, tomado como un valor central entre los rangos establecidos por la máquina y el material, tomando en consideración el porcentaje de variación establecido para los ensayos.

Para calcular la velocidad de rotación se emplea la ecuación 1.1:

$$N = \frac{1000 * \left(271.50 \frac{m}{min}\right)}{\pi * (6 mm)} \approx 14403[RPM]$$

Para definir el avance lineal, se tuvo presente el rango de 0.08 a 0.46 mm/diente (Kalpakjian, Serope; Schmid, 2009) recomendado para el mecanizado de termoplásticos. Sin embargo, estudios previos establecen un tope mínimo de 0.06 mm/diente, ya que, por debajo de este valor la rugosidad superficial se vuelve inestable (Shintoku & Narita, 2017).

A partir de 0.066 mm/diente, se procedió a calcular la velocidad avance:

$$f_{xy} = (0.066) * (4) * (14403 RPM) * (0.526) = 2000 RPM$$

Posteriormente, f_{xy} fue ajustado a 2100 mm/min, debido al requerimiento de paso de la fresadora Roland.

En la tabla 2.3 se muestra el ajuste de los parámetros de corte mediante experimentación con respecto al rango de funcionamiento de la máquina y el rango recomendado para el material mecanizado.

Tabla 2.13: Ajuste de parámetros de corte mediante experimentación.

			a	b	c	
	$N_c \setminus f_c$		2852	3803	4753	$f_c(N_c)$
		$N_a \setminus f_a$	2851	3406	3960	$f_a(N_a)$
1	10803	10800	1a	1b	1c	
2	14403	12900	2a	2b	2c	
3	18004	15000	3a	3b	3c	
	$N_c \setminus f_{ks}$		1711	2282	2852	$f_{ks}(N_c * k_s)$
	$N_c \setminus f_{ke}$		1500	2000	2500	$f_{ke}(N_c * k_e)$
		$N_a \setminus f_{ka}$	1500	2100	2700	f_{ka}

Nc: Velocidad de husillo calculado.
 Na: Velocidad del husillo ajustado con límites de máquinas.
 fc: Avance lineal calculado.
 fa: Avance lineal ajustado con Na.
 fks: Avance lineal con Nc y ks=0.6
 fke: Avance lineal con Nc y ke.
 fka: Avance lineal ajustado a partir de fk.
 ke: factor de corrección experimental - 0.526

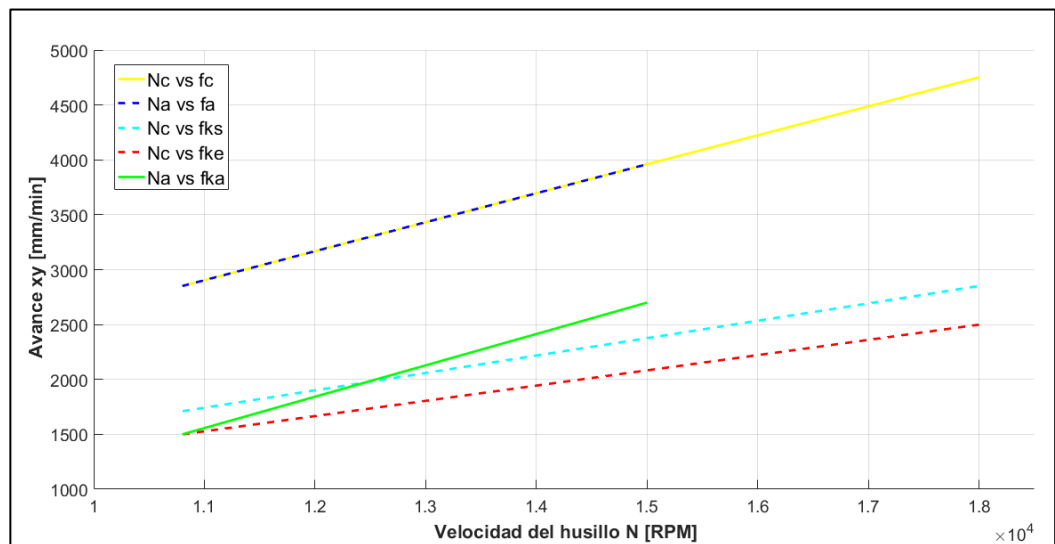


Figura 2.7: Comparación entre parámetros de corte.

La figura 2.6 muestra el proceso de ajuste de los parámetros de corte de los valores calculados (línea amarilla) sin factor de corrección en el avance; los parámetros calculados y ajustados con el factor $k=0.6$ recomendado por IZAR Tool¹ (línea cian); y, posteriormente, con el análisis de la experimentación se concluyó en la necesidad de aumentar la proporción entre N_c y f_c , obteniendo una relación de 0.526, el cual se aproxima al sugerido por el fabricante (línea roja)

¹ IZAR Tool es el fabricante español de herramientas de corte con presencia en Ecuador por el distribuidor SUMIN.

Finalmente, los parámetros seleccionados mediante experimentación corresponden a la combinación Na y fka (tabla 2.13), resumidos a continuación en la tabla 2.14. Dichos valores fueron establecidos tomando en cuenta que se va a variar $\pm 25\%$ para la experimentación.

Tabla 2.14: Parámetros de corte finales

	Vc [m/min]	RPM	f xy [mm/min]	f z* [mm/min]
1	203.63	10800	1500	120
2	271.50	12900	2100	120
3	339	15000	2700	120
*Valor por defecto de máquina Factor de corrección 0.526; ft= 0.066 [mm/diente]; Ap=1 [mm]				

2.4.8 Selección de variables y parámetros de control

- **Variables**

Los parámetros de corte variados en el estudio correspondieron a los especificados en la alternativa 3 (tabla 2.9), seleccionada mediante la matriz de priorización, esto es, la velocidad de rotación del husillo y el avance lineal en función de la velocidad de corte. Se optó por esta configuración porque limitó el ensayo a dos variables, por tanto, menor número de probetas.

- **Parámetros de control**

Los parámetros de control fueron seleccionados en base a la disponibilidad de los instrumentos de medición y objetivo del estudio. Por lo tanto, se seleccionó: el tiempo de mecanización, potencia demandada, consumo energético y rugosidad superficial.

2.4.9 Instrumentos de medición

Los datos recopilados sobre los parámetros de control fueron medidos mediante los siguientes instrumentos:

- **Potencia / Consumo energético:** Se utilizó un medidor de potencia, figura 2.7, el cual fue colocado en el punto de conexión eléctrica de la

fresadora; a continuación, se presentan las características técnicas del equipo resumido en la tabla 2.7.



Figura 2.8: Medidor de parámetros eléctricos BaLDR - BA3091-2. (BaLDR, n.d.)

Tabla 2.15: Características del medidor de energía

Marca	BaLDR
Modelo	BA3091-2
Parámetros de control	Consumo de energía de, emisiones de carbono y el costo de la electricidad.
Parámetros técnicos	
Tensión	125 Vac / 60 Hz
Corriente de carga máxima	15 A
Potencia máxima de carga	1875 W
Condiciones de trabajo	
Tensión de trabajo	110-130 Vac
Frecuencia de tensión	45-65 HZ
Corriente de trabajo	≤16A
Temperatura de trabajo	0-50°C

(BaLDR, n.d.)

- **Rugosidad superficial:** Se utilizó el rugosímetro portátil Phase II SRG-4500 con su respectivo brazo extensor. A continuación, se presenta una ilustración y una tabla con los parámetros del equipo.

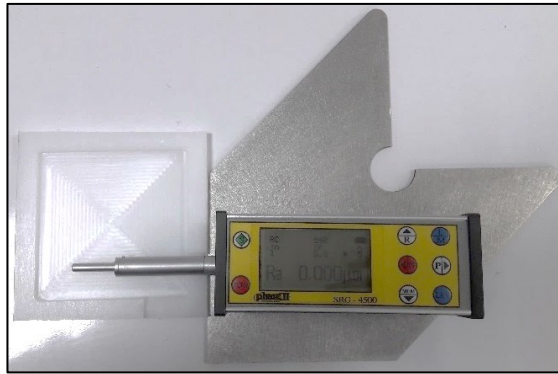


Figura 2.9: Rugosímetro Phase II SRG 4500.

Tabla 2.16: Características del Rugosímetro Phase II SRG 4500

Rango de medición	Eje Z (Vertical)	160 μm
	Eje X (Horizontal)	17.5 mm
Resolución	Eje Z (Vertical)	0.01 μm / $\pm 20 \mu\text{m}$
		0.02 μm / $\pm 40 \mu\text{m}$
Elemento de medida	Parámetros	Ra, Rq, Rz, Rma x, Rt, Rs, RSm, Rmr, RPc
	Estándar	ISO, ANSI, DIN, JIS
	Gráfica	Perfil de rugosidad, curva de relación de materiales, perfil directo.
Filtro		RC, PC-RC, Gauss, D-P
Longitud de muestreo (lr)		0.25, 0.8, 2.5 mm
Duración de la evaluación (ln)		Ln= lr×n; n=1-5
Recolección	Principio	Inductancia diferencial
	Aguja	Diamante natural, ángulo de cono de 90°, punta de 5 μm radio
	Fuerza	<4mN
	Patín	Rubí, radio longitudinal 40 mm
	Velocidad transversal	lr=0.25, Vt=0.135mm/s lr=0.8, Vt=0.5mm/s lr = 2.5, Vt= 1 mm/s Retorno Vt = 1 mm / s
Precisión		Menor o igual a $\pm 10\%$
Repetibilidad		Menor o igual al 6%.
Fuente de alimentación		Batería de iones de litio incorporada, adaptador de CA 8.4V - 800mA
L×W×H		119×47×65mm
Peso		Aproximadamente 380 g

(Phasel, 2014)

2.4.10 Métodos de fijación

Debido a las características de la bancada de la fresadora Roland y al tipo de material, las probetas fueron fijadas con cuatro tiras de cinta adhesiva

de espuma doble faz marca ABRO (94 mm largo x 8 mm ancho x 1 mm espesor) y fueron colocadas de acuerdo con lo mostrado en la figura 2.9.

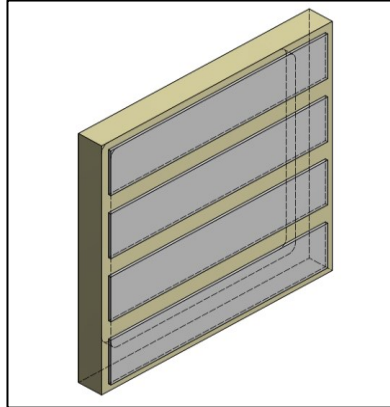


Figura 2.10: Distribución de la cinta en la parte posterior de la probeta.

Por otra parte, para reducir la variabilidad en el centrado y fijación de las probetas en la mesa de la fresadora “Roland” durante el ensayo, y considerando la cantidad de probetas a ensayar, se fabricó un accesorio para centrar las mismas (figura 2.10 a) a la mesa de trabajo, además, se consideró la abertura (figura 2.10 b) necesaria para tomar el cero de pieza en la esquina inferior izquierda.

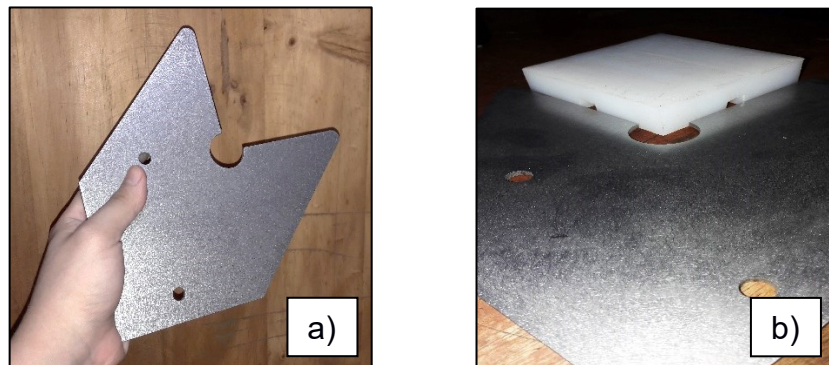


Figura 2.11: Plantilla de centrado: a) Perspectiva b) Detalle de acceso a esquina.

2.4.11 Número de probetas

El número de probetas estuvo limitado a las variables de control consideradas, el número de puntos necesarios para el análisis de las gráficas y la cantidad de trayectorias estudiadas.

$$\#Probetas = (\#de\ puntos)^{\#de\ variables} \\ * (\#de\ estrategias\ de\ corte)$$

$$\#Probetas = (3)^{(2)} * (3) = 27$$

Por lo tanto, fue necesario ensayar 27 probetas con la combinación de los parámetros de corte resumidos en la tabla 2.14. A continuación, se presenta en la tabla 2.17, donde se evidencia la combinación para el ensayo:

Tabla 2.17: Combinación de parámetros de corte.

Nombre del programa	# fresa	# probeta	Estrategia	Ap	RPM	Avance [mm/min]
O2111	1	1	Corte espiral	1	10800	1500
O2112	1	2		1	12900	1500
O2113	1	3		1	15000	1500
O2124	2	4		1	10800	2100
O2125	2	5		1	12900	2100
O2126	2	6		1	15000	2100
O2137	3	7		1	10800	2700
O2138	3	8		1	12900	2700
O2139	3	9		1	15000	2700
O2241	4	10	Zigzag	1	10800	1500
O2242	4	11		1	12900	1500
O2243	4	12		1	15000	1500
O2254	5	13		1	10800	2100
O2255	5	14		1	12900	2100
O2256	5	15		1	15000	2100
O2267	6	16		1	10800	2700
O2268	6	17		1	12900	2700
O2269	6	18		1	15000	2700
O2371	7	19	Corte en un sentido	1	10800	1500
O2372	7	20		1	12900	1500
O2373	7	21		1	15000	1500
O2384	8	22		1	10800	2100
O2385	8	23		1	12900	2100
O2386	8	24		1	15000	2100
O2397	9	25		1	10800	2700
O2398	9	26		1	12900	2700
O2399	9	27		1	15000	2700

En el apéndice A se detalló la nomenclatura utilizada para la identificación de los ensayos previos y finales, dicho código se formó a partir de la estructura del nombre de los programas de corte.

2.4.12 Toma de datos

La figura 2.11 resume los pasos seguidos para la ejecución del proceso experimental con la finalidad de disminuir los errores.

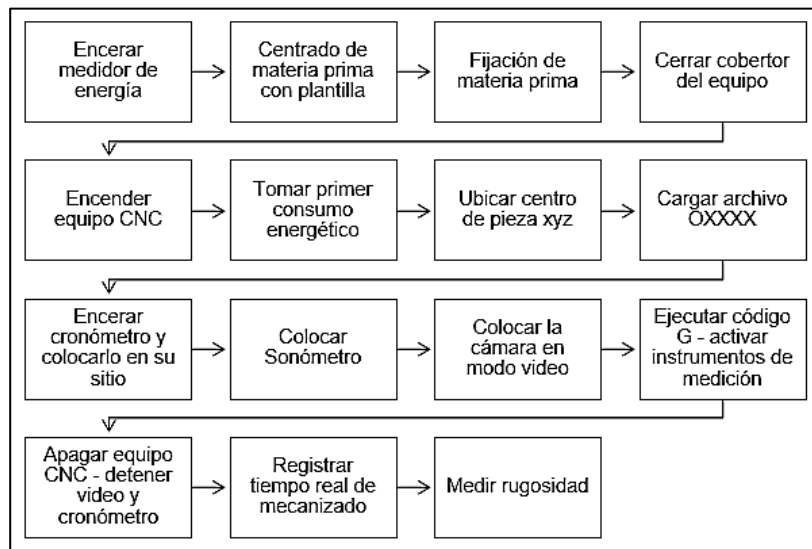


Figura 2.12: Pasos seguidos en el ensayo.

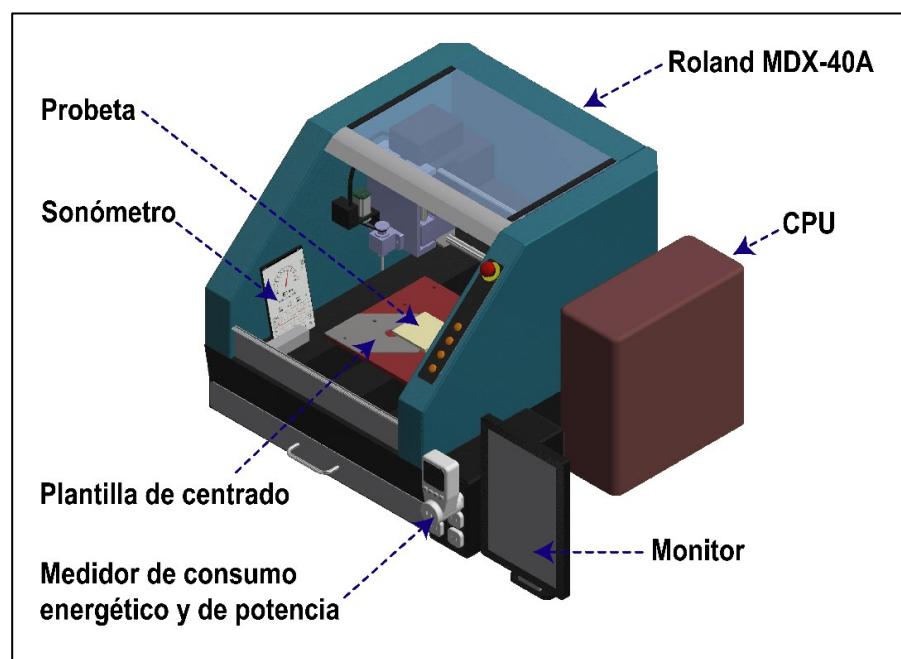


Figura 2.13: Equipos que integran el ensayo.

De acuerdo con el esquema presentado en la figura 2.11, se posicionaron los instrumentos de medición de tal manera que faciliten el flujo de pasos para el desarrollo experimental. De esta forma, además, se evitan errores entre los ensayos y la recolección de datos. La figura 2.12 permite visualizar la disposición de los equipos para la experimentación.

Por otra parte, la rugosidad superficial fue medida en el interior de las marcas de fresado que representan el sentido de avance (punto 1) y en el sentido transversal (punto 2). La figura 2.13 muestra estas orientaciones.

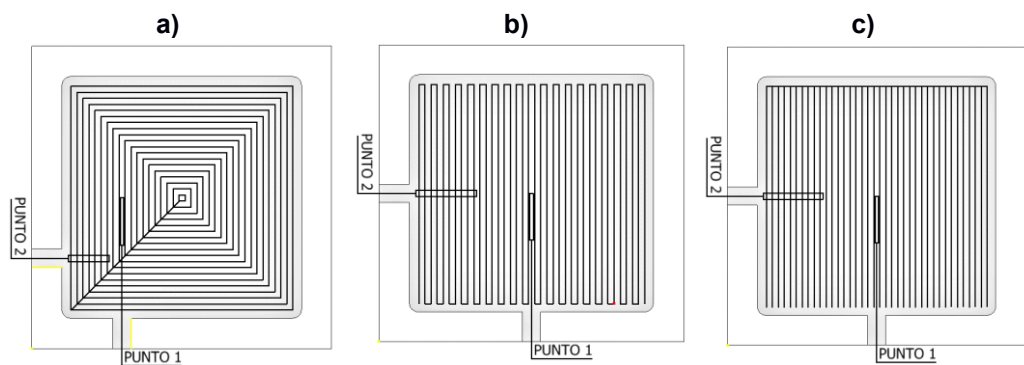


Figura 2.14: Orientación para la toma de rugosidad superficial a) corte espiral b) zigzag c) corte en un sentido.

2.5 Proceso iterativo de la metodología experimental

En la figura 2.14, se presenta un diagrama que detalla el proceso experimental desarrollado en los ensayos para definir los parámetros de corte óptimos, la nomenclatura del diagrama se muestra en la figura 2.15 y en el apéndice D, se presenta detalladamente la descripción del proceso iterativo para conseguir los mejores parámetros de corte con las estrategias ensayadas.

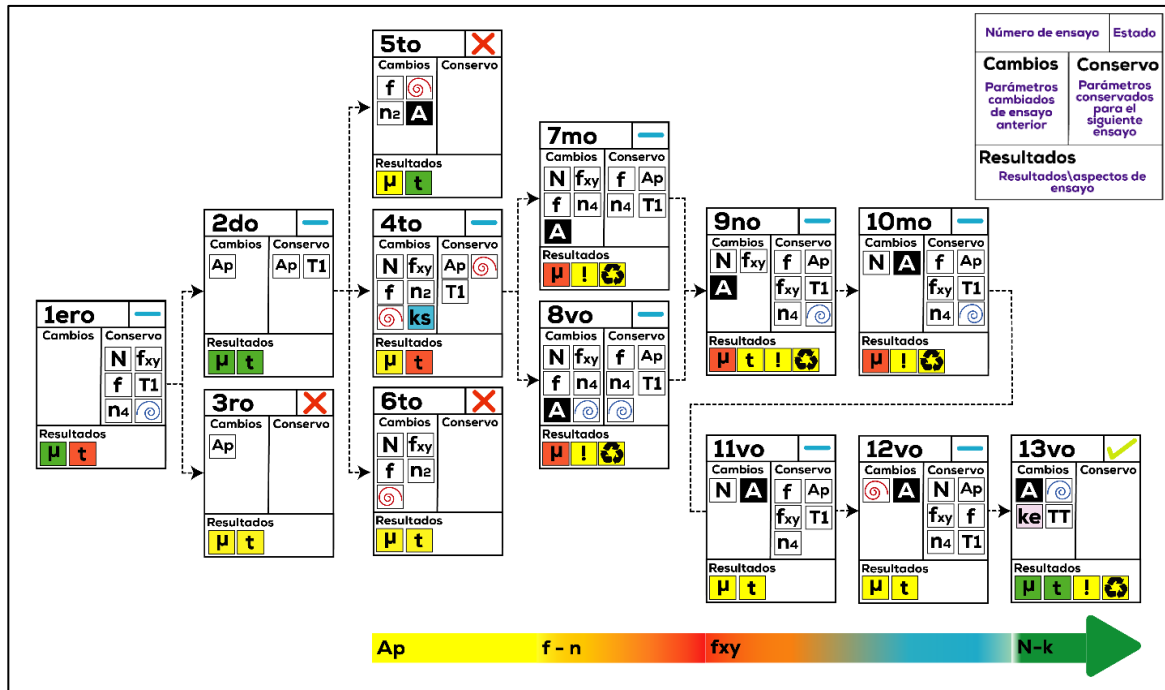


Figura 2.15: Resumen del proceso experimental desarrollado.

NOMENCLATURA		
N Velocidad de rotación	t Poco tiempo	Sentido antihorario
f_{xy} Avance lineal	t Tiempo aceptable	Sentido horario
f Avance por diente	t Mucho tiempo	TT Tres estrategias
Ap Profundidad de corte axial	μ Buen acabado	Probetas desechadas
T1 Corte en espiral	μ Acabado aceptable	! Atasques o errores
T2 Zigzag	μ Mal acabado	Ensayo aceptado
T3 Corte en un sentido	ks Factor sugerido	Ensayo rechazado
n2 Dos fillos de corte	ke Factor de ensayo	Continúa en análisis
n4 Cuatro fillos de corte	A Ajuste a límites de máquina	

Figura 2.16: Nomenclatura utilizada para el diagrama del proceso experimental.

2.6 Análisis de resultados

Los resultados serán procesados, y posteriormente, utilizados para elaborar los gráficos de velocidad de avance vs tiempo de mecanizado, consumo energético, potencia consumida vs tiempo, potencia consumida proyectada sobre la trayectoria de corte, rugosidad superficial vs avance, emisión acústica- potencia vs tiempo y ranking de estrategias. Para ello, se utilizarán los programas: Matlab R2021a – versión estudiantil, Matlab R2016b y Microsoft Excel.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Todas las gráficas presentadas para el tiempo de mecanizado y rugosidad superficial fueron desarrolladas con los datos obtenidos y mostrados en la tabla E.2 en el apéndice E.

3.1 Tiempo de mecanizado

En la figura 3.1 se muestran las curvas del tiempo de corte en función de la velocidad de avance para cada estrategia ensayada al emplear 10800 RPM. Se puede observar que, para todas las estrategias el tiempo de mecanizado disminuye a medida que la velocidad de avance aumenta. Adicionalmente, las estrategias de corte en espiral y zigzag fueron las que presentaron el menor tiempo al cortar la misma geometría. Finalmente, es notable que para la estrategia Corte en un sentido el rango de tiempo (600 a 1000 segundos) se aleja bastante de los rangos medidos para las otras dos estrategias (300 a 600 segundos).

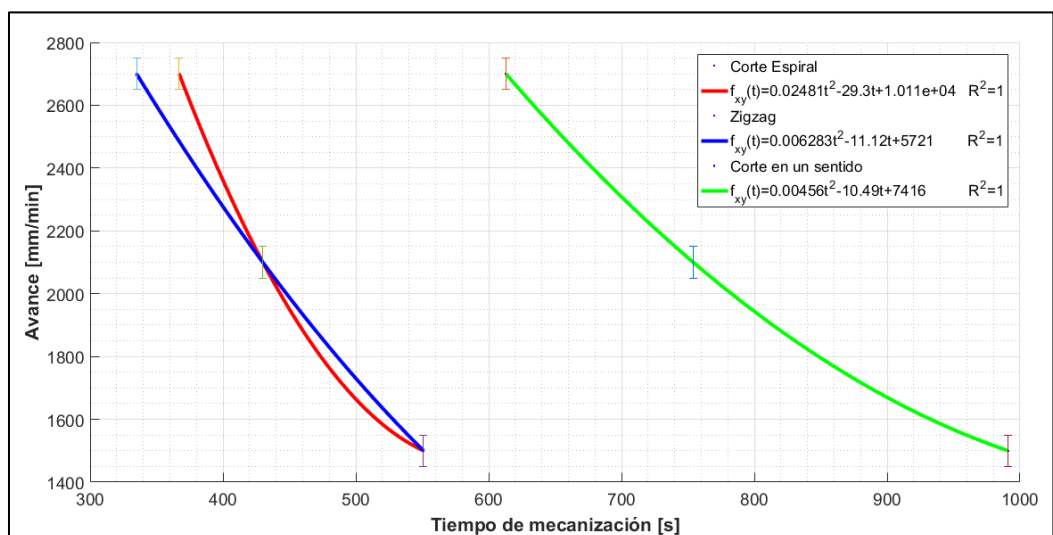


Figura 3.1: Avance vs tiempo de mecanizado entre trayectorias con 10800RPM.

3.2 Análisis de la dirección de mecanizado en cada estrategia de corte

Las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 presentan la dirección de fresado para cada una de las capas (nivel de profundidad de corte) en las tres estrategias ensayadas.

Las flechas rectas representan el desplazamiento del cortador (flecha azul) con respecto al movimiento de la mesa de trabajo (flecha roja) y la flecha curva indica la dirección de rotación del cortador. En todos los casos se utilizó sentido horario.

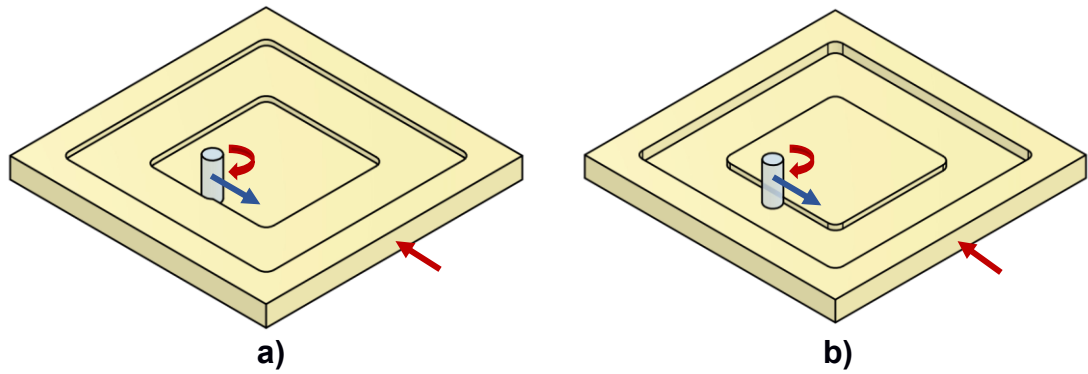


Figura 3.2: Corte en espiral a) primera y tercera capa con fresado descendente b) segunda y cuarta capa con fresado ascendente.

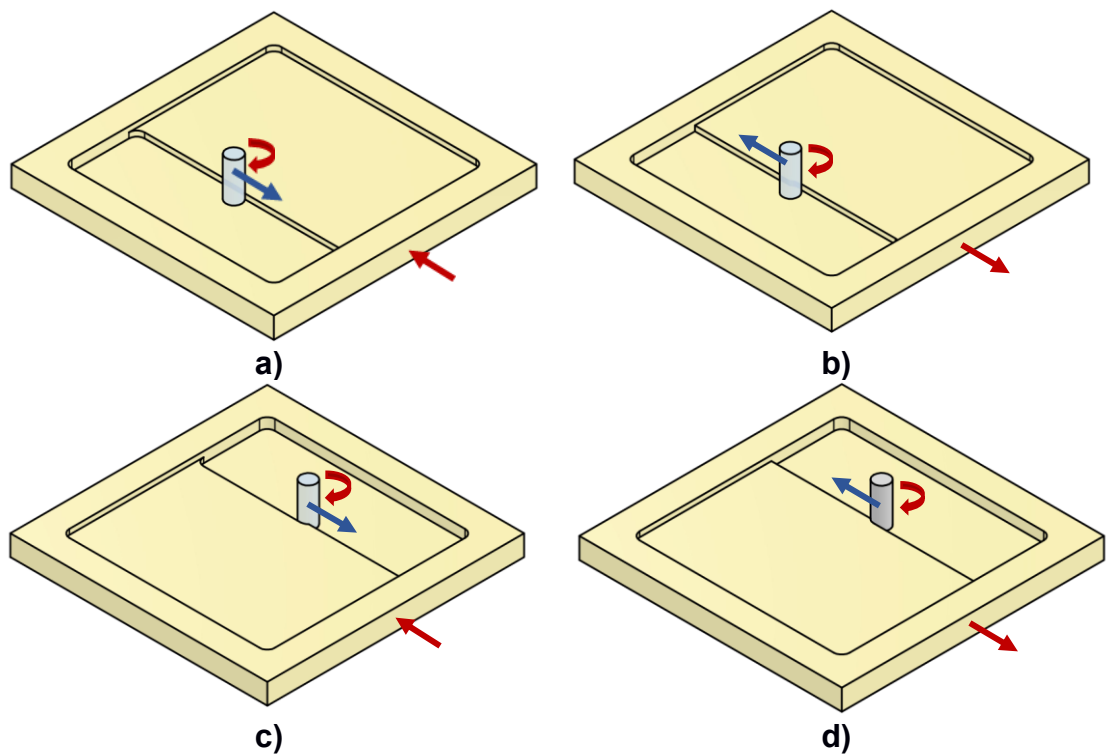


Figura 3.3: Corte Zigzag a) primera y tercera capa con fresado ascendente b) primera y tercera capa con fresado descendente c) segunda y cuarta capa fresado descendente d) segunda y cuarta capa fresado ascendente.

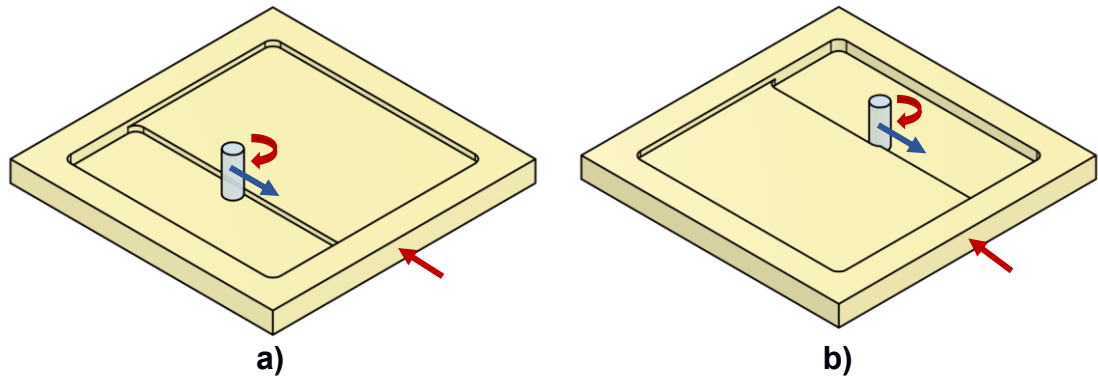


Figura 3.4: Corte en un sentido a) primera y tercera capa fresado ascendente b) segunda y cuarta capa fresado descendente.

Para la estrategia de corte en espiral, se muestran la dirección de mecanizado en la primera - tercera capa (figura 3.2-a) y en la segunda – cuarta capa (figura 3.2-b). Los descensos para la profundidad de corte, en la primera y tercera capa fueron en el centro de la pieza, mientras que, en la segunda y cuarta capa se dieron en la esquina inferior izquierda. Tomando en cuenta la dirección de giro de la herramienta de corte con respecto a la dirección del avance se determina que, para la primera y tercera capa se desarrolló mayoritariamente fresado descendente, en cambio, para la segunda y cuarta capa, se desarrolló fresado ascendente.

Debido al diseño de la estrategia de corte en zigzag, para cada capa se presentó una configuración de fresado ascendente y descendente (direcciones contrarias en ida y retorno de la herramienta) como se muestra en detalle en la figura 3.5. La figura 3.3-a, 3.3-b muestran la primera – tercera capa y la figura 3.3-c, 3.3-d presentan la segunda – cuarta capa. Para el caso de la primera y tercera capa el fresado comienza con configuración ascendente y retorna con fresado descendente. Por el contrario, para la segunda y cuarta capa, la trayectoria comenzó con fresado descendente y retornó con ascendente.

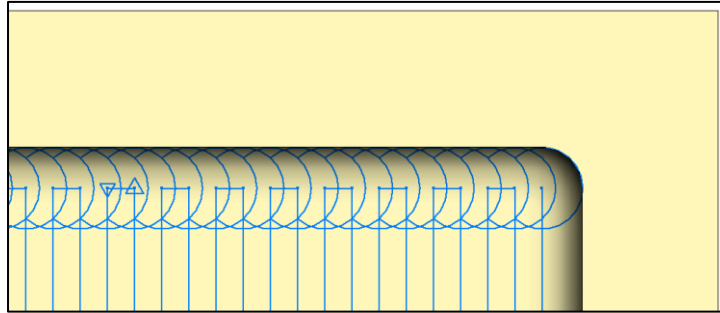


Figura 3.5: Diseño de la estrategia de corte en zigzag.

Para la estrategia de corte en un sentido, la herramienta va a cortar una sección de la capa en un sentido para luego retornar a cortar la siguiente sección desde el mismo punto de inicio de la primera (esto genera el corte en un sentido propiamente dicho), figura 3.6. Se muestra en la figura 3.4-a la dirección de corte para la primera - tercera capa y en la figura 3.4-b para la segunda – cuarta capa. De acuerdo con lo observado, el corte de la primera - tercera capa coincidió con fresado ascendente y para la segunda - cuarta capa el fresado fue descendente.

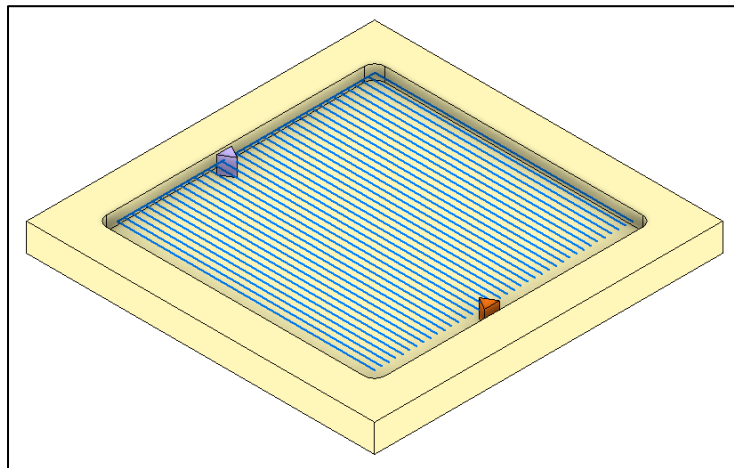


Figura 3.6: Diseño de la estrategia de corte en un sentido: fresado (prisma azul), retorno a posición de corte (prisma rojo)

3.3 Consumo energético

La figura 3.7 presenta el consumo energético correspondiente a cada estrategia de corte, mostrada para cada velocidad de avance y revoluciones del husillo ensayados.

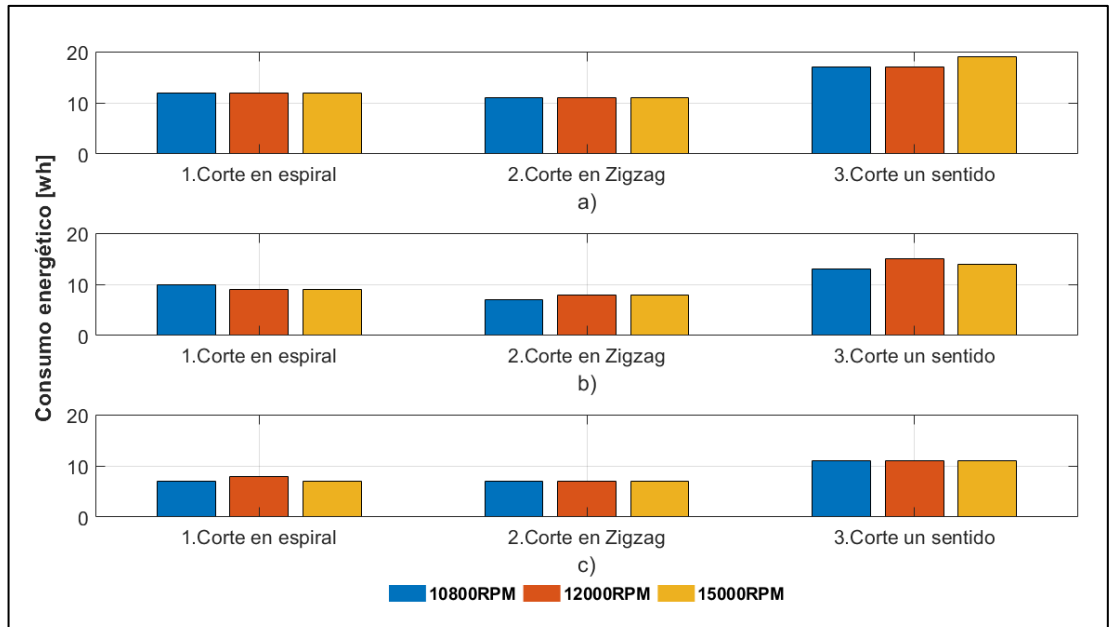


Figura 3.7: Consumo energético entre estrategias para las velocidades de avance a) 1500 mm/min b) 2100 mm/min c) 2700 mm/min.

De forma general se puede observar que, la estrategia corte en zigzag fue la que presentó el menor consumo energético para todos los valores de rpm y avances ensayados, seguida por la estrategia de corte en espiral que se acercó bastante a los datos de consumo y finalmente la estrategia de corte en un sentido que obtuvo los valores de consumo energético más altos. Se esperó que a medida que aumenta el avance el consumo de energía en el equipo sea menor, debido a que se demorará menos tiempo en completar la trayectoria de corte, eso para las tres estrategias. Sin embargo, para el caso de velocidad de avance 2100 m/mm al aumentar las revoluciones del husillo, en la estrategia de corte en espiral disminuye el consumo energético; en la estrategia en zigzag aumenta el consumo energético y en la estrategia de corte en un sentido para la rpm intermedia presenta el consumo energético más alto mientras que para la rpm más baja presenta el menor consumo.

3.4 Potencia consumida- Gráficos 2D

Las siguientes gráficas corresponden a la potencia consumida en función del tiempo a lo largo de las diferentes trayectorias de corte, siendo la curva azul la estrategia de corte en espiral; la curva roja el corte en zigzag y la verde, la estrategia en un sentido.

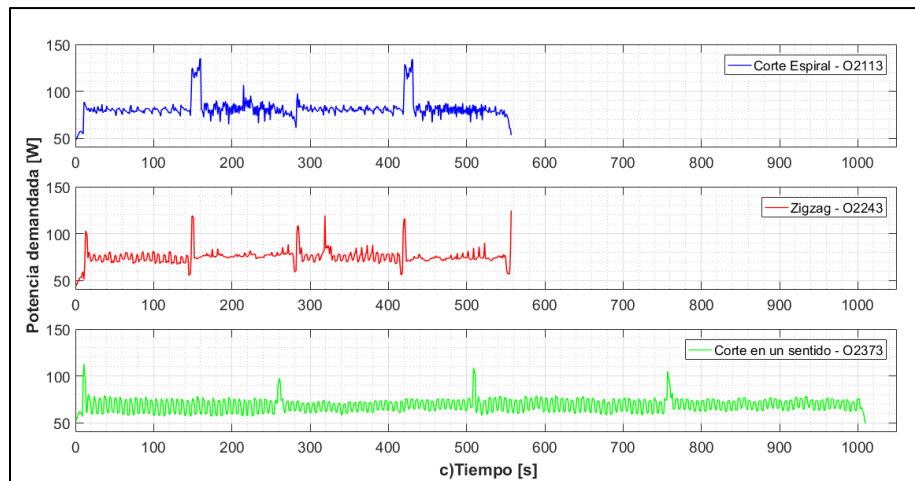
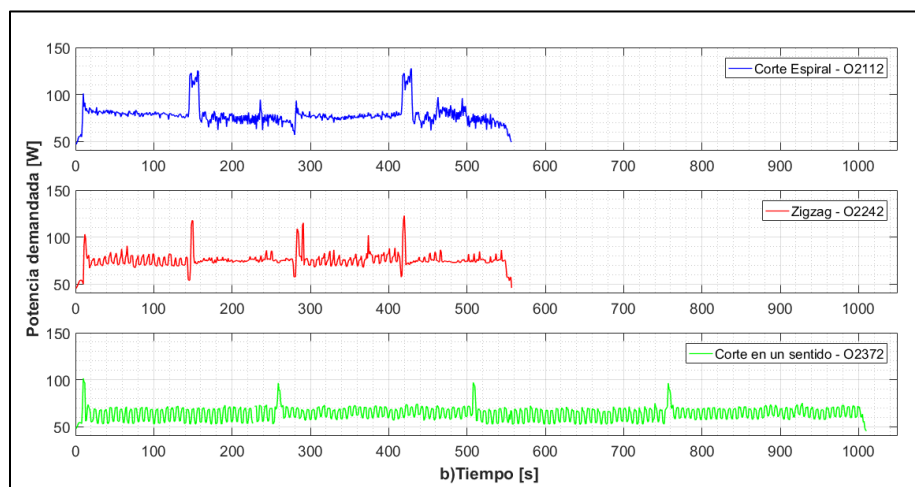
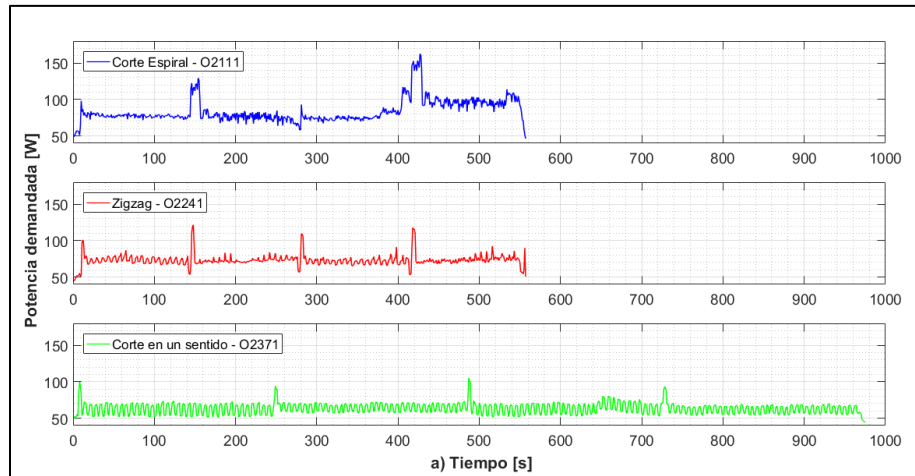


Figura 3.8: Curvas de potencia consumida vs tiempo con avance de 1500 mm/min y para a) 10800 RPM, b) 12900 RPM y c) 15000 RPM.

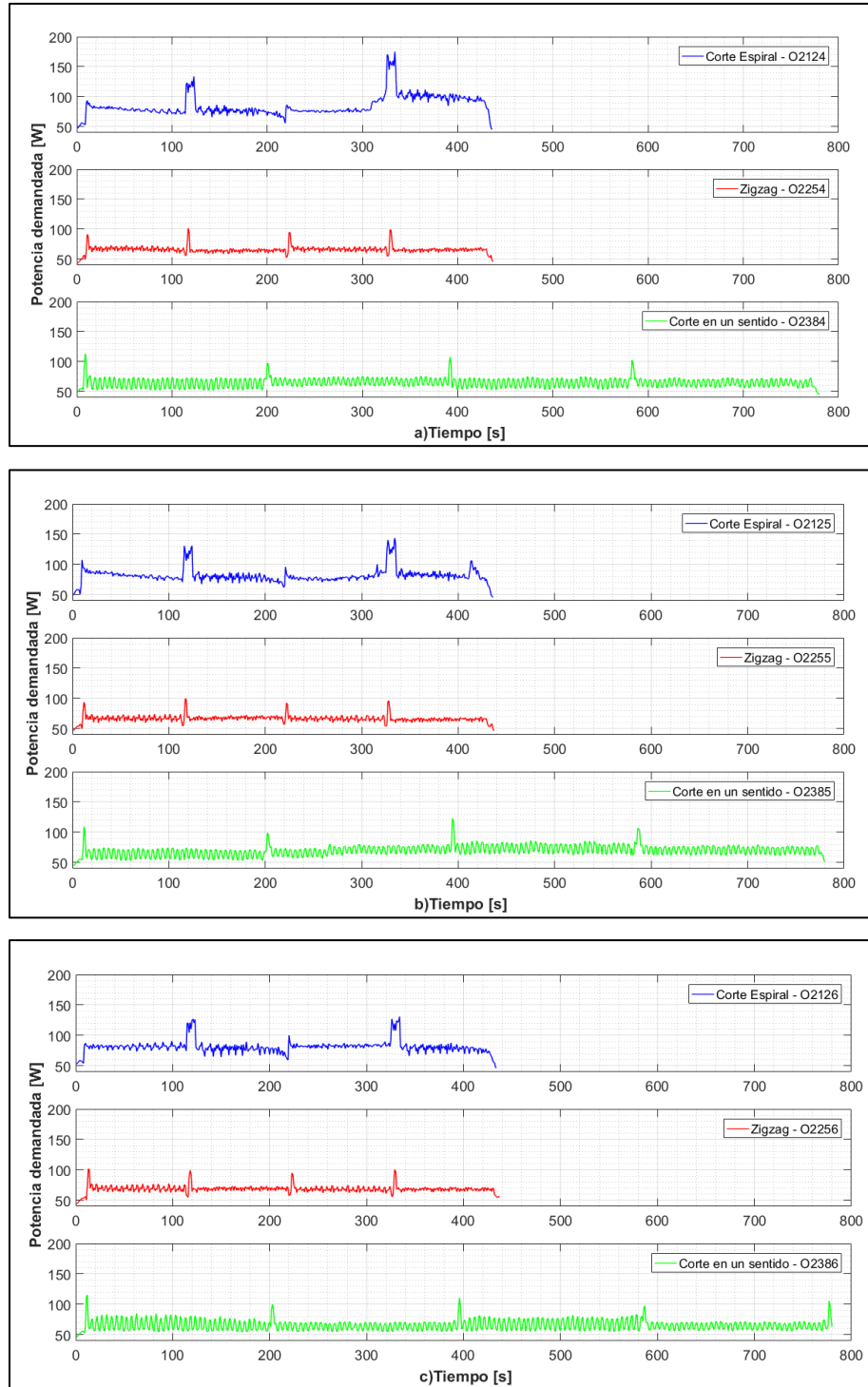


Figura 3.9: Curvas de potencia consumida vs tiempo con avance de 2100 mm/min y para a) 10800 RPM, b) 12900 RPM y c) 15000 RPM.

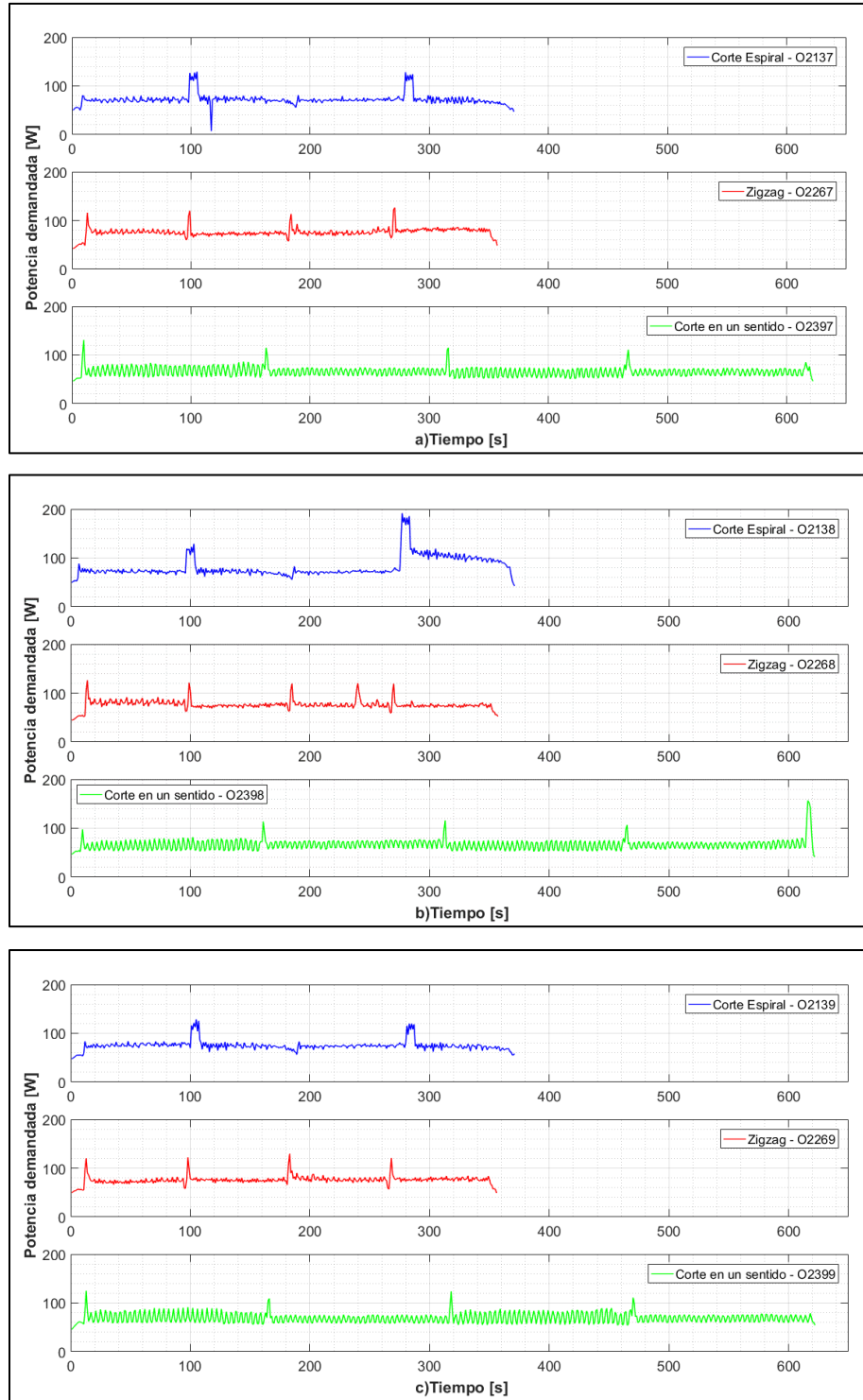


Figura 3.10: Curvas de potencia consumida vs tiempo con avance de 2700 mm/min y para a) 10800 RPM, b) 12900 RPM y c) 15000 RPM.

Para el análisis de las curvas de potencia consumida vs tiempo, fue necesario tener presente el diseño de las trayectorias de corte (forma, ubicación de los descensos, etc.), ya que, dependiendo de la posición del corte en la trayectoria, se incrementará o disminuirá la potencia demandada. (Oh & Hildreth, 2016)

Para todas las estrategias, se observa que, se producen picos de potencia cuando la herramienta de corte va a profundizar en la pieza de trabajo. Adicionalmente, para la estrategia de corte en un solo sentido se obtuvo una línea de potencia consumida con mayor extensión en el tiempo, debido a que, como estrategia tiene mayor desplazamiento de corte.

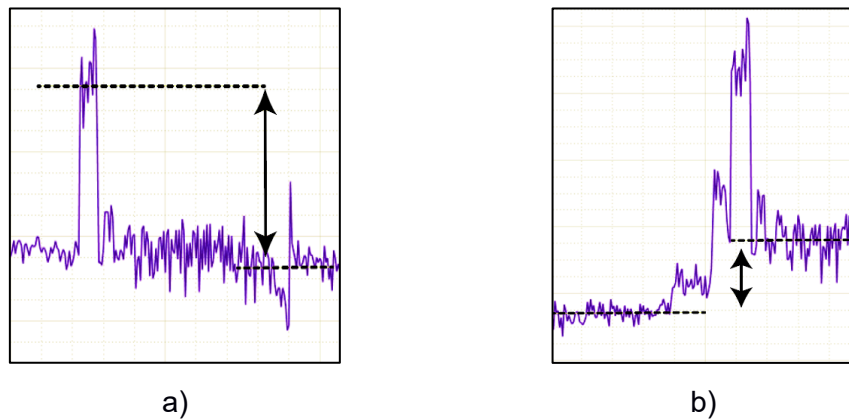


Figura 3.11: Detalles en la curva de potencia durante: a) penetración de corte, b) incremento de potencia.

Evaluando las curvas de la figura 3.8, para la estrategia en espiral, se pudo apreciar, de forma general, que los descensos o penetración de la herramienta en la pieza demandan menos potencia que la penetración del resto de estrategias. Esto se debe a que, la penetración es realizada en el centro de la pieza generando más estabilidad, esta magnitud se muestra en la figura 3.11 a. Sin embargo, al fresar a 10800 RPM con esta estrategia de corte, produjo la acumulación de viruta en el husillo, a tal punto, que en su cuarta capa la potencia demandada se incrementa entre 90 y 100 W (magnitud mostrada en la figura 3.11 b), este comportamiento continúa presentándose en el mismo valor RPM para el resto de los avances ensayados. Adicionalmente, en la figura 3.9 (2100 mm/min de avance), se observa que, la estrategia de corte en zigzag muestra un patrón u oscilaciones de potencia más constantes y

definidas, por lo que el corte fue más estable. Finalmente, una característica particular de la estrategia de corte en un sentido a diferencia del resto, y que se observa en todas las figuras (3.8, 3.9 y 3.10) fue que presentó franjas con una mayor amplitud en potencia, debido a que, cuando realiza el corte la potencia consumida es alta, pero cuando retorna a una nueva posición de inicio para el corte, la potencia desciende. Además, a medida que aumentó el avance en el mecanizado con esta estrategia de corte, la potencia demandada para la segunda y cuarta capa es menor, esto se debe a que, dichas capas coinciden con el fresado descendente, lo que genera un proceso de corte más estable.

3.5 Potencia consumida- Gráfico 3D

En la figura 3.12 se muestra la potencia consumida en el fresado de la primera capa (correspondiente a 1 mm), durante todo el camino recorrido de la trayectoria de corte en espiral. Se analiza este caso, ya que, se considera como la mejor estrategia evaluada con el menor tiempo de mecanizado y baja rugosidad superficial. Las condiciones utilizadas fueron 15000 RPM y avance de 2700 mm/min. En el anexo E, se presentan las gráficas 3D para el resto de los casos.

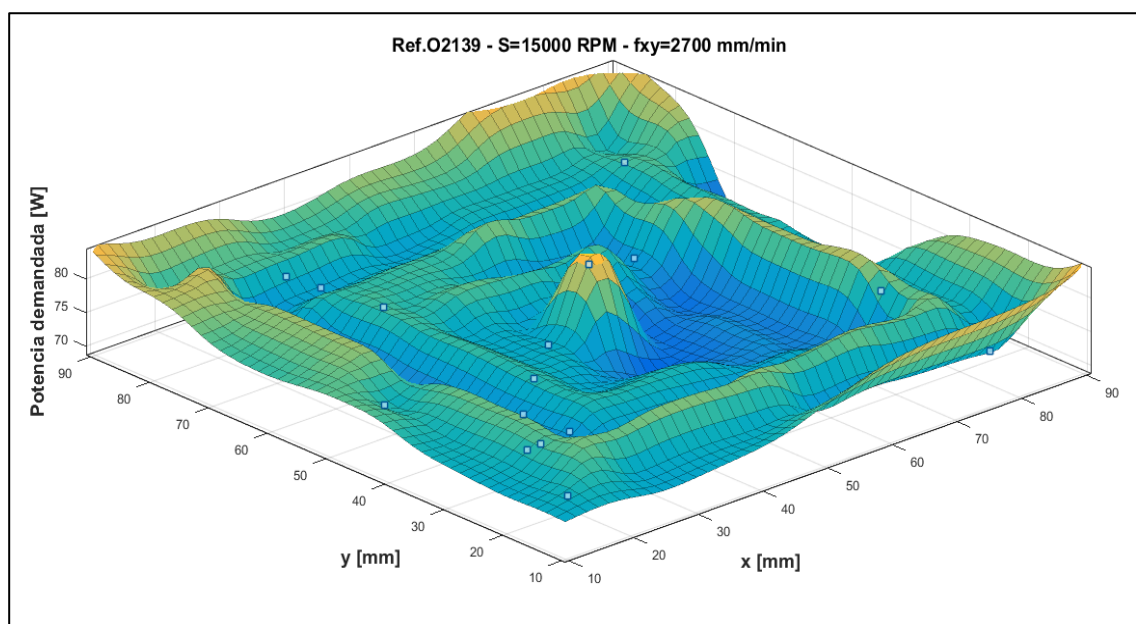


Figura 3.12: Vista en 3D de la potencia consumida durante el recorrido de la primera capa para la trayectoria de corte en espiral.

La gráfica en 3D permite observar que, el mayor consumo (pico) de potencia fue en el centro del recorrido, debido a que, coincide con la entrada de corte (penetración) de la primera capa. Además, se observa que, en el perímetro del recorrido la potencia también se eleva y esto se produce por el incremento de pasada lateral, que corresponde a 3 mm, es decir $l=R$ (figura 2.5), dando como resultado un corte inestable, con presencia de vibraciones y pésimo acabado superficial. (Smid, 2007) Por otra parte, la estrategia de corte genera un camino en forma de un cuadrado, provocando que en ciertos tramos sea fresado descendente y en otros, fresado ascendente, lo que hace posible apreciar en la gráfica 3D (lado inferior y derecho del cuadrado) un incremento considerable de potencia para este caso.

3.6 Rugosidad superficial

A continuación, se presentan las curvas de tendencia de la rugosidad superficial conforme varía el avance para cada caso de RPM fijado. Este parámetro de control se ve afectado por algunos parámetros de corte (figura 1.7). Sin embargo, también es necesario considerar el tipo de fresado, siendo por literatura que el descendente es el que proporcionará el mejor acabado superficial. De acuerdo con las figuras 3.2-b, 3.3-d y 3.4-b, el corte de la última capa coincidió con fresado ascendente para las estrategias espiral, zigzag y fresado descendente para la estrategia en un sentido.

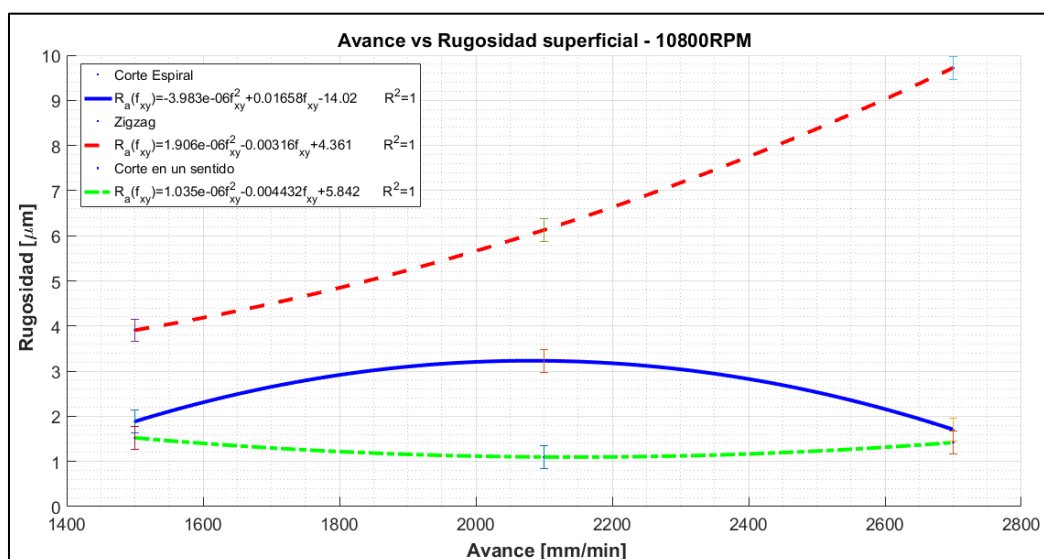


Figura 3.13: Rugosidad vs avance entre trayectorias con 10800RPM.

La figura 3.13 corresponde a los valores de rugosidad vs avance utilizando 10800 RPM para cada estrategia evaluada. De manera general, se observa que, la estrategia en zigzag presenta valores de rugosidad más altos que el resto de las estrategias medidas, seguido por los valores obtenidos en la estrategia en espiral y quedando la estrategia en un sentido con los valores de rugosidad más bajos de todos.

El corte en zigzag presenta un incremento en la rugosidad de manera constante a medida que aumenta la velocidad de avance, dicho incremento llega a tal punto que por encima de un avance de 2100 mm/min el valor de rugosidad obtenido no se considera aceptable para este proceso de mecanizado (Groover, 2020). A pesar de que, para esta estrategia de corte se tiene una combinación entre fresado descendente y ascendente; y se esperaba que la rugosidad mejore en el recorrido descendente, al graficar la curva mostró de igual manera una tendencia creciente con valores alejados de las otras estrategias medidas.

Por otra parte, la estrategia en espiral presenta una tendencia creciente en la rugosidad hasta el valor de avance 2100 mm/min para luego decrecer a medida que sigue aumentando el avance. Este comportamiento puede generarse debido a la variación de direcciones durante el corte y cambio de fresado ascendente a descendente en distintas zonas del mecanizado. Finalmente, se puede apreciar que, la estrategia de corte en un sentido se encuentra en el rango más bajo de rugosidad superficial, con una tendencia decreciente hasta un avance de 2100 mm/min y se vuelve creciente por encima de este valor. Esta característica de bajos valores de rugosidad se puede explicar porque el mecanizado coincidió con fresado descendente (corte estable) en su última capa.

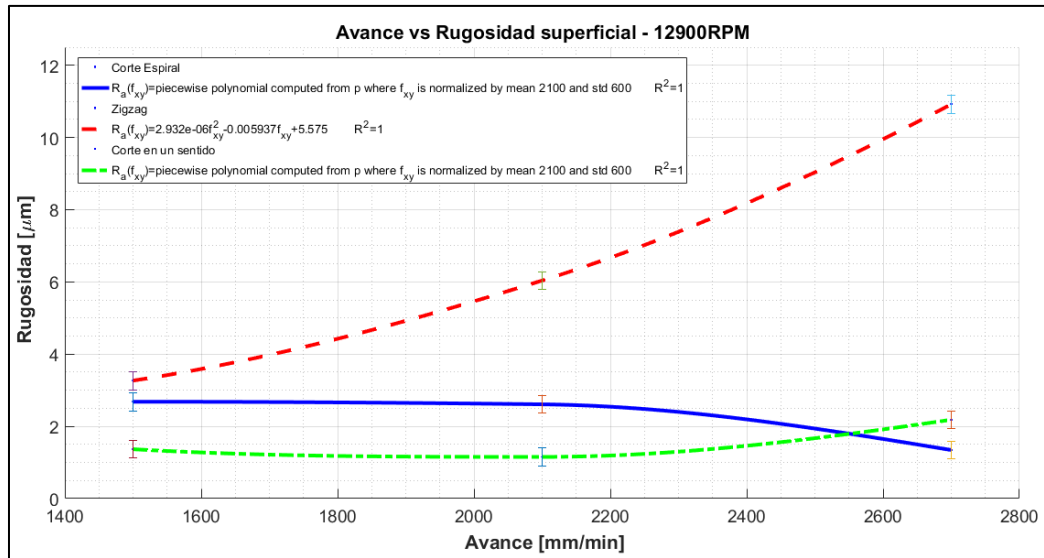


Figura 3.14: Rugosidad vs avance entre trayectorias con 12900RPM.

La figura 3.14 corresponde a los valores de rugosidad vs avance utilizando 12900 RPM para cada estrategia evaluada. De manera general, se observa que, la estrategia en zigzag sigue presentando valores de rugosidad más altos que el resto de las estrategias medidas, seguido por los valores obtenidos en la estrategia en espiral y quedando la estrategia en un sentido con los valores de rugosidad más bajos de todos. El corte en zigzag presenta un incremento en la rugosidad de manera constante a medida que aumenta la velocidad de avance y dicho incremento sigue llegando a valores de rugosidad inaceptables para este proceso de mecanizado. El resto de las estrategias hasta los 2100 mm/min tienen un comportamiento similar a su curva con la RPM anterior (figura 3.13) pero luego, la estrategia en espiral tiene un decrecimiento mucho mayor y la estrategia un sentido tiene un crecimiento más alto que el mostrado con 10800 RPM. Por lo que, incluso se puede apreciar que el valor de rugosidad en la estrategia corte en un sentido a partir de 2550 mm/min es mayor que en la estrategia corte en espiral.

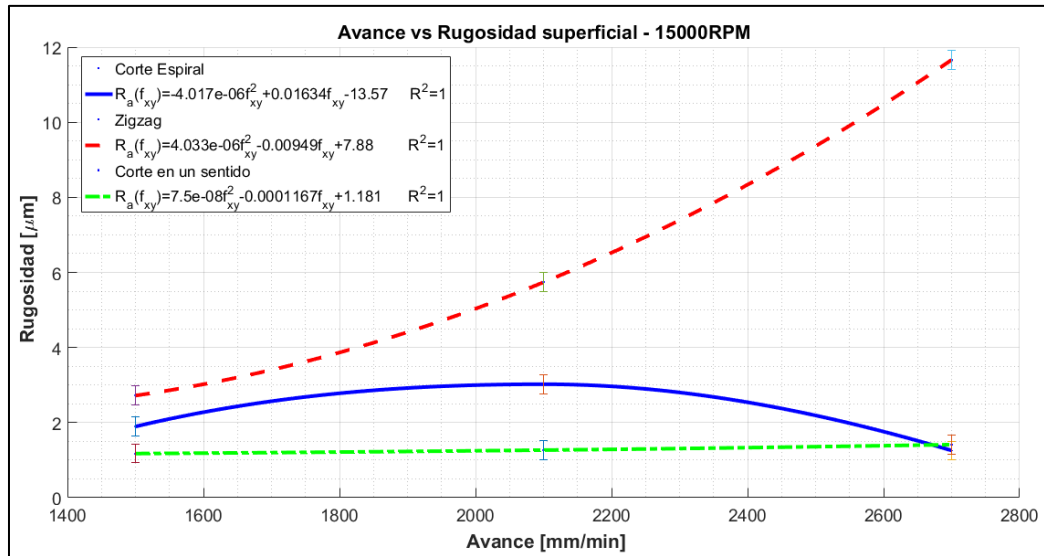


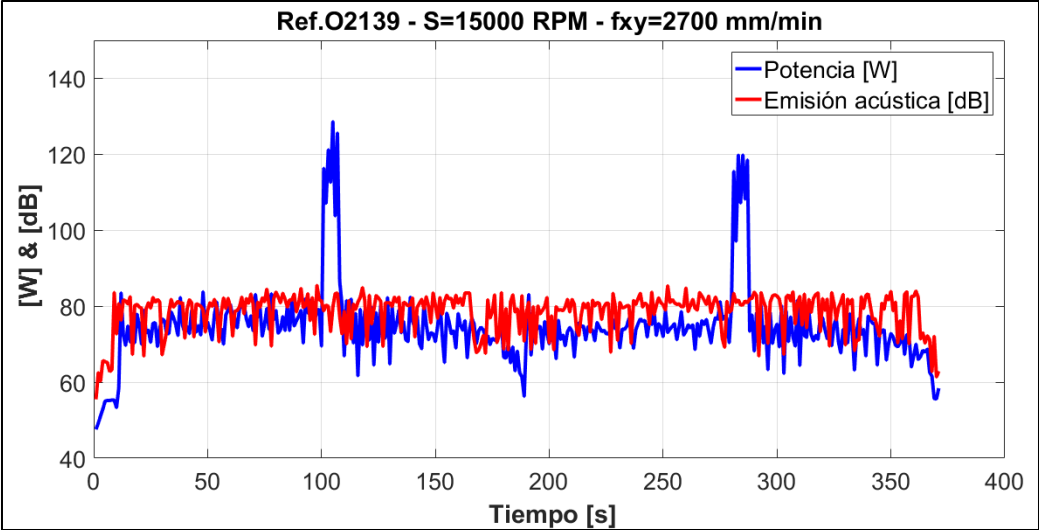
Figura 3.15: Rugosidad vs avance entre trayectorias con 15000RPM.

La figura 3.15 corresponde a los valores de rugosidad vs avance utilizando 15000 RPM para cada estrategia evaluada. De manera general, se observa que, las 3 estrategias presentan un comportamiento similar a las gráficas anteriores, siendo la estrategia de corte en un sentido la que mantiene los mejores resultados (más bajos) de rugosidad. El corte en zigzag sigue presentando un incremento en la rugosidad llegando a valores inaceptables para este proceso de mecanizado. La estrategia en espiral presenta una tendencia creciente en la rugosidad hasta el valor de avance 2100 mm/min para luego decrecer a medida que aumenta el avance, siendo que, a partir de 2672 mm/min de avance produce valores de rugosidad menores a que los obtenidos en la estrategia en un sentido. La estrategia de corte en un sentido se encuentra en el rango más bajo de rugosidad superficial, pero con una tendencia creciente hasta el avance ensayado de 2700 mm/min.

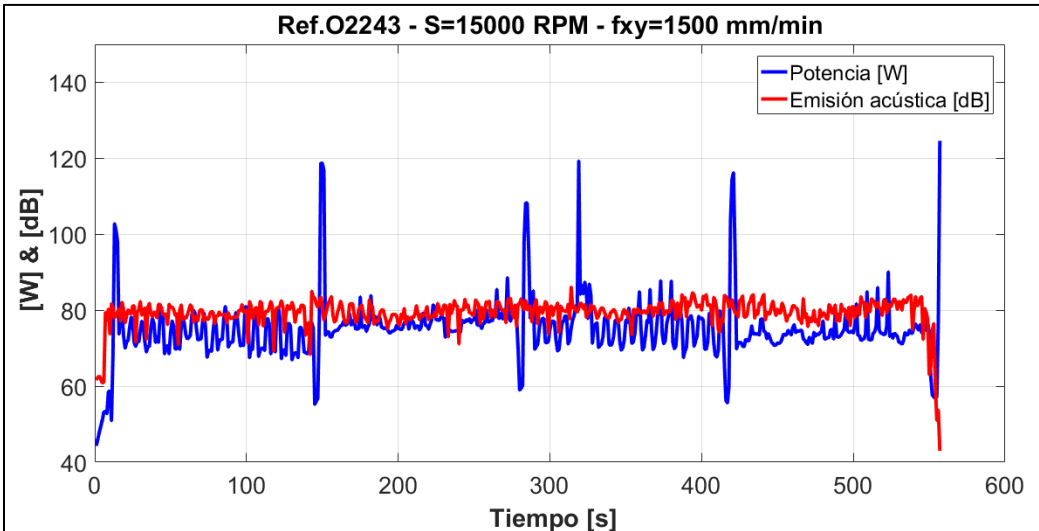
3.7 Emisión acústica

La figura 3.16 presenta las señales de potencia y emisión acústica para las probetas con mejor y peor rugosidad superficial de cada estrategia ensayada. La señal azul corresponde a la potencia en función del tiempo y la señal roja a la emisión acústica en función del tiempo. La finalidad de presentarlas en conjunto es visualizar la “variabilidad” del sonido frente a la potencia generada durante el recorrido de corte (Galarza & Diniz, 2018) Este parámetro podría

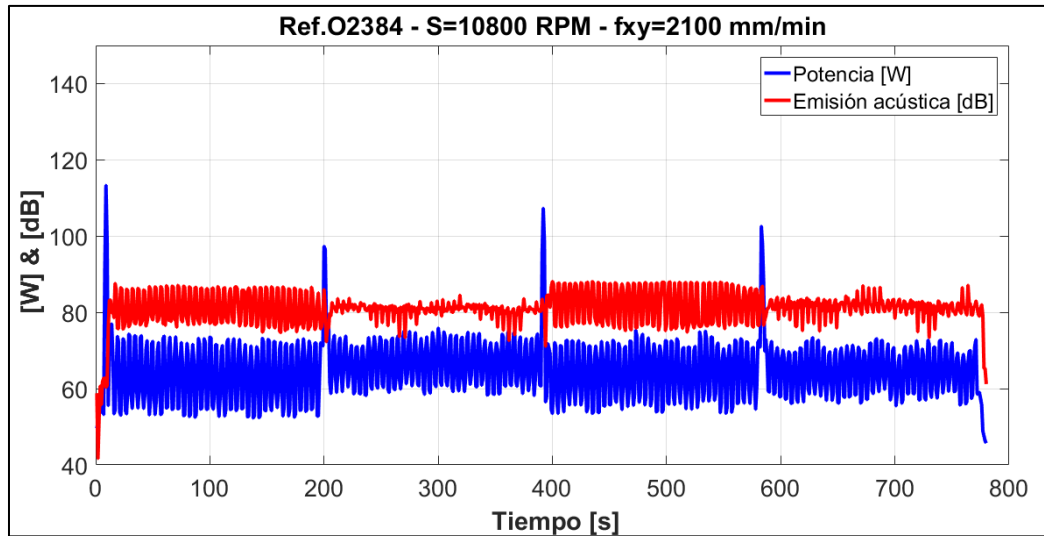
reflejar la presencia de vibraciones y, por tanto, un aumento en el consumo de potencia dentro de la estrategia de corte.



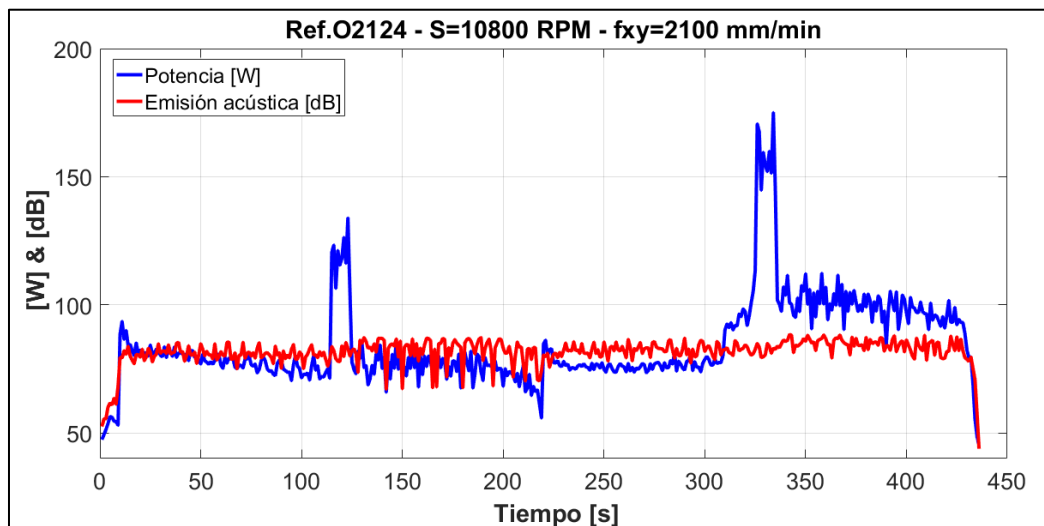
a)



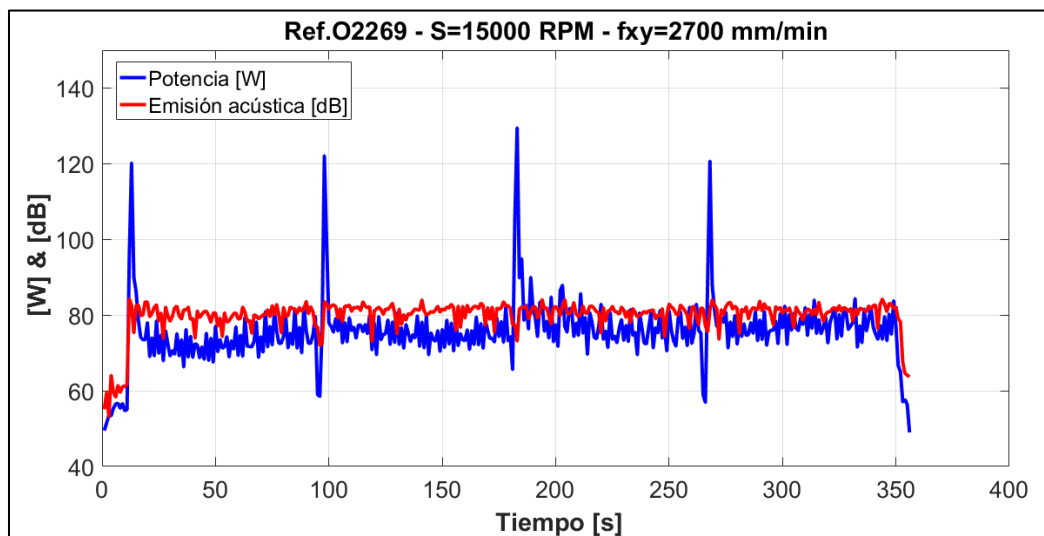
b)



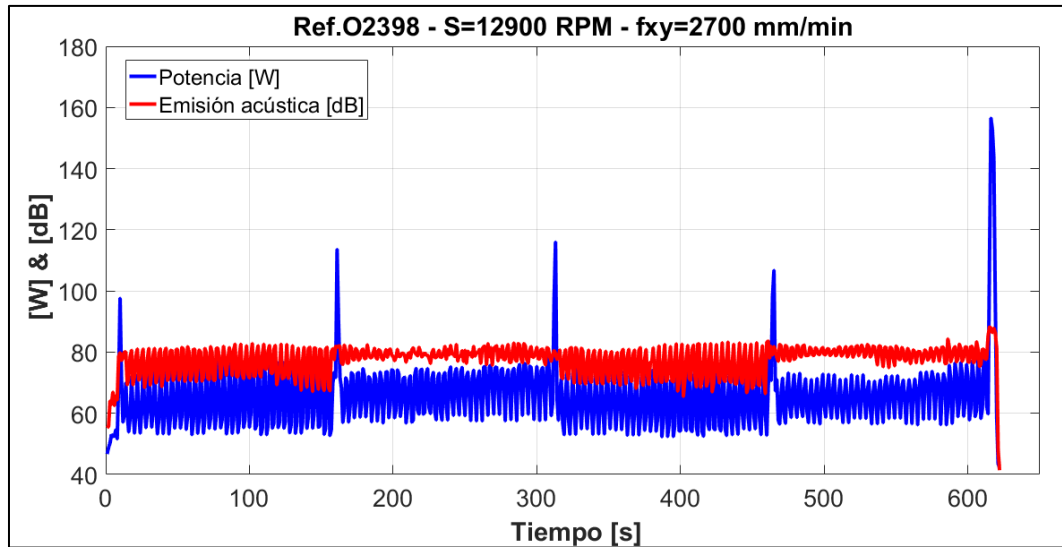
c)



d)



e)



f)

Figura 3.16: Señales de potencia y emisión acústica para las probetas con mejores acabados superficiales: a) corte en espiral, b) corte zigzag y c) corte en un sentido; y con peores acabados superficiales: d) corte en espiral, e) corte zigzag y f) corte en un sentido.

Se puede observar que, las señales presentadas en la figura 3.16, tanto la potencia como la emisión acústica, poseen la misma longitud de onda, acentuaciones para el inicio - final del proceso, variaciones en la penetración de cada capa, y particularidades en los tramos correspondientes al fresado ascendente - descendente. Al comparar las figuras 3.16-a y 3.16-d, mejor y peor rugosidad respectivamente para la estrategia en espiral, se nota que la señal de sonido posee mayor amplitud en toda su longitud en la gráfica con mejor acabado.

La figura 3.16-a, presenta tramos compactados en la señal de sonido, al inicio de la segunda capa, en la zona de penetración a la tercera capa y entre la cuarta capa, esta característica concuerda con la señal de potencia, esto se puede explicar por el aumento de la resistencia producto de la acumulación de la viruta en el fresado, sin embargo, para este caso a pesar que en la señal de potencia sí es notable la diferencia de ubicarse en fresado ascendente o descendente, para la señal acústica no se observa una diferencia apreciable.

Las figuras 3.16-b y 3.16-e, corresponden a la estrategia de corte en zigzag con el mejor y peor acabado superficial correspondientemente. Se puede

observar que, las señales de sonido de las figuras 3.16-b y 3.16-e poseen un comportamiento oscilatorio con picos y valles definidos, sin embargo, es notable la presencia de mayor cantidad de picos y valles en el caso de la figura 3.16-e. Para la señal de la figura 3.16-b es notable que, para la primera y tercera capa la oscilación es mucho mayor (cantidad mayor de picos y valles) que en los tramos de señal para la segunda y cuarta capa (cantidad menor de picos y valles). En el caso de la señal de la figura 3.16-e para todas las capas se puede observar una oscilación grande (mayor cantidad de picos y valles). Por lo tanto, la variabilidad de la señal acústica está presente en todos los casos, pero es mucho más intensa en el caso de la figura 3.16-e que coincide con la probeta de la peor rugosidad superficial.

Las figuras 3.16-c y 3.16-f, corresponden a la estrategia de corte en un sentido con el mejor y peor acabado correspondientemente. Es notable que, para las señales mostradas en las dos figuras, se generan picos con un mismo nivel de amplitud y que se mantienen constantes a lo largo de todas las capas medidas. Esto se debe al diseño de la estrategia en ubicarse para cada tramo en un mismo tipo de fresado (corte en un sentido). Por lo tanto, es notable en la señal acústica para cada capa la ubicación en fresado descendente o ascendente durante el proceso de corte. Adicionalmente, el mantener una amplitud constante es indicativo de que el proceso de corte es más estable lo que resulta en un buen acabado superficial.

La tabla 3.1 muestra los mejores y peores valores de rugosidad obtenidos en cada estrategia de corte junto con los parámetros utilizados. Se puede verificar que, en los dos grupos seleccionados, de mejor rugosidad (valores a, b y c) y de peor rugosidad (valores d, e y f) la menor rugosidad medida corresponde a las probetas de la estrategia en un sentido, que presentaron señales acústicas con menor variabilidad y amplitud constante. Adicionalmente, se puede comprobar que, las probetas de la estrategia en zigzag obtuvieron los peores valores de rugosidad para cada grupo seleccionado, coincidiendo con la señal acústica mostrada con oscilaciones marcadas de grandes picos y valles bien definidos.

Tabla 3.1: Parámetros de corte para probeta con mejor y peor rugosidad de cada estrategia.

	CÓDIGO	RPM	Avance [mm/min]	Tm [min]	Ra [µm]
a	O2139	15000	2700	6.13	1.257
b	O2243	15000	1500	9.18	2.72
c	O2384	10800	2100	12.57	1.099
d	O2124	10800	2100	7.16	3.23
e	O2269	15000	2700	5.56	11.66
f	O2398	12900	2700	10.21	2.183

3.8 Selección de estrategia óptima

Para realizar la selección de la estrategia óptima se desarrolló un sistema de ponderación cuantitativo tipo ranking dentro del cual se consideró como factores determinantes la rugosidad superficial, el tiempo de mecanizado y el consumo energético. Para un mejor análisis, se generaron dos gráficas, la primera gráfica (figura 3.17) combina los resultados obtenidos de rugosidad superficial junto con tiempo de mecanizado y en la segunda gráfica (figura 3.18), se agregan los resultados de consumo energético. De acuerdo con la codificación del apéndice A, la nomenclatura O21XY corresponde a la estrategia corte en espiral, la O22XY a corte en zigzag y O23XY a la estrategia corte en un sentido, siendo “X” y “Y” el número de herramienta y probeta analizada para cada estrategia.

Para la figura 3.17, las columnas de color naranja representan el tiempo de mecanizado (Tm) y las columnas de color plomo corresponden a la rugosidad superficial (Ra) medida, todo esto en cada probeta para cada estrategia evaluada. La columna azul representa la suma de las magnitudes de tiempo de mecanizado y rugosidad superficial (Tm+Ra) para cada probeta, este valor fue empleado como parámetro de control para desarrollar el ranking. Se ordenaron de menor a mayor los valores obtenidos de Tm+Ra para generar una escala y de esta manera determinar las probetas con el menor valor de rugosidad y tiempo de mecanizado. Con esto, se puede seleccionar la mejor estrategia de todas las ensayadas y las mejores condiciones dentro de cada una.

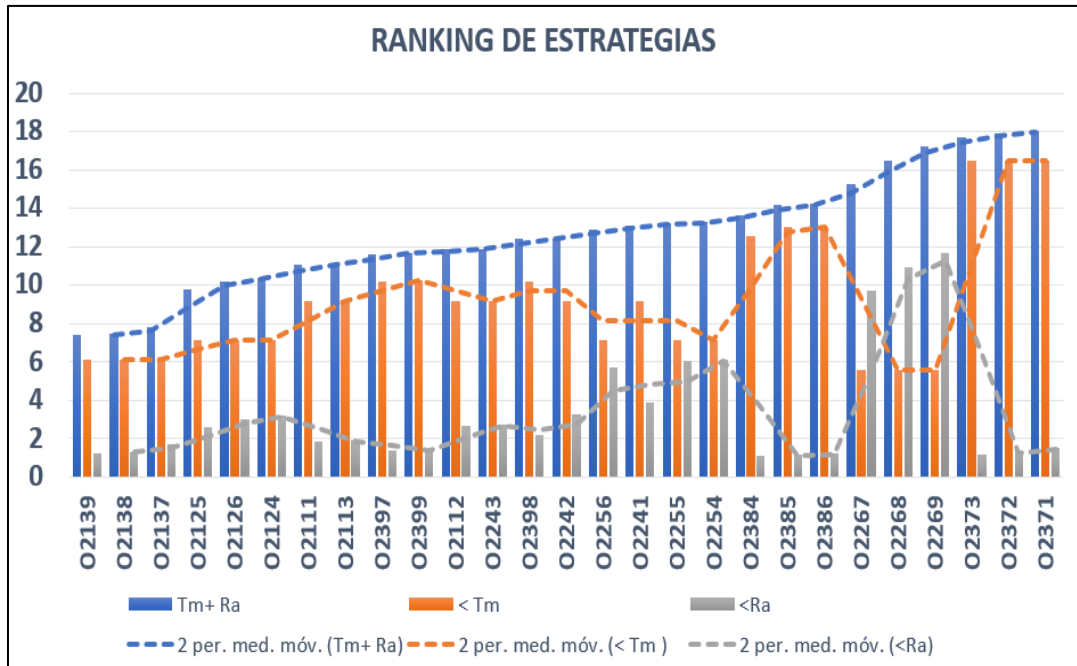


Figura 3.17: Ponderación cuantitativa de las probetas según rugosidad y tiempo para cada estrategia de corte.

De manera general, al analizar la columna azul se puede observar que, casi todas las probetas de la estrategia de corte en espiral (O21XY) ocuparon los primeros puestos del ranking, esto indica que es la estrategia que genera los mejores valores de rugosidad en el menor tiempo posible de todas las estrategias ensayadas. A pesar de que, al analizar la columna ploma, las probetas de la estrategia de corte en un sentido (O23XY) obtuvieron en su gran mayoría un excelente acabado superficial (bajo valor de rugosidad) se ubicaron en los últimos puestos del ranking, esto debido a que, fue la estrategia con el mayor tiempo de mecanizado. La estrategia en zigzag (O22XY) presenta valores de tiempo de mecanizado menores que la estrategia de corte en un sentido, por lo que, se ubica en valores intermedios del ranking. Finalmente, analizando la columna naranja y ploma de manera independiente, se puede observar que, a medida que disminuye el tiempo de mecanizado se empeora la rugosidad superficial. Verificando la definición sobre procesos de acabado en la que para obtener una mejor calidad superficial se deben utilizar avances pequeños (Groover, 2020) lo que significa mayor tiempo de mecanizado.

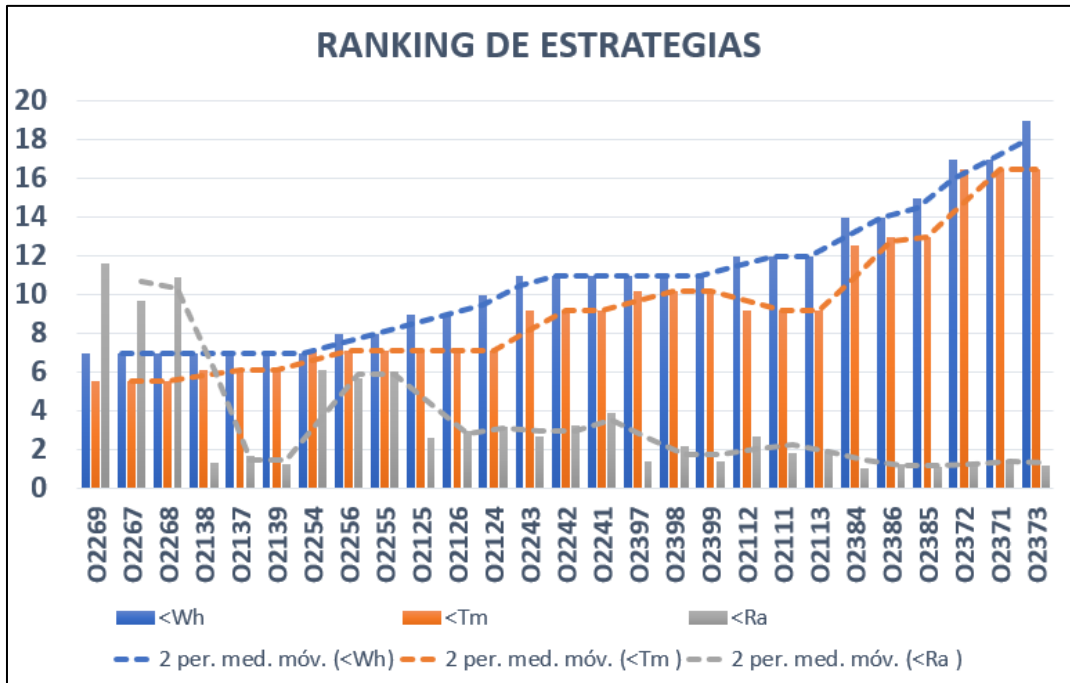


Figura 3.18: Ponderación de las probetas según consumo energético, rugosidad superficial y tiempo de mecanizado.

En la figura 3.18, las columnas de color naranja representan el tiempo de mecanizado (T_m), las columnas de color plomo corresponden a la rugosidad superficial (R_a) medida y las columnas azules representa el consumo energético (Wh), para cada probeta en cada estrategia evaluada. En este caso, el valor de consumo energético fue empleado como parámetro de control para desarrollar el ranking.

De manera general, las probetas de las estrategias de corte en zigzag (O22XY) y en espiral (O21XY) son las que ocupan los primeros lugares del ranking, lo que significa que, son las que necesitan menor cantidad de energía para desarrollar el corte. Las probetas de la estrategia en un sentido ocuparon los últimos puestos del ranking, resultando en la de mayor consumo de energía para realizar el corte. Finalmente, se puede observar que, a medida que el consumo energético aumenta, el tiempo de mecanizado también crece y caso contrario la rugosidad superficial disminuye.

Al hablar de producción en masa se deben tomar en cuenta distintos puntos de vista, entre ellos: el tiempo de fabricación del producto y la calidad de este. Entonces, dependiendo de lo que se requiere podemos ubicarnos en un punto

en el que el tiempo empleado es corto pero la calidad superficial se va a ver afectada o viceversa, se obtiene la mejor calidad superficial posible, pero en un mayor tiempo de producción.

3.9 Discusión

Mediante el fresado de probetas de Duralón con diferentes tipos de estrategias de corte (corte en espiral, zigzag y un sentido), se buscó determinar la combinación de parámetros que optimice el tiempo de mecanizado y proporcione el mejor acabado superficial. Para ello, se estableció una metodología que consideró algunos criterios que delimitaron el diseño experimental, como, por ejemplo: características de la máquina, tipo de cortador, condiciones de corte a variar, parámetros a medir, etc. Además, se tomaron en cuenta aspectos como potencia consumida, emisión acústica y tipo de fresado, para evaluar el comportamiento de la estrategia, y de alguna forma, explicar su eficiencia en el mecanizado.

Los autores (Cervantes et al., 2012), ensayaron las estrategias corte en espiral, zigzag y un sentido en probetas de aluminio 1100, teniendo como variables la velocidad de rotación del husillo, velocidad de avance, profundidad de pasada y el diámetro del cortador; como parámetros de control utilizaron el tiempo de mecanizado y la rugosidad superficial. Encontraron que, la estrategia de corte en espiral demanda menos tiempo, seguido de la estrategia en zigzag y corte en un sentido. En este trabajo de investigación desarrollado con Duralón se obtuvieron resultados similares con respecto al tiempo de corte para cada estrategia evaluada. Con respecto a la rugosidad superficial, José Cervantes concluye que el corte en zigzag proporciona mejores acabados, diferenciándose del presente trabajo en que la estrategia de corte en un sentido proporcionó la mejor rugosidad. Cabe recalcar, que aspectos como: el incremento de pasada lateral y tipo de fresado, no son tomados en cuenta para el análisis de sus resultados.

Para conseguir un mejor proceso de fresado de cavidades en acero con un bajo impacto en el tiempo de mecanizado, emisiones de carbono y costos, G.

Zhou et al., 2020 propone una metodología que busca optimizar los parámetros de corte y el diseño de las estrategias en base a modelos matemáticos dispuestos en algoritmos; considerando como parámetros de entrada a las características de la máquina, propiedades del material, características del cortador y parámetros de emisiones de carbono. El enfoque utilizado en su metodología establece una base para ser replicada con otros tipos de materiales, buscando evaluar parámetros similares. Sin embargo, el trabajo no incorpora a la rugosidad superficial como un parámetro a medir para la optimización del proceso.

3.10 Análisis de costos

El presente proyecto tuvo como principales gastos los insumos utilizados para la experimentación. La tabla 3.2 resume la cantidad de insumos utilizados, así como sus costos:

Tabla 3.2: Costos de insumos

CANT.	CONCEPTO	P. UNIT	TOTAL
6	Duralon esp. 100mm x 1000mm x 8 mm	18.00	108.00
9	Fresa HSS + Co 6mm - 4 cortes KEX	4.80	43.20
5	Cinta doble cara - marca 3M	3.18	15.92
1	Cronómetro Casio - HS-3V-1B	35.00	35.00
1	Tarjeta SD 128 GB	30.00	30.00
	SUB TOTAL		\$ 232.12
	IVA		\$ 27.85
	Total 1		\$ 259.97

A continuación, en la tabla 3.3, se enlistan los gastos por conceptos de alquiler de equipos.

Tabla 3.3: Costo de alquiler de equipos

EQUIPO	HORAS	COSTO [\$/hora]	TOTAL
Roland MDX – 40A	44	\$ 12/hora	\$ 528.00
Rugosímetro Phase II SRG 4500	30	\$ 5/hora	\$ 150.00
	Total 2		\$ 678.00

Finalmente, los gastos de viáticos (transporte al laboratorio) representan \$120. Por lo tanto, al sumar con el Total 1 y 2, el presente una inversión de \$1024.37.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La metodología desarrollada proporciona una secuencia lógica para el estudio experimental en procesos de fresado, por lo que, puede ser aplicada para probetas de diferentes materiales.
- Los ensayos previos mostraron que, utilizar una fresa recta de cuatro filos comparada con la de 2 filos permite realizar un fresado más estable y trabajar dentro de un rango de velocidades de avance más amplio, por ende, se obtienen bajos tiempos de mecanizado en la operación de desbaste.
- Los ensayos previos a la experimentación permitieron identificar un factor de proporcionalidad entre la velocidad del husillo y el avance, lo que permitió establecer un rango adecuado de parámetros de corte, además, se realizaron correcciones respecto al diseño de las estrategias de corte.
- El análisis de los parámetros de control (tiempo de mecanizado, consumo energético y rugosidad superficial), permitieron sugerir un rango de parámetros de corte adecuado para el fresado de cavidades en Duralón. Por otra parte, analizar la dirección de mecanizado, la potencia consumida y emisiones acústicas, proporcionaron criterios para aumentar la eficiencia de las estrategias de corte.
- La señal de potencia consumida vs tiempo refleja el comportamiento de las estrategias de corte con los parámetros ensayados en el mecanizado, por lo que, puede ser aplicada para realizar correcciones en la etapa de diseño. Además, presentar la información en gráficos tridimensionales proporciona un medio más real para el usuario en la toma de decisiones.
- La estrategia corte en un sentido generó el mayor tiempo de corte, siendo de 40 a 45% más alto que las estrategias en espiral y zigzag para todos los valores de RPM y velocidad de avance ensayados. Adicionalmente, presenta el mayor consumo de energía que las estrategias corte en espiral y zigzag. Sin embargo, los valores de rugosidad superficial obtenidos fueron los más bajos de todas las estrategias.

- La rugosidad superficial en probetas mecanizadas en Duralón mejora considerablemente con la aplicación de la estrategia corte en un sentido ($1.099 \mu\text{m}$), seguido por la estrategia de corte en espiral, con acabados más comerciales ($1.257 \mu\text{m}$). Por otra parte, la estrategia de corte en zigzag, con los parámetros ensayados, proporciona acabados superficiales fuera del rango aceptable para procesos de fresado.
- De acuerdo con el ranking de estrategias desarrollado, el corte en espiral se ubica en el primer puesto por presentar bajo tiempo de mecanizado y baja rugosidad superficial, seguida por la estrategia en zigzag. La estrategia corte en un sentido se ubicó en los últimos puestos por duplicar el tiempo en comparación con las otras estrategias.
- De acuerdo con lo observado en el ranking de estrategias, las probetas con mayor tiempo y consumo de energía presentan rugosidades bajas. Esto se debe a que, por la definición del proceso de acabado, se deben utilizar valores de velocidad de avance bajos lo que resultará en mayor tiempo de recorrido para la herramienta de corte.
- La probeta con los mejores valores de rugosidad, tiempo de mecanizado y consumo energético combinados fue obtenida con la estrategia de corte en espiral ($1.257\mu\text{m}$, 6.13 min y 7 Wh) con 15000 RPM y 2700 mm/min. Sin embargo, si se desean obtener los mejores valores de calidad superficial se encuentran en la probeta de la estrategia de corte en un sentido con $1.099\mu\text{m}$, 12.57 min y 14Wh a 10800RPM y 2100 mm/min.

4.2 Recomendaciones

- Implementar un sistema de adquisición de datos para los diferentes parámetros de control, con la finalidad de ampliar la experimentación y disminuir el tiempo de procesamiento de información.
- Adquirir el software del rugosímetro para poder analizar el perfil de rugosidad de cada probeta.
- Diseñar e implementar un mecanismo para la sujeción de probetas a la bancada de la fresadora Roland MDX-40A, de tal forma que disminuya las vibraciones generadas por la sujeción y facilite su extracción.

- Replicar la experimentación considerando un incremento de pasada lateral con $l > R$, con la finalidad de contrastar el efecto en el tiempo de mecanización y la rugosidad superficial.
- Implementar acciones de optimización (diseños híbridos, entrada con rampas, desahogo de virutas, etc) en el diseño de las estrategias de corte con la finalidad de aumentar su eficiencia.
- Contemplar la posibilidad de implementar un sistema de inteligencia artificial, que seleccione los parámetros de corte más adecuados para cada tipo de material, teniendo como entrada al proceso los valores correspondientes a los parámetros de control ensayados previamente.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- Black, S., Chiles, V., Lissaman, A., & Martin, S. (2002). *Principles of engineering manufacture* (Third, Vol. 3). Butterworth-Heinemann. [https://doi.org/10.1016/s0278-6125\(98\)80064-2](https://doi.org/10.1016/s0278-6125(98)80064-2)
- Camisón, C., Cruz, S., & González, T. (2006). *GESTIÓN DE LA CALIDAD: Conceptos, enfoques, modelos y sistemas* (A. Cañizal (ed.)). PEARSON EDUCACIÓN, S. A.
- Correa, M., Ramírez, M. D. J., Alique, J. R., & Rodríguez, C. a. (2004). Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos. *XXV Jornadas de Automática Industrial CEA-IFAC*, 8.
- Dwivedi, D. K. (2018). Surface engineering: Enhancing life of tribological components. In *Surface Engineering: Enhancing Life of Tribological Components*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-3779-2>
- El-Hofy, H. (2019). *Fundamentals of Machining Processes - Conventional and Nonconventional Processes Third* (Third). Taylor & Francis Group.
- Groover, M. (2020). Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems. In J. Brady (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Seventh, Vol. 53, Issue 9). Wiley. <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- Hanson, K. (2018). *Machining For Dummies* (K. Mohr, K. Dvorak, & W. Kennedy (eds.)). John Wiley & Sons, Inc.
- Kalpakjian, Serope; Schmid, S. R. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology* (sixth, Vol. 6). Pearson Prentice Hall.
- Kurtz, S. (2004). *The UHMWPE Handbook Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement*. Elsevier Academic Press.
- LEADER Carlow. (2007). *Introducción a la terminología de las Energías Renovables*. 21–34.
- Smid, P. (2007). *CNC Programming Handbook* (Third). Industrial Press, Inc. www.industrialpress.com
- Roland. (2010). *User 's Manual User ROLAND MODELA MDX40A* (Issue 408).
- Ullmann. (2016). *Ullmann's Polymers and Plastics - Products and Processes* (B. Elvers (ed.); Wiley-VCH). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/14356007>

ARTÍCULOS PRESENTADOS A UNA CONFERENCIA

- Bacca, G., Vásquez, I., & Pérez, J. (2015). *Diseño , construcción y caracterización de sistema neumático para la medición de rugosidad*. 18(35), 11.
- Cervantes, J., Barba, A., Vega, R., Valdez, R., & Espinosa, J. (2012). *Estudio de estrategias de corte en el proceso de fresado*. 1907, 135.
- Correa, M., Ramírez, M. D. J., Alique, J. R., & Rodríguez, C. a. (2004). Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos. *XXV Jornadas de Automática Industrial CEA-IFAC*, 8.

- Galarza, F. A. M., & Diniz, A. E. (2018). *Avaliação de um Novo Tipo de Amortecedor de Impacto para Fresa utilizada em Fresamento de Matrizes*. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.
- He, Y., Liu, F., Wu, T., Zhong, F. P., & Peng, B. (2012). Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(2), 255–266. <https://doi.org/10.1177/0954405411417673>
- Oh, S.-C., & Hildreth, A. J. (2016). *Pattern-Based Energy Consumption Analysis by Chaining Principle Component Analysis and Logistic Regression*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32729-7_5
- Romero, Pablo;Rodriguez, Oscar; Guerrero, Guillermo; Dorado, R. (2018). Selección de estrategias de cajeado para reducir el tiempo de mecanizado en la fabricación de llantas de automóvil. *Dyna (Spain)*, 94(3), 321–324. <https://doi.org/10.6036/8561>
- Shin, S. J., Woo, J., & Rachuri, S. (2017). Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters. *Journal of Cleaner Production*, 161, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.013>
- Shintoku, K., & Narita, H. (2017). Study on ball end milling of inclined surfaces for ultra high molecular weight polyethylene. *International Journal of Automation Technology*, 11(6), 948–957. <https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0948>
- Yin, Y., Guo, L., Han, N., Zheng, J., & Zhang, P. (2015). A new strategy of cavity cutting trajectory generation in high speed machining. *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 1–8. <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-53700>
- Yoon, H. S., Lee, J. Y., Kim, M. S., & Ahn, S. H. (2014). Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling. *Journal of Cleaner Production*, 78, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.061>
- Zhou, G., Zhang, C., Lu, F., & Zhang, J. (2020). Integrated optimization of cutting parameters and tool path for cavity milling considering carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119454>
- Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., & Xu, X. (2016). Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3721–3734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.093>

PÁGINAS WEB

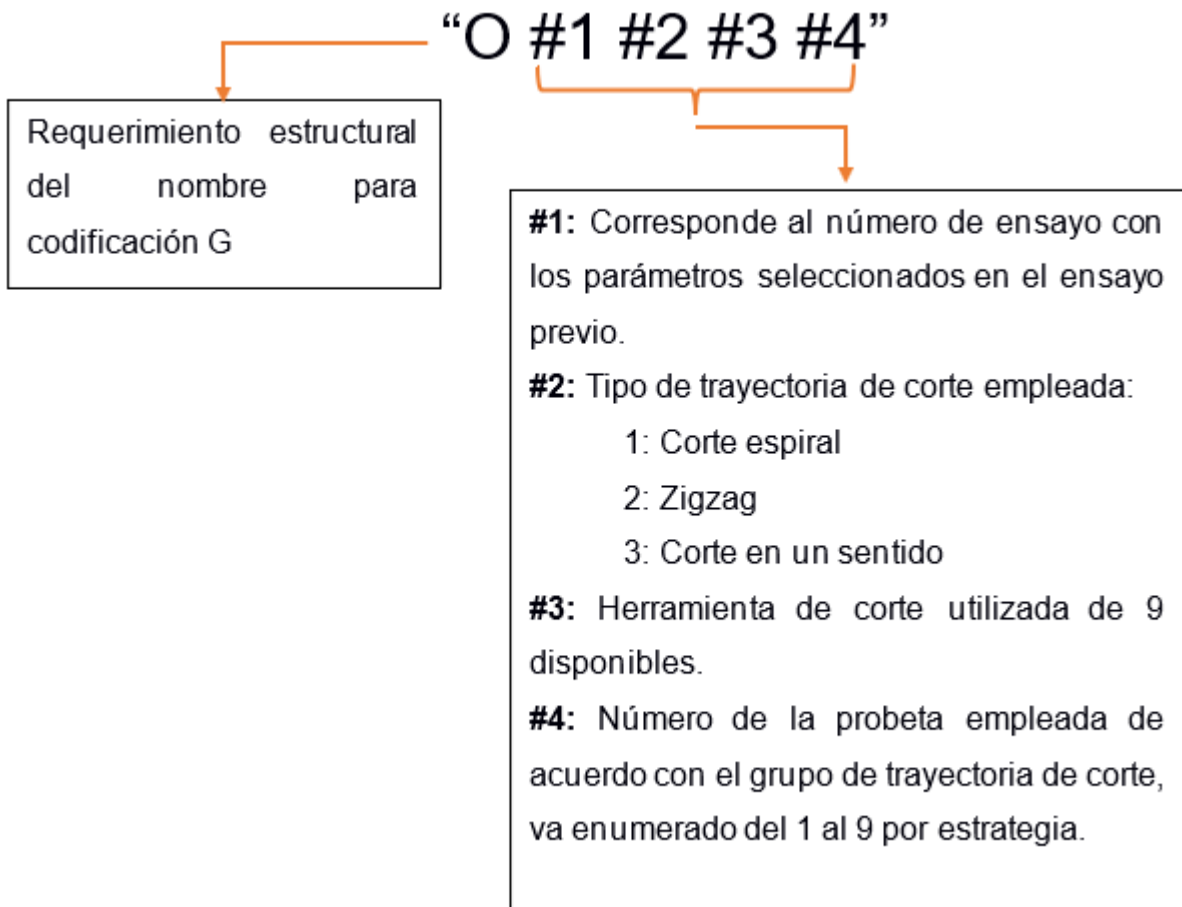
- BaLDR. (n.d.). *Single tariff electricity monitor power*. 1–4. <https://www.baldr.com/products/electricity-monitor-power-energy-usage-meter>
- Phasell. (2014). Portable Surface Roughness Gauge. *Portable Surface Roughness Gauge Part No. SRG-4500*, 201, 1–20. <http://www.phase2plus.com>
- RedWood. (2021). *UHMW Fab Guide*. <https://www.redwoodplastics.com/tools-data/fabrication-machining-guidelines/uhmw-fab-guide/>

APÉNDICES

APÉNDICE A

CODIFICACIÓN DE PROBETAS

La codificación adoptada hace referencia al código G empleado para su manufactura; dicho código emplea cinco caracteres, el primero corresponde a la letra “O” mayúscula seguido de cuatro números, es decir:



APÉNDICE B

TRAYECTORIAS DE CORTE

CÓDIGO DE CORTE – ESTRATEGIA EN ESPIRAL

%	G01 Y63;	G01 Y79;	Y19;
O2111	G01 X37;	G01 X21;	G01 X81;
G21	G01 Y37;	G01 Y21;	G01 Y81;
G90	G01 X35	G01 X19	G01 X19;
G54	Y35;	Y19;	G01 Y19;
G00 Z100;	G01 X65;	G01 X81;	G01 X21
G00 Y100;	G01 Y65;	G01 Y81;	Y21;
M03	G01 X35;	G01 X19;	G01 X79;
S10800;	G01 Y35;	G01 Y19;	G01 Y79;
G00 Z2;	G01 X33	G01 X17	G01 X21;
G00 X50	Y33;	Y17;	G01 Y21;
Y50;	G01 X67;	G01 X83;	G01 X23
G01 Z-1	G01 Y67;	G01 Y83;	Y23;
F120;	G01 X33;	G01 X17;	G01 X77;
G01 X47	G01 Y33;	G01 Y17;	G01 Y77;
Y4;	G01 X31	G01 X15	G01 X23;
F1500;	Y31;	Y15;	G01 Y23;
G01 X53;	G01 X69;	G01 X85;	G01 X25
G01 Y53;	G01 Y69;	G01 Y85;	Y25;
G01 X47;	G01 X31;	G01 X15;	G01 X75;
G01 Y47;	G01 Y31;	G01 Y15;	G01 Y75;
G01 X45	G01 X29	G01 X13	G01 X25;
Y45;	Y29;	Y13;	G01 Y25;
G01 X55;	G01 X71;	G01 X87;	G01 X27
G01 Y55;	G01 Y71;	G01 Y87;	Y27;
G01 X45;	G01 X29;	G01 X13;	G01 X73;
G01 Y45;	G01 Y29;	G01 Y13;	G01 Y73;
G01 X43	G01 X27	(Segunda pasada)	G01 X27;
Y43;	Y27;	G01 Z-2	G01 Y27;
G01 X57;	G01 X73;	F120;	G01 X29
G01 Y57;	G01 Y73;	G01 X87	Y29;
G01 X43;	G01 X27;	F1500;	G01 X71;
G01 Y43;	G01 Y27;	G01 Y87;	G01 Y71;
G01 X41	G01 X25	G01 X13;	G01 X29;
Y41;	Y25;	G01 Y13;	G01 Y29;
G01 X59;	G01 X75;	G01 X15	G01 X31
G01 Y59;	G01 Y75;	Y15;	Y31;
G01 X41;	G01 X25;	G01 X85;	G01 X69;
G01 Y41;	G01 Y25;	G01 Y85;	G01 Y69;
G01 X39	G01 X23	G01 X15;	G01 X31;
Y39;	Y23;	G01 Y15;	G01 Y31;
G01 X61;	G01 X77;	G01 X17	G01 X33
G01 Y61;	G01 Y77;	Y17;	Y33;
G01 X39;	G01 X23;	G01 X83;	G01 X67;
G01 Y39;	G01 Y23;	G01 Y83;	G01 Y67;
G01 X37	G01 X21	G01 X17;	G01 X33;
Y37;	Y21;	G01 Y17;	G01 Y33;
G01 X63;	G01 X79;	G01 X19	G01 X35

Y35;	Y43;	G01 Y25;	Y19;
G01 X65;	G01 X57;	G01 X23	G01 X81;
G01 Y65;	G01 Y57;	Y23;	G01 Y81;
G01 X35;	G01 X43;	G01 X77;	G01 X19;
G01 Y35;	G01 Y43;	G01 Y77;	G01 Y19;
G01 X37	G01 X41	G01 X23;	G01 X21
Y37;	Y41;	G01 Y23;	Y21;
G01 X63;	G01 X59;	G01 X21	G01 X79;
G01 Y63;	G01 Y59;	Y21;	G01 Y79;
G01 X37;	G01 X41;	G01 X79;	G01 X21;
G01 Y37;	G01 Y41;	G01 Y79;	G01 Y21;
G01 X39	G01 X39	G01 X21;	G01 X23
Y39;	Y39;	G01 Y21;	Y23;
G01 X61;	G01 X61;	G01 X19	G01 X77;
G01 Y61;	G01 Y61;	Y19;	G01 Y77;
G01 X39;	G01 X39;	G01 X81;	G01 X23;
G01 Y39;	G01 Y39;	G01 Y81;	G01 Y23;
G01 X41	G01 X37	G01 X19;	G01 X25
Y41;	Y37;	G01 Y19;	Y25;
G01 X59;	G01 X63;	G01 X17	G01 X75;
G01 Y59;	G01 Y63;	Y17;	G01 Y75;
G01 X41;	G01 X37;	G01 X83;	G01 X25;
G01 Y41;	G01 Y37;	G01 Y83;	G01 Y25;
G01 X43	G01 X35	G01 X17;	G01 X27
Y43;	Y35;	G01 Y17;	Y27;
G01 X57;	G01 X65;	G01 X15	G01 X73;
G01 Y57;	G01 Y65;	Y15;	G01 Y73;
G01 X43;	G01 X35;	G01 X85;	G01 X27;
G01 Y43;	G01 Y35;	G01 Y85;	G01 Y27;
G01 X45	G01 X33	G01 X15;	G01 X29
Y45;	Y33;	G01 Y15;	Y29;
G01 X55;	G01 X67;	G01 X13	G01 X71;
G01 Y55;	G01 Y67;	Y13;	G01 Y71;
G01 X45;	G01 X33;	G01 X87;	G01 X29;
G01 Y45;	G01 Y33;	G01 Y87;	G01 Y29;
G01 X47	G01 X31	G01 X13;	G01 X31
Y47;	Y31;	G01 Y13;	Y31;
G01 X53;	G01 X69;	(Cuarta pasada)	G01 X69;
G01 Y53;	G01 Y69;	G01 Z-4	G01 Y69;
G01 X47;	G01 X31;	F120;	G01 X31;
G01 Y47;	G01 Y31;	G01 X87	G01 Y31;
G01 X50	G01 X29	F1500;	G01 X33
Y50;	Y29;	G01 Y87;	Y33;
G01 Z-3	G01 X71;	G01 X13;	G01 X67;
F120;	G01 Y71;	G01 Y13;	G01 Y67;
G01 X47	G01 X29;	G01 X15	G01 X33;
Y47 F1500;	G01 Y29;	Y15;	G01 Y33;
G01 X53;	G01 X27	G01 X85;	G01 X35
G01 Y53;	Y27;	G01 Y85;	Y35;
G01 X47;	G01 X73;	G01 X15;	G01 X65;
G01 Y47;	G01 Y73;	G01 Y15;	G01 Y65;
G01 X45	G01 X27;	G01 X17	G01 X35;
Y45;	G01 Y27;	Y17;	G01 Y35;
G01 X55;	G01 X25	G01 X83;	G01 X37
G01 Y55;	Y25;	G01 Y83;	Y37;
G01 X45;	G01 X75;	G01 X17;	G01 X63;
G01 Y45;	G01 Y75;	G01 Y17;	G01 Y63;
G01 X43	G01 X25;	G01 X19	G01 X37;

G01 Y37;	G01 Y59;	Y45;	G01 Y47;
G01 X39	G01 X41;	G01 X55;	G01 X50
Y39;	G01 Y41;	G01 Y55;	Y50;
G01 X61;	G01 X43	G01 X45;	G00 Z2;
G01 Y61;	Y43;	G01 Y45;	G00 X100
G01 X39;	G01 X57;	G01 X47	Y100;
G01 Y39;	G01 Y57;	Y47;	M05;
G01 X41	G01 X43;	G01 X53;	M30;
Y41;	G01 Y43;	G01 Y53;	%
G01 X59;	G01 X45	G01 X47;	

CÓDIGO DE CORTE – ESTRATEGIA EN ZIGZAG

%	G01 X43;	G01 Y87;	G01 Y87;
O2241	G01 Y13;	G01 X87;	G01 X51;
G21	G01 X45;	G01 Y13;	G01 Y13;
G90	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X49;
G54	G01 X47;	(Segundo	G01 Y87;
G00 Z100;	G01 Y13;	descenso)	G01 X47;
G00 Y100;	G01 X49;	G01 Z-2	G01 Y13;
M03 S10800;	G01 Y87;	F120;	G01 X45;
G00 Z2;	G01 X51;	G01 Y13	G01 Y87;
G00 X13	G01 Y13;	F1500;	G01 X43;
Y13;	G01 X53;	G01 X85;	G01 Y13;
G01 Z-1	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X41;
F120;	G01 X55;	G01 X83;	G01 Y87;
G01 Y87	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 X39;
F1500;	G01 X57;	G01 X81;	G01 Y13;
G01 X15;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X37;
G01 Y13;	G01 X59;	G01 X79;	G01 Y87;
G01 X17;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 X35;
G01 Y87;	G01 X61;	G01 X77;	G01 Y13;
G01 X19;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X33;
G01 Y13;	G01 X63;	G01 X75;	G01 Y87;
G01 X21;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 X31;
G01 Y87;	G01 X65;	G01 X73;	G01 Y13;
G01 X23;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X29;
G01 Y13;	G01 X67;	G01 X71;	G01 Y87;
G01 X25;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 X27;
G01 Y87;	G01 X69;	G01 X69;	G01 Y13;
G01 X27;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X25;
G01 Y13;	G01 X71;	G01 X67;	G01 Y87;
G01 X29;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 X23;
G01 Y87;	G01 X73;	G01 X65;	G01 Y13;
G01 X31;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X21;
G01 Y13;	G01 X75;	G01 X63;	G01 Y87;
G01 X33;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 X19;
G01 Y87;	G01 X77;	G01 X61;	G01 Y13;
G01 X35;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X17;
G01 Y13;	G01 X79;	G01 X59;	G01 Y87;
G01 X37;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 X15;
G01 Y87;	G01 X81;	G01 X57;	G01 Y13;
G01 X39;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X13;
G01 Y13;	G01 X83;	G01 X55;	G01 Y87;
G01 X41;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y87;	G01 X85;	G01 X53;	G01 Z-3

F120;	G01 Y87;	G01 X85;	G01 X43;
G01 Y87	G01 X55;	G01 Y87;	G01 Y13;
F1500;	G01 Y13;	G01 X83;	G01 X41;
G01 X15;	G01 X57;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X81;	G01 X39;
G01 X17;	G01 X59;	G01 Y87;	G01 Y13;
G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X79;	G01 X37;
G01 X19;	G01 X61;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X77;	G01 X35;
G01 X21;	G01 X63;	G01 Y87;	G01 Y13;
G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X75;	G01 X33;
G01 X23;	G01 X65;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X73;	G01 X31;
G01 X25;	G01 X67;	G01 Y87;	G01 Y13;
G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X71;	G01 X29;
G01 X27;	G01 X69;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X69;	G01 X27;
G01 X29;	G01 X71;	G01 Y87;	G01 Y13;
G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X67;	G01 X25;
G01 X31;	G01 X73;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X65;	G01 X23;
G01 X33;	G01 X75;	G01 Y87;	G01 Y13;
G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X63;	G01 X21;
G01 X35;	G01 X77;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X61;	G01 X19;
G01 X37;	G01 X79;	G01 Y87;	G01 Y13;
G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X59;	G01 X17;
G01 X39;	G01 X81;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X57;	G01 X15;
G01 X41;	G01 X83;	G01 Y87;	G01 Y13;
G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X55;	G01 X13;
G01 X43;	G01 X85;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X53;	G01 Y13;
G01 X45;	G01 X87;	G01 Y87;	G00 Z2;
G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X51;	G00 X100
G01 X47;	G01 Y87;	G01 Y13;	Y100;
G01 Y13;	(Cuarto	G01 X49;	M05;
G01 X49;	descenso)	G01 Y87;	M30;
G01 Y87;	G01 Z-4	G01 X47;	%
G01 X51;	F120;	G01 Y13;	
G01 Y13;	G01 Y13	G01 X45;	
G01 X53;	F1500;	G01 Y87;	

CÓDIGO DE CORTE – ESTRATEGIA EN UN SENTIDO

%	F120;	G01 Y87;	G01 Y87;
O2371	G01 Y13	G01 X21;	G01 X29;
G21	F1500;	G01 Y13;	G01 Y13;
G90	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X31;
G54	G01 X15;	G01 X23;	G01 Y13;
G00 Z100;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G00 Y100;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X33;
M03 S10800;	G01 X17;	G01 X25;	G01 Y13;
G00 Z2;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G00 X13	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X35;
Y87;	G01 X19;	G01 X27;	G01 Y13;
G01 Z-1	G01 Y13;	G01 Y13;	

G01 Y87;	G01 X75;	G01 X63;	G01 Y13;
G01 X37;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X23;
G01 Y87;	G01 X77;	G01 X61;	G01 Y13;
G01 X39;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X21;
G01 Y87;	G01 X79;	G01 X59;	G01 Y13;
G01 X41;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X19;
G01 Y87;	G01 X81;	G01 X57;	G01 Y13;
G01 X43;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X17;
G01 Y87;	G01 X83;	G01 X55;	G01 Y13;
G01 X45;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y13;	G01 X15;
G01 Y87;	G01 X85;	G01 X53;	G01 Y13;
G01 X47;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X13;
G01 Y87;	G01 X87;	G01 X51;	G01 Y13;
G01 X49;	G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;
G01 Y13;	(Primer descenso)	G01 Y87;	(Segundo
G01 Y87;	G01 Z-2	G01 X49;	descenso)
G01 X51;	F120;	G01 Y13;	G01 Z-3
G01 Y13;	G01 Y87	G01 Y87;	F120;
G01 Y87;	F1500;	G01 X47;	G01 Y13;
G01 X53;	G01 X85;	G01 Y13;	F1500;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X45;	G01 X15;
G01 X55;	G01 X83;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X43;	G01 X17;
G01 X57;	G01 X81;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X41;	G01 X19;
G01 X59;	G01 X79;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X39;	G01 X21;
G01 X61;	G01 X77;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 X23;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X37;	G01 X23;
G01 X63;	G01 X75;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X35;	G01 X25;
G01 X65;	G01 X73;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X33;	G01 X27;
G01 X67;	G01 X71;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X31;	G01 X29;
G01 X69;	G01 X69;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X29;	G01 X31;
G01 X71;	G01 X67;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X27;	G01 X33;
G01 X73;	G01 X65;	G01 Y13;	G01 Y13;
G01 Y13;	G01 Y13;	G01 Y87;	G01 Y87;
G01 Y87;	G01 Y87;	G01 X25;	G01 X35;

G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X37;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X39;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X41;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X43;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X45;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X47;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X49;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X51;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X53;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X55;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X57;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X59;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X61;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X63;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X65;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X67;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X69;


G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X71;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X73;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X75;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X77;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X79;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X81;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X83;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X85;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X87;
G01 Y13;
(Tercero
descenso)
G01 Z-4
F120;
G01 Y87
F1500;
G01 X85;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X83;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X81;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X79;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X77;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X75;
G01 Y13;

G01 Y87;
G01 X73;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X71;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X69;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X67;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X65;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X63;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X61;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X59;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X57;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X55;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X53;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X51;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X49;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X47;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X45;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X43;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X41;
G01 Y13;

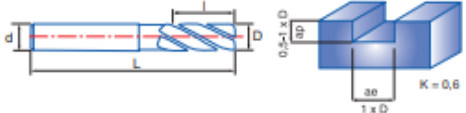
G01 Y87;
G01 X39;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X37;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X35;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X33;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X31;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X29;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X27;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X25;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X23;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X21;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X19;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X17;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X15;
G01 Y13;
G01 Y87;
G01 X13;
G01 Y13;
G01 Y87;
G00 Z2;
G00 X100
Y100;
M05;
M30;
%

APÉNDICE C

Ref. **4420**



FRESA FRONTAL ACABADO HSSE 8% CO 2Z
 2Z HSSE 8% Co Finishing End Mill
 Fraise Finition HSSE 8% Co 2Z



HSSE 8% Co	HSSE 8% Co + TIALSIN	DIN 327 N	ISO 1641/1
Tol. D (e8) d (h6)			

Material		Vc	
Grupo	Sub.	8% Co	TIALSIN
P	P.1	30-40	40-56
	K.1	20-30	25-45
K	K.2	15-20	20-25
	N.1	60-100	80-140
N	N.2	60-100	80-140
	N.3	160-200	220-280
	N.4	160-200	220-280
	N.5	50-80	70-110

Refs. 4420-4426 Avances fz*/rev. (mm/min.) Feed / Pas										
Ø 4	Ø 6	Ø 8	Ø 10	Ø 12	Ø 16	Ø 20	Ø 25	Ø 32	Ø 40	
0,020	0,030	0,035	0,050	0,060	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
0,020	0,030	0,035	0,050	0,060	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
0,014	0,030	0,035	0,050	0,060	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
0,020	0,030	0,035	0,050	0,060	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
0,020	0,030	0,035	0,050	0,060	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
0,025	0,042	0,062	0,067	0,080	0,100	0,130	0,130	0,130	0,130	
0,025	0,042	0,062	0,067	0,080	0,100	0,130	0,130	0,130	0,130	
0,020	0,030	0,035	0,050	0,060	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	

Vc= m/min. (K = Coeficiente Corrección / Correction Coefficient / Coefficient de Correction) $r.p.m. = \frac{Vc \times 1.000}{\pi \times \phi}$

*vf (mm/min.) = r.p.m. x Z x fz x K

D	d	L	l	Z	N° Art. 8% Co		N° Art. TIALSIN		D	d	L	l	Z	N° Art. 8% Co		N° Art. TIALSIN	
					€	€	€	€						€	€		
1,00	6	48	3	2	77335	12,81	77336	20,04	11,00	12	70	13	2	44303	22,35	41641	32,46
1,50	6	48	3	2	77334	13,05	77337	20,28	12,00	12	73	16	2	44306	19,61	41643	29,81
2,00	6	48	4	2	44249	11,44	41613	18,67	13,00	12	73	16	2	44309	28,81	41644	40,09
2,50	6	49	5	2	44252	11,44	41614	18,67	14,00	12	73	16	2	44312	28,81	41646	40,09
3,00	6	49	5	2	44255	11,44	41616	18,67	15,00	12	73	16	2	44315	32,22	41647	45,50
3,50	6	50	6	2	44258	12,44	41617	19,66	16,00	16	79	19	2	44318	28,34	41649	41,72
4,00	6	51	7	2	44261	11,44	41619	18,67	17,00	16	79	19	2	44321	38,35	41650	53,19
4,50	6	52	8	2	44264	13,69	41620	20,88	18,00	16	79	19	2	44324	38,35	41652	53,19
5,00	6	52	8	2	44267	11,44	41622	18,67	19,00	16	79	19	2	44327	48,37	41653	64,46
5,50	6	52	8	2	44270	14,09	41623	21,25	20,00	20	88	22	2	44330	45,78	41655	61,95
6,00	6	52	8	2	44273	11,44	41625	18,67	22,00	20	88	22	2	44333	59,90	41658	82,21
6,50	10	60	10	2	44276	18,42	41626	26,60	24,00	25	102	26	2	44336	80,20	41659	101,93
7,00	10	60	10	2	44279	17,88	41628	26,07	25,00	25	102	26	2	44339	75,89	41661	97,78
7,50	10	61	11	2	44282	17,72	41629	25,91	28,00	25	102	26	2	44342	96,02	41662	127,36
8,00	10	61	11	2	44285	14,73	41631	23,01	30,00	25	102	26	2	44345	109,42	41664	140,37
8,50	10	61	11	2	44288	19,90	41634	28,84	32,00	32	112	32	2	44348	112,38	41943	143,24
9,00	10	61	11	2	44291	18,30	41635	27,25	36,00	32	112	32	2	44351	150,33	41944	183,83
9,50	10	61	11	2	44294	19,47	41637	28,41	40,00	40	130	38	2	44354	184,57	41945	227,37
10,00	10	63	13	2	44297	14,63	41638	23,72									

Figura C1: Características de la fresa de dos filos marca Izar Tool.

Tabla C1: Entorno posteriormente al maquinado – corte en espiral

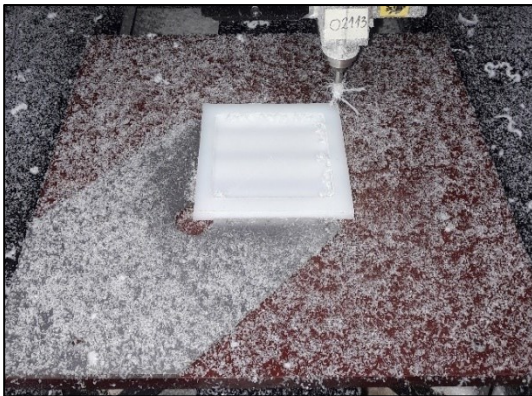
O2111



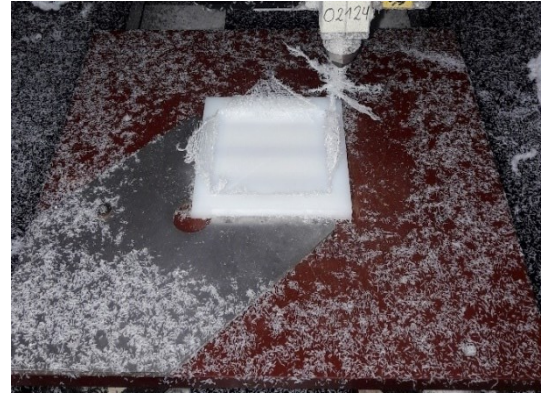
O2112



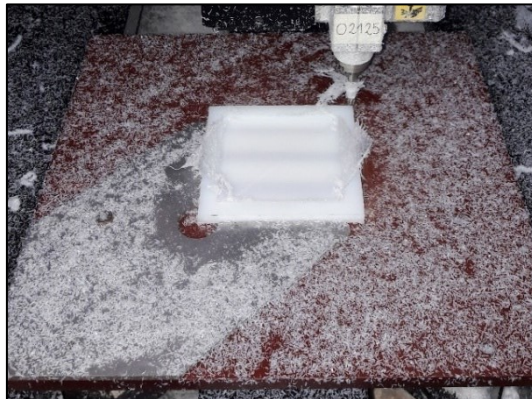
O2113



O2124



O2125



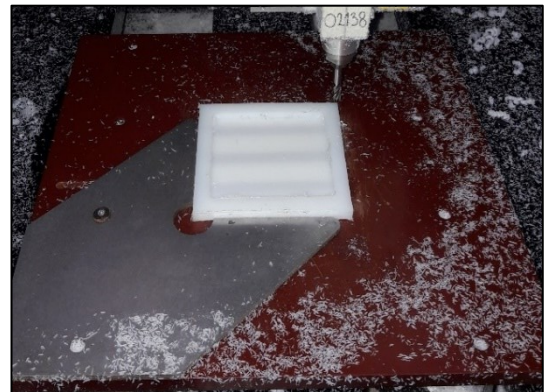
O2126



O2137



O2138



O2139

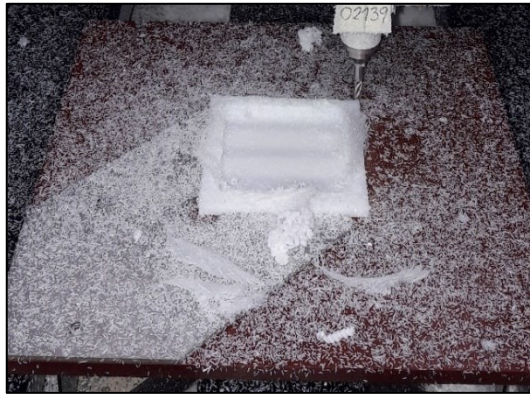


Tabla C2: Entorno posteriormente al maquinado – zigzag

O2241



O2242



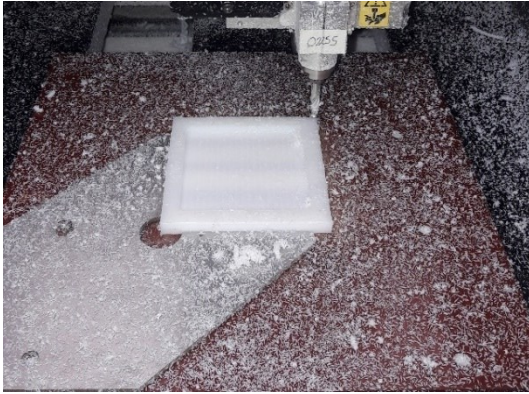
O2243



O2254



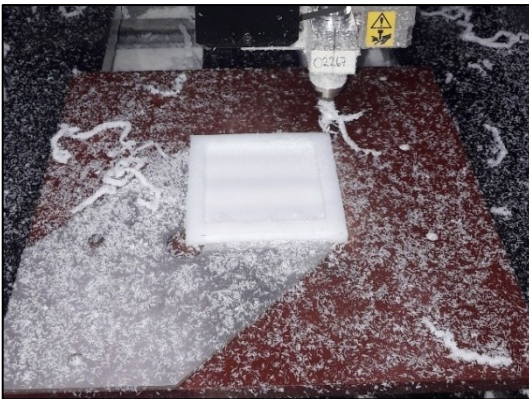
O2255



O2256



O2267



O2268



O2269

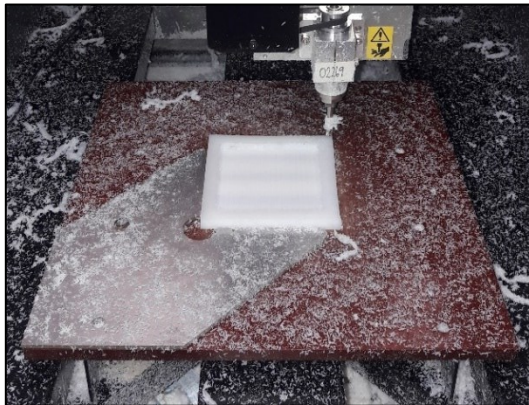


Tabla C3: Entorno posteriormente al maquinado – corte en un sentido

O2373



O2384



O2385



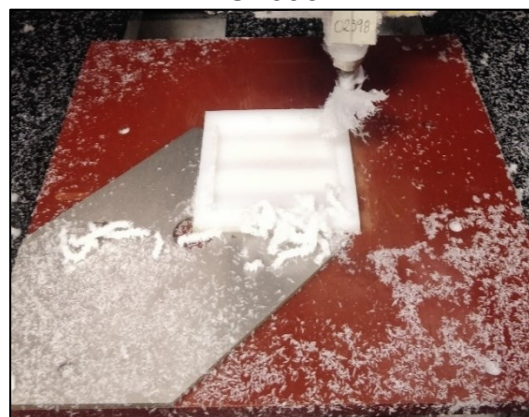
O2386



O2397



O2398



O2399



Tabla C4: Acabado de probetas – corte en espiral

O2111



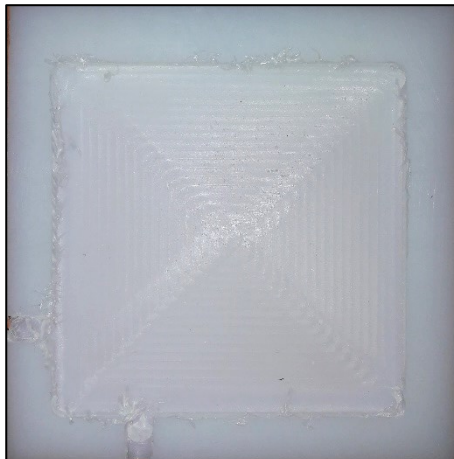
O2112



O2113



O2124



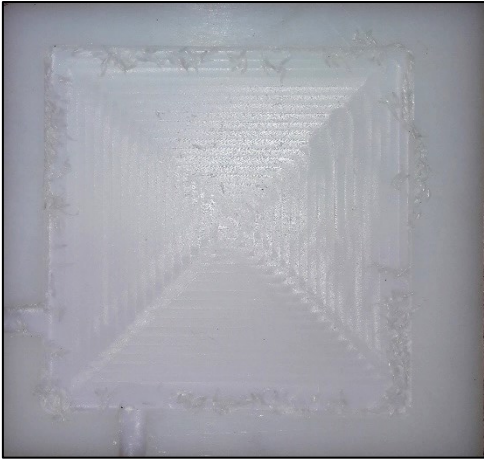
O2125



O2126



O2137



O2138



O2139

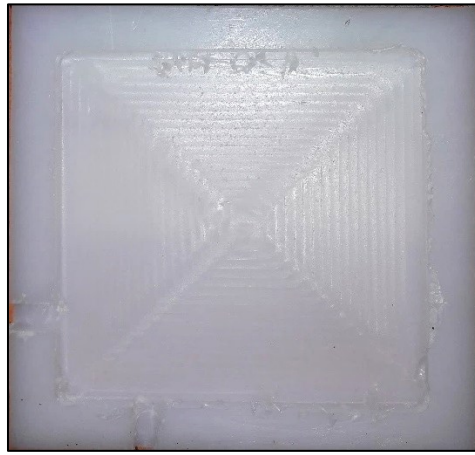


Tabla C5: Acabado de probetas – zigzag

O2241



O2242



O2243



O2254



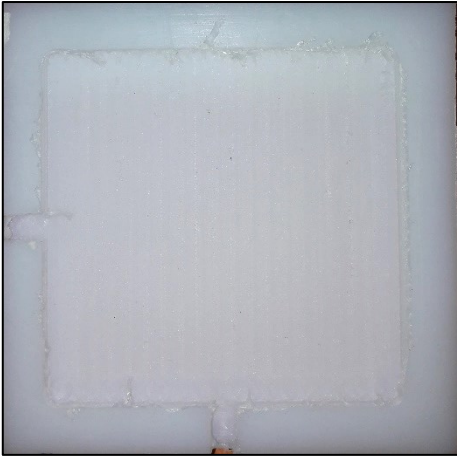
O2255



O2256



O2267



O2268



O2269

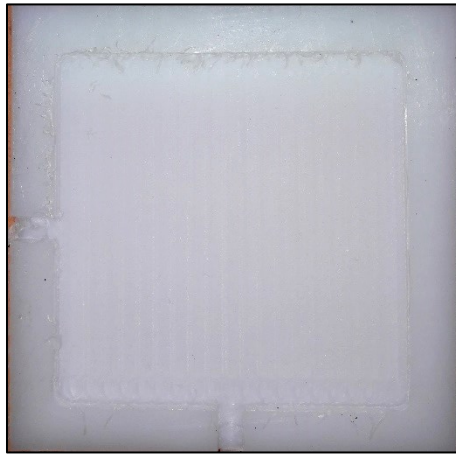


Tabla C6: Acabado de probetas –corte en un sentido

O2371



O2372



O2373



O2384



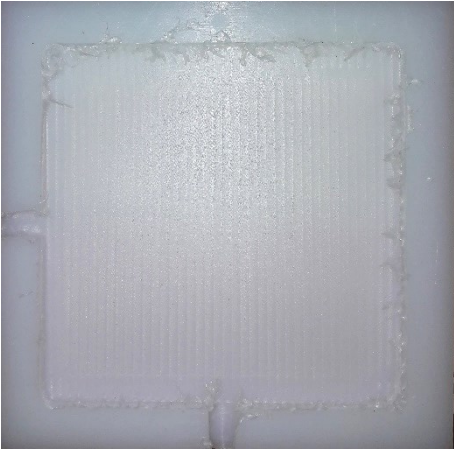
O2385



O2386



O2397



O2398



O2399



APÉNDICE D

ENSAYOS PREVIOS DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Variación de profundidad de corte

Cada uno de los parámetros de corte fueron seleccionados en base a la literatura técnica y recomendaciones para ser confrontados en la experimentación, por tal motivo, se ensayaron probetas con profundidades de corte iguala 0.5, 0.8 y 1 mm. A continuación, se presenta un gráfico donde es posible notar que a mayor dificultad para mecanizar dicha trayectoria, se demanda más potencia eléctrica.

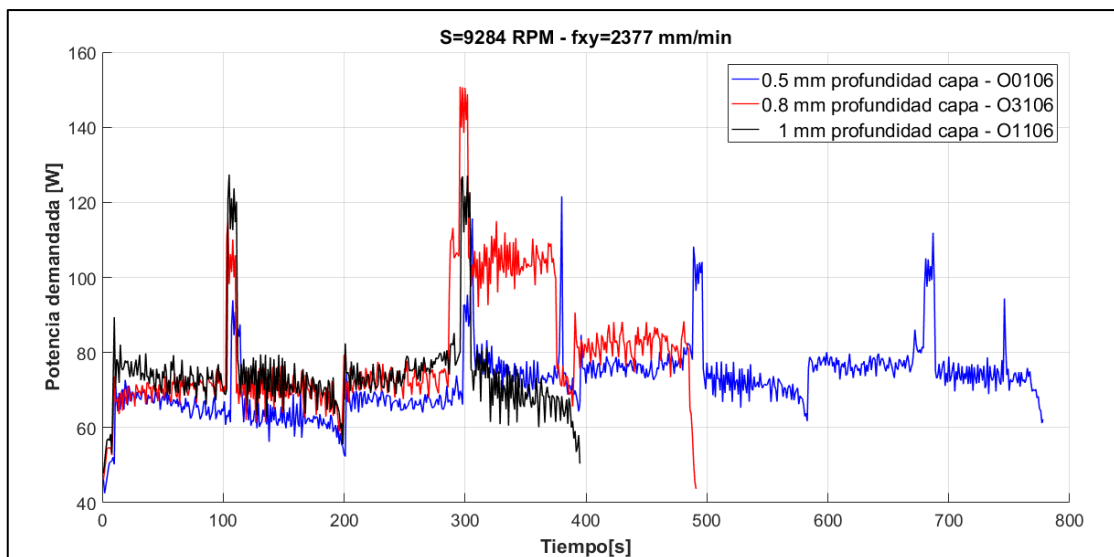


Figura D.1: Potencia vs tiempo para corte espiral con A_p de 0.5, 0.8 y 1 mm.

Tabla D.1: Detalles de ensayos previos.

	#	Cant.	Código	Vc	N	fx _y	f	Ap	n	k
ENSAYO	1	9	O0101	105	5570	1783	0.08	0.5	4	-
			O0102							
			O0103							
			O0104							
			O0105							
			O0106							
			O0107							
			O0108							
			O0109							
	2	1	O1106	175	9284	2377	0.08	1	4	-
	3	1	O3106	175	9284	2377	0.08	0.8	4	-
	4	1	O5105	169.64	9000	478	0.0443	1	2	0.6
	5	1	O7106	175	9284	2377	0.16	1	2	-
6	1	O9105	226.19	12000	1599	0.06662	1	2	-	
7	1	O1111-1	169.64	6800	1800	0.066	1	4	-	
8	1	O1111-2	169.6	6800	1800	0.066	1	4	-	
9	2	O1111-3	128	7200	1500	0.066	1	4	-	
10	1	O1112	170	9000	1500	0.066	1	4	-	
11	1	O1113	213	10800	1500	0.066	1	4	-	
12	1	O1113	213	10800	1500	0.066	1	4	-	
13	27	O21XY	203.63	10800	1500	0.066	1	4	0.526	
		O22XY	271.50	12900	2100					
		O23XY	339	15000	2700					

Tabla D.2: Descripción de ensayos previos.

# de ensayo	DESCRIPCIÓN DE ENSAYO
1	El ensayo consistió en fresar nueve probetas con la estrategia corte en espiral y con los parámetros de corte ajustados en base a la literatura, presentado en la tabla C1, posteriormente, se buscó comprobar el comportamiento del sistema con descensos de 0.8 y 1 m. La probeta O0106 fue utilizada como referencia para los siguientes ensayos por su excelente acabado superficial.
2	Mediante este ensayo, se demostró que es posible fresar con $A_p= 1\text{mm}$ de forma estable, por lo que fue el parámetro adoptado para los siguientes ensayos.
3	Este ensayo utilizó un descenso de 0.8 mm, contrastando con las probetas anteriores, se experimentó un atascamiento excesivo en la cuarta capa, esto se evidenció en el gráfico C.1 de potencia consumida, por lo que se descarta su uso.
4	En este ensayo se probó el cortador de dos filos y el factor de corrección del fabricante; el segundo descenso fue programado para que siga una trayectoria de corte horaria. Como resultado se evidenció mayor vibración en la parte superior de la cavidad y se incrementó el tiempo de mecanizado a 26 minutos. A partir de esta prueba se establecieron parámetros con mayor proporción entre sí.
5	Se utilizó el cortador de dos filos, la velocidad del husillo superior y la velocidad de avance intermedio del primer ensayo. El segundo descenso fue programado para que siga una trayectoria de corte horaria. El tiempo de mecanizado mejoró, pero el acabado superficial no superó al de la probeta O0106. Por tanto, no se continuó analizando este ensayo.
6	Este ensayo se caracteriza porque utilizó parámetros (Velocidad de husillo, avance por diente, velocidad de avance) recomendados por un software CAM, en el cual se presentaba la hipótesis del ensayo 4. El segundo descenso fue programado para que siga una trayectoria de corte horaria. Finalmente, se descartó cortar con este ensayo porque presentó marcas profundas producto de la vibración. Además, se abandonó la idea de fresar con el cortador de dos filos porque eleva el tiempo de mecanizado y proporciona pésimos acabados.
7	En esta prueba se definió el avance por diente a 0.066 mm/diente, debido a la revisión bibliográfica y a los ensayos previos, aunque no se completó el mecanizado en la probeta, se destaca su importancia porque se aumentó la proporción entre la velocidad del husillo y el avance. El segundo descenso fue programado para que siga una trayectoria de corte horaria.
8	Esta probeta utilizó los mismos parámetros de corte que el ensayo 7, se demostró que el error por atascamiento de viruta no fue un evento aleatorio, sino una mala proporción entre los parámetros. A diferencia del ensayo 7, se programó el segundo descenso para que siga una trayectoria de corte antihoraria.
9	Respecto al ensayo 8, se aumentó la velocidad del husillo y se disminuyó el avance, se realizó un ajuste para que estos se encuentren dentro del paso de máquina. La primera probeta no se pudo mecanizar, debido a un atascamiento de viruta.
10	Respecto al ensayo anterior, se aumentó a 9000 RPM la velocidad del husillo, la segunda trayectoria realizó un recorrido antihorario. No se completó la probeta por una pérdida de potencia que concluyó en un estancamiento.
11	En esta probeta se aumentó la velocidad del husillo, de acuerdo con la hipótesis planteada en el décimo ensayo; se mantuvo el recorrido antihorario. Se pudo concluir con el fresado de la cavidad, aunque se apreció patrones más definidos.
12	En base al ensayo 11, se mantuvo los parámetros de corte y se procedió a cambiar el recorrido a horario. La probeta se pudo mecanizar, sin embargo el patrón fue irregular.
13	El parámetros de corte de 10800RPM y 1500 mm/min se conservó como primer punto para la combinación final del ensayo, por tanto, se decidió utilizar el rango de 10800 a 15000 RPM con un recorrido de corte antihorario en las cuatro capas. Los ensayos previos demostraron la necesidad de aumentar la proporción entre la velocidad del husillo y del avance con un factor de 0.526, aplicable en las tres trayectorias.

APÉNDICE E

RESULTADOS ADICIONALES DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla E.1: Valores de rugosidad superficial

CÓDIGO	PUNTO 1				PUNTO 2			
	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
O2111	1.938	1.421	2.296	1.885	2.292	2.337	2.29	2.306
O2112	3.008	2.371	2.666	2.682	2.783	3.257	2.79	2.943
O2113	1.561	2.102	2.022	1.895	3.532	3.295	3.42	3.416
O2124	3.107	3.008	3.574	3.230	3.86	3.96	4.79	4.203
O2125	2.38	2.939	2.512	2.610	3.931	3.715	3.371	3.672
O2126	3.048	3.034	2.984	3.022	4.387	3.828	3.812	4.009
O2137	1.998	1.667	1.455	1.707	1.87	2.007	1.952	1.943
O2138	1.471	1.198	1.363	1.344	1.379	1.292	1.527	1.336
O2139	1.416	1.24	1.116	1.257	1.364	1.399	1.356	1.373
O2241	3.565	4.306	3.853	3.908	4.304	3.608	3.689	3.867
O2242	3.532	3.122	3.147	3.267	3.676	3.393	2.748	3.272
O2243	2.902	2.651	2.618	2.720	2.900	3.250	2.741	2.964
O2254	5.798	6.015	6.572	6.128	6.616	6.767	6.903	6.762
O2255	5.289	6.324	6.502	6.038	6.740	5.124	6.318	6.061
O2256	7.039	5.865	4.311	5.738	6.846	7.350	5.562	6.586
O2267	10.11	8.245	10.8	9.72	10.24	12.76	11.38	11.46
O2268	10.01	12.37	10.38	10.92	12.17	10.83	12.9	11.967
O2269	13.62	10.09	11.28	11.66	11.14	12.69	11.34	11.723
O2371	1.608	1.531	1.429	1.523	2.047	2.002	2.181	2.077
O2372	1.484	1.52	1.098	1.367	2.625	2.184	2.508	2.439
O2373	0.827	1.635	1.064	1.175	1.645	2.327	1.675	1.882
O2384	0.849	1.054	1.395	1.099	1.68	2.077	1.737	1.831
O2385	1.3	1.094	1.069	1.154	1.988	1.965	1.791	1.915
O2386	0.965	1.394	1.442	1.267	1.379	1.367	1.379	1.375
O2397	1.447	1.257	1.555	1.420	1.266	1.308	1.36	1.311
O2398	2.28	2.515	1.753	2.183	1.744	1.943	1.598	1.762
O2399	1.79	1.134	1.316	1.413	1.637	1.879	1.576	1.697

Tabla E.2: Resultados de parámetros de control

CÓDIGO	Tm simulación		Tm real		Consumo energético [Wh]	Rugosidad superficial [μm]	Ruido Leq [dB]
	[min]	[s]	[min]	[s]			
O2111	8.09	485.4	9.18	550.8	12	1.885	81.9
O2112	8.09	485.4	9.17	550.2	12	2.682	80.6
O2113	8.09	485.4	9.21	552.6	12	1.895	80.6
O2124	5.55	333	7.16	429.6	10	3.230	81.6
O2125	5.55	333	7.17	430.2	9	2.610	81.1
O2126	5.55	333	7.17	430.2	9	3.022	79.6
O2137	4.41	264.6	6.12	367.2	7	1.707	78.6
O2138	4.41	264.6	6.12	367.2	8	1.344	80.8
O2139	4.41	264.6	6.13	367.8	7	1.257	78.5
O2241	8.15	489	9.18	550.8	11	3.908	79.9
O2242	8.15	489	9.18	550.8	11	3.267	78.6
O2243	8.15	489	9.18	550.8	11	2.720	79.3
O2254	6	360	7.17	430.2	7	6.128	77.2
O2255	6	360	7.17	430.2	8	6.038	77.7
O2256	6	360	7.17	430.2	8	5.738	78
O2267	4.44	266.4	5.58	334.8	7	9.72	79.7
O2268	4.44	266.4	5.58	334.8	7	10.92	79.6
O2269	4.44	266.4	5.56	333.6	7	11.66	79.8
O2371	15.19	911.4	16.51	990.6	17	1.523	80.47
O2372	15.19	911.4	16.51	990.6	17	1.367	80
O2373	15.19	911.4	16.51	990.6	19	1.175	81
O2384	11.02	661.2	12.57	754.2	13	1.099	80.9
O2385	11.02	661.2	13	780	15	1.154	80.5
O2386	11.02	661.2	13	780	14	1.267	78.2
O2397	8.39	503.4	10.21	612.6	11	1.420	77.9
O2398	8.39	503.4	10.21	612.6	11	2.183	77.4
O2399	8.39	503.4	10.25	615	11	1.413	79.1

Tabla E.3: Ranking de Consumo energético ordenado por tiempo.

CÓDIGO	Parámetros de corte		Parámetros de control		
	RPM	AVANCE [mm/min]	<Wh	< Tm	<Rugosidad
O2269	15000	2700	7	5.56	11.66
O2267	10800	2700	7	5.58	9.72
O2268	12900	2700	7	5.58	10.92
O2137	10800	2700	7	6.12	1.707
O2138	12900	2700	7	6.12	1.344
O2139	15000	2700	7	6.13	1.257
O2124	10800	2100	10	7.16	3.23
O2125	12900	2100	9	7.17	2.61
O2126	15000	2100	9	7.17	3.022
O2254	10800	2100	7	7.17	6.128
O2255	12900	2100	8	7.17	6.038
O2256	15000	2100	8	7.17	5.738
O2112	12900	1500	12	9.17	2.682
O2111	10800	1500	12	9.18	1.885
O2241	10800	1500	11	9.18	3.908
O2242	12900	1500	11	9.18	3.267
O2243	15000	1500	11	9.18	2.72
O2113	15000	1500	12	9.21	1.895
O2397	10800	2700	11	10.21	1.42
O2398	12900	2700	11	10.21	2.183
O2399	15000	2700	11	10.25	1.413
O2384	10800	2100	14	12.57	1.099
O2385	12900	2100	15	13	1.154
O2386	15000	2100	14	13	1.267
O2371	10800	1500	17	16.51	1.523
O2372	12900	1500	17	16.51	1.367
O2373	15000	1500	19	16.51	1.175

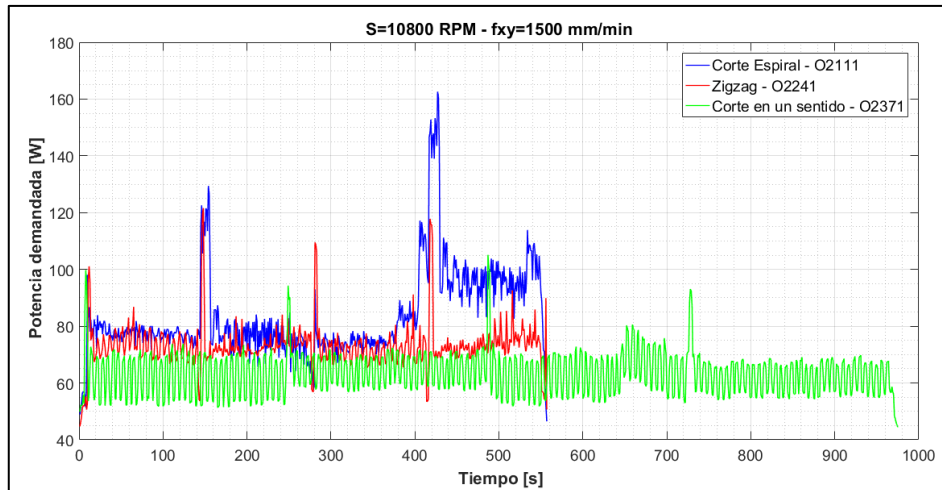


Figura E.1: Potencia vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 1500mm/min

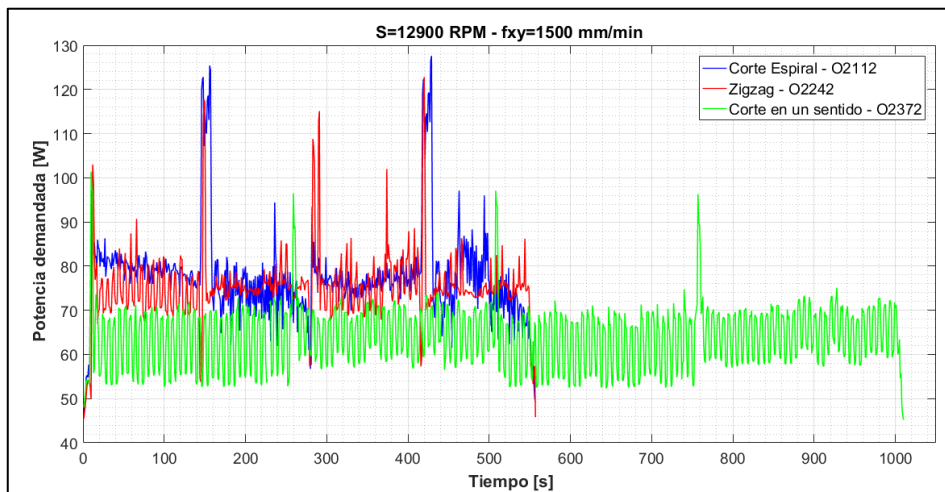


Figura E.2: Potencia vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 1500mm/min



Figura E.3: Potencia vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 1500mm/min

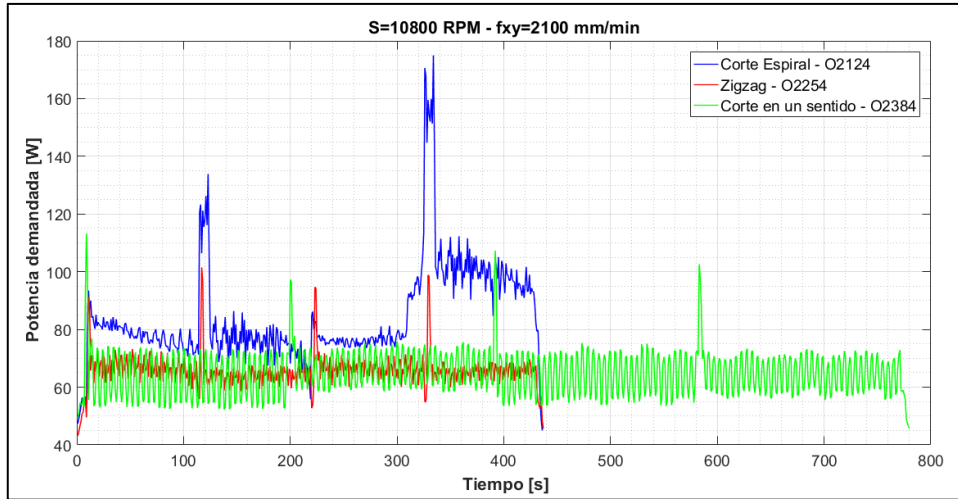


Figura E.4: Potencia vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 2100mm/min

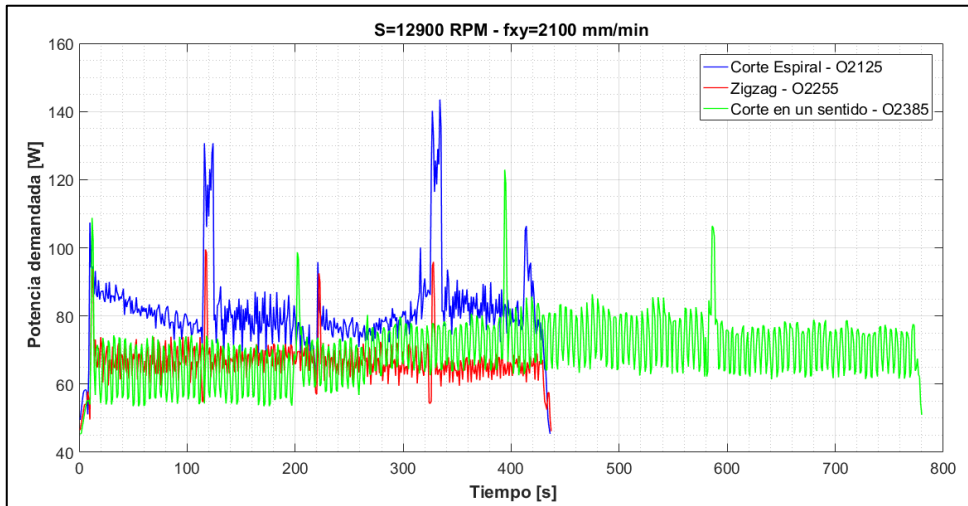


Figura E.5: Potencia vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 2100mm/min

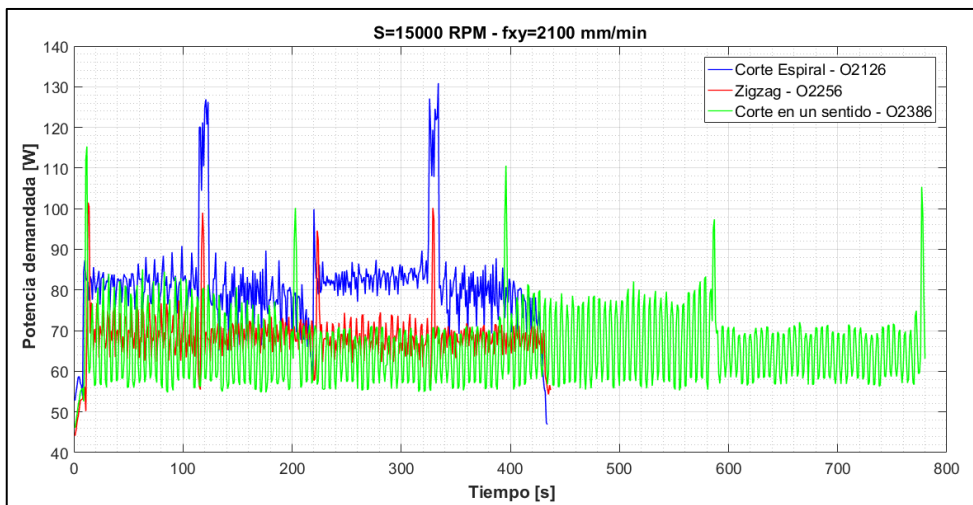


Figura E.6: Potencia vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 2100mm/min

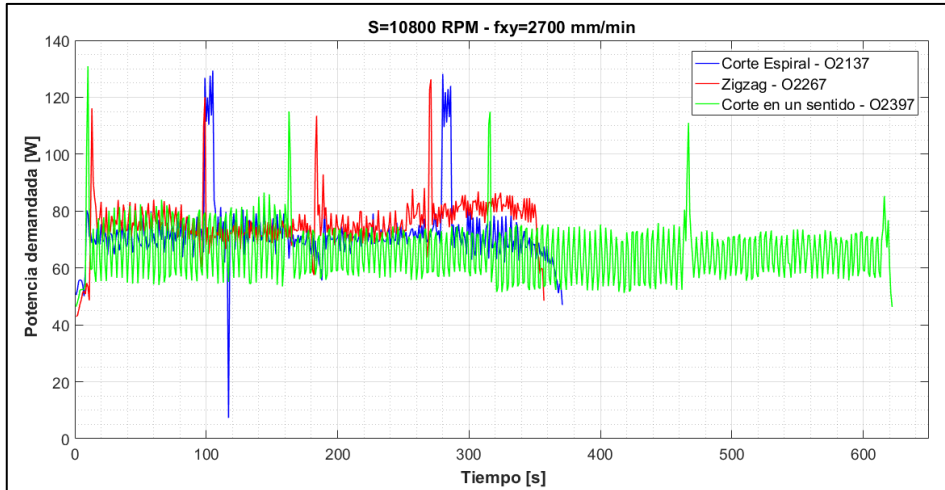


Figura E.7: Potencia vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 2700mm/min

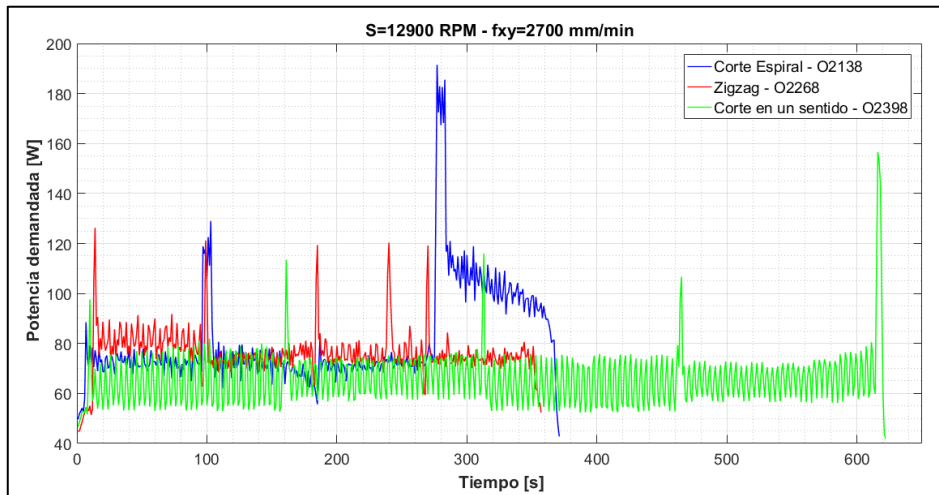


Figura E.8: Potencia vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 2700mm/min

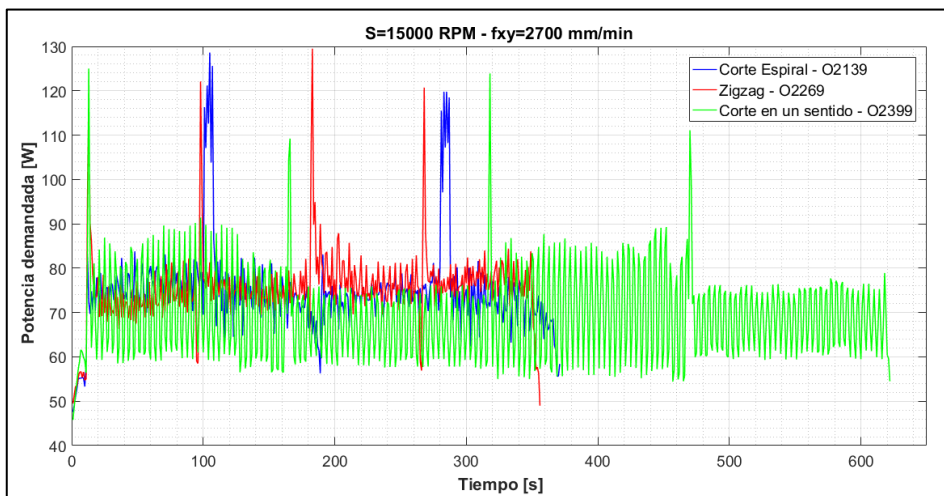


Figura E.9: Potencia vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 2700mm/min

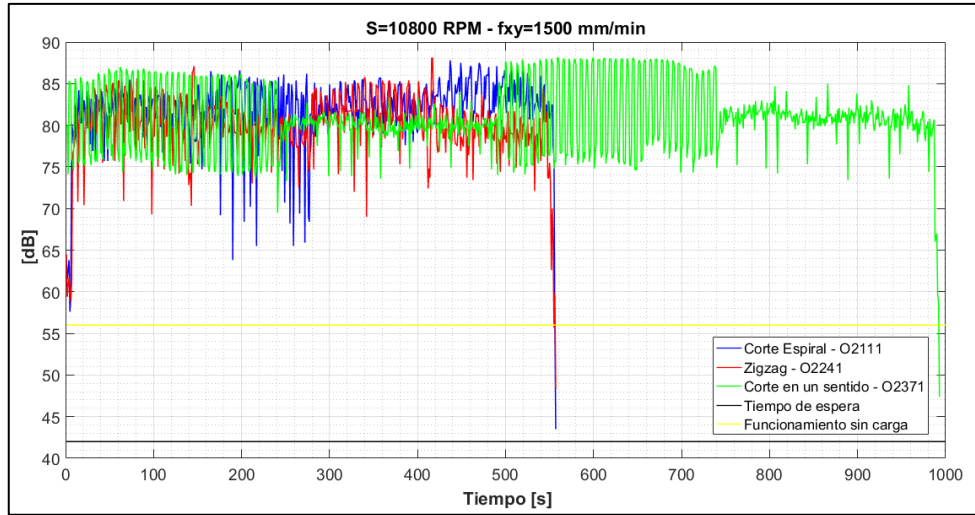


Figura E.10: dB vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 1500mm/min

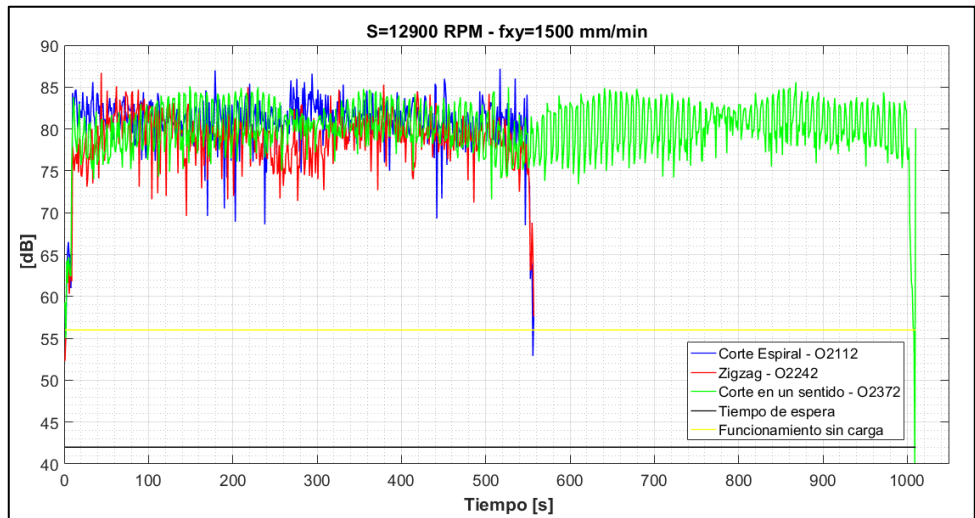


Figura E.11: dB vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 1500mm/min

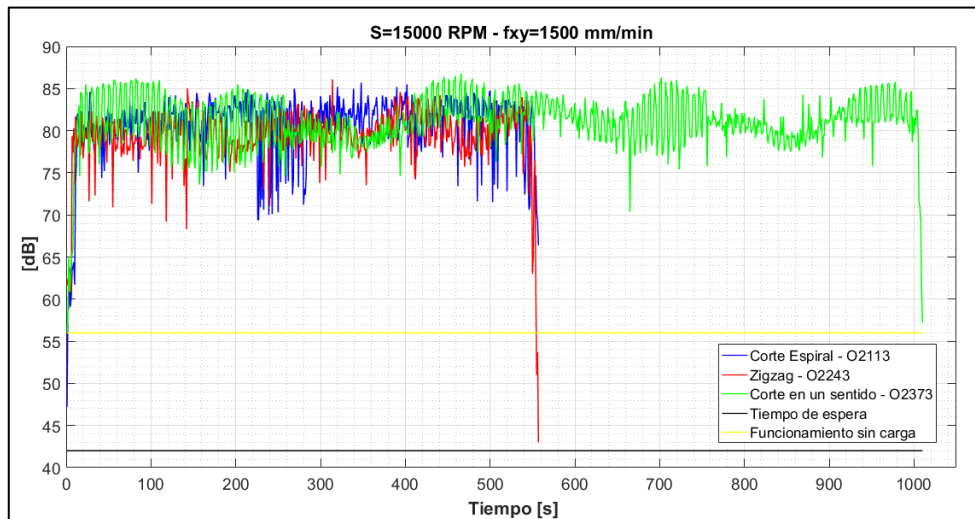


Figura E.12: dB vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 1500mm/min

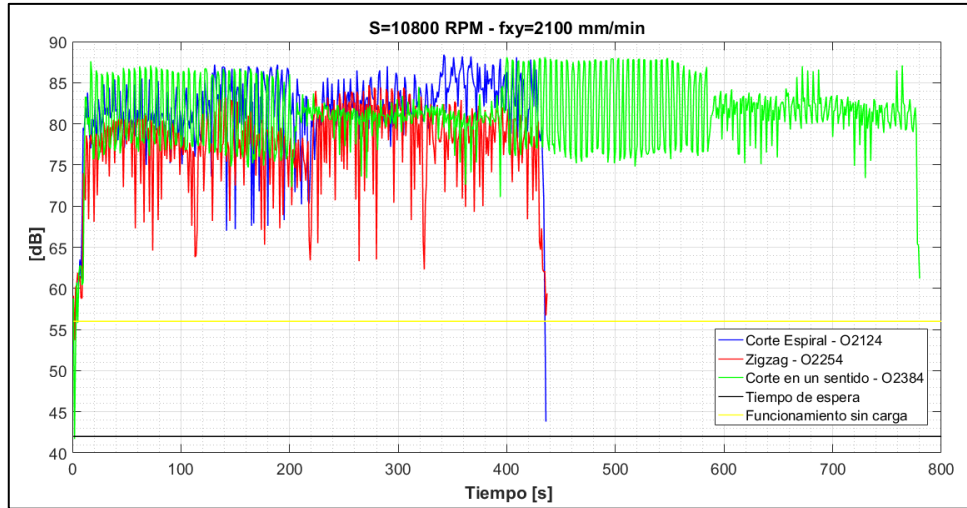


Figura E.13: dB vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 2100mm/min

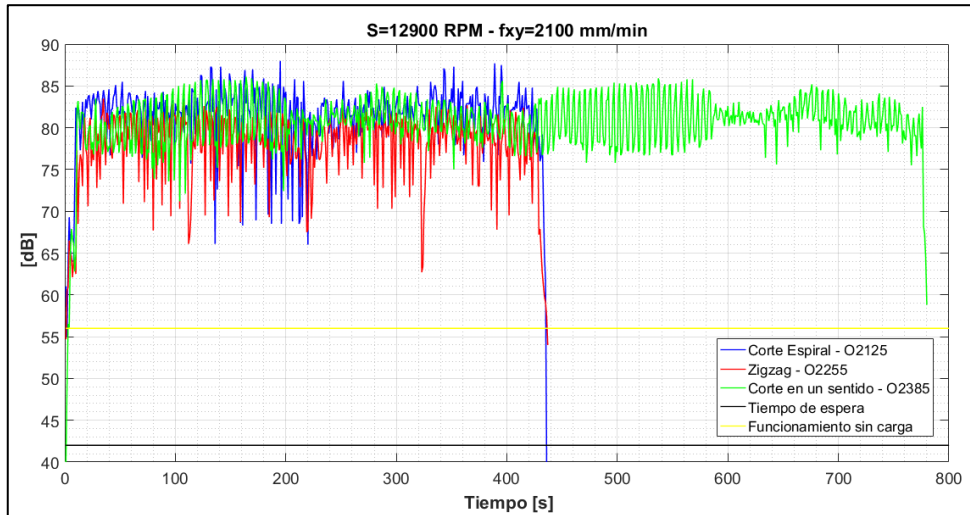


Figura E.14: dB vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 2100mm/min

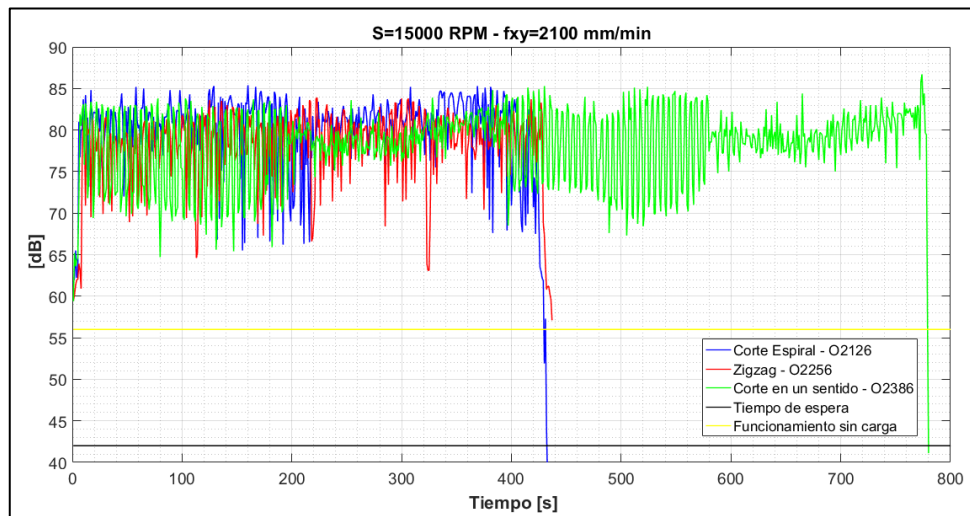


Figura E.15: dB vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 2100mm/min

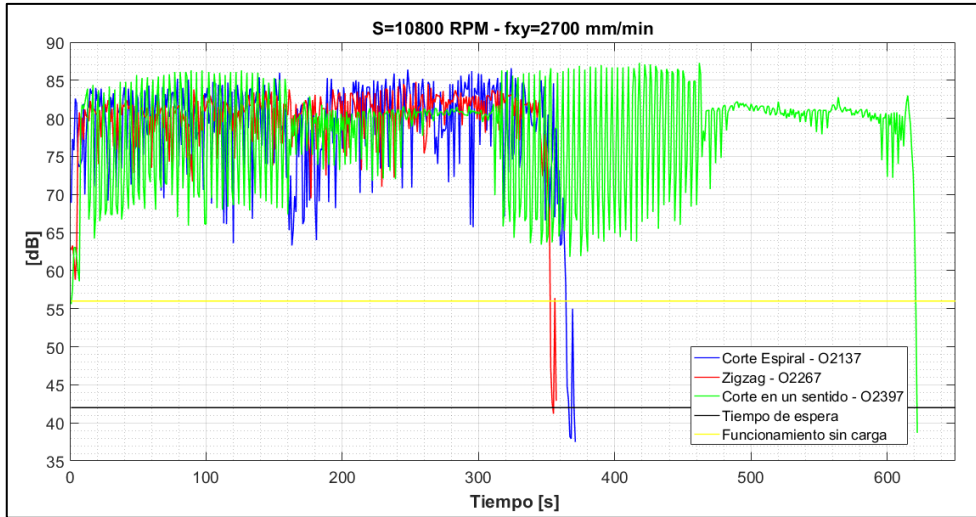


Figura E.16: dB vs tiempo entre trayectorias 10800RPM - 2700mm/min

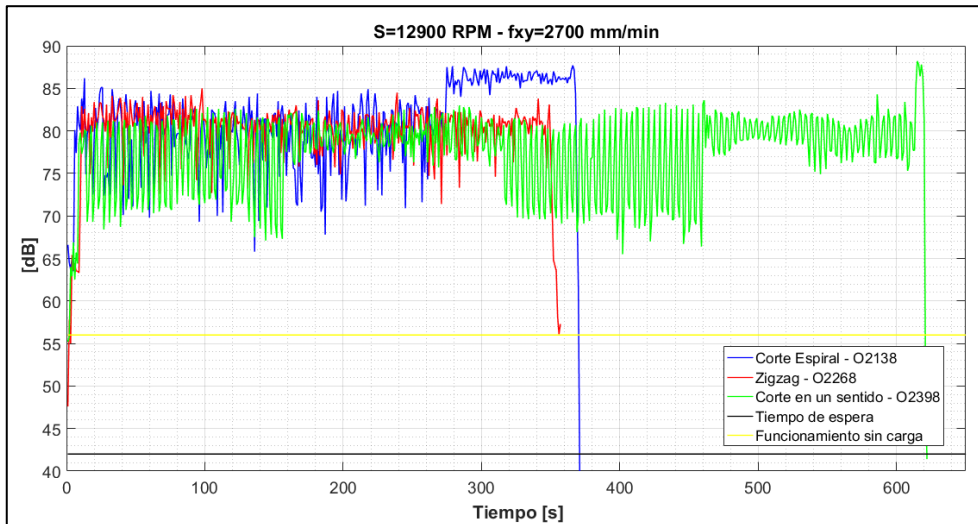


Figura E.17: dB vs tiempo entre trayectorias 12900RPM - 2700mm/min

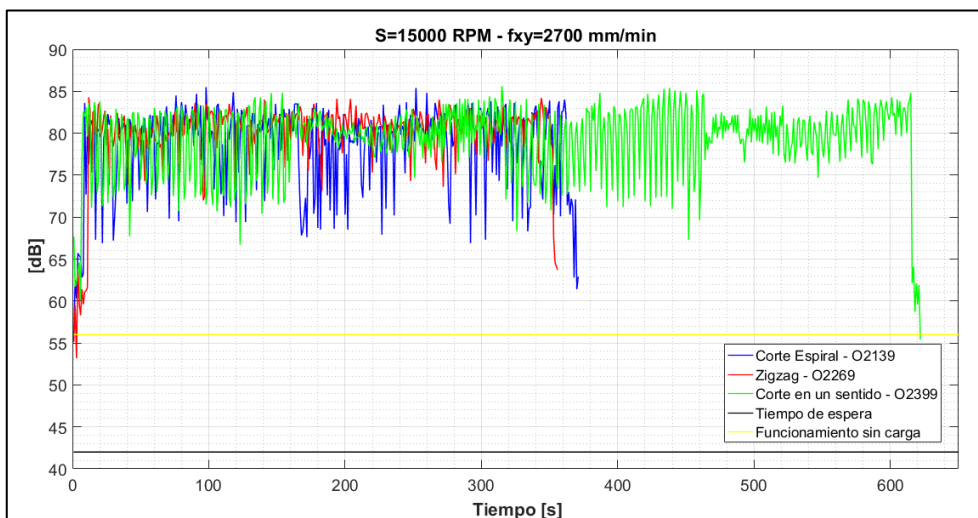


Figura E.18: dB vs tiempo entre trayectorias 15000RPM - 2700mm/min

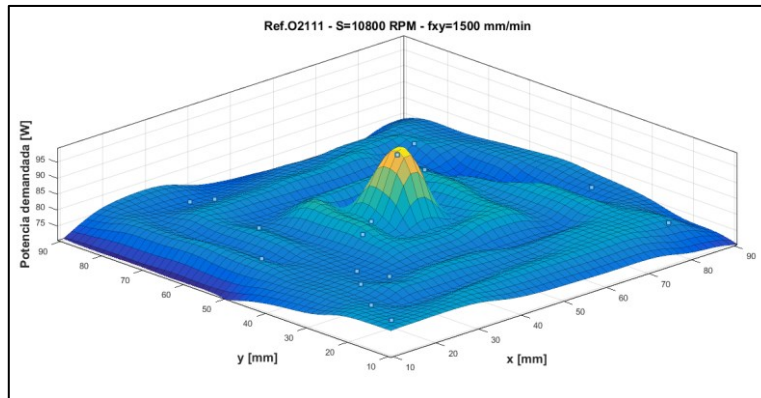
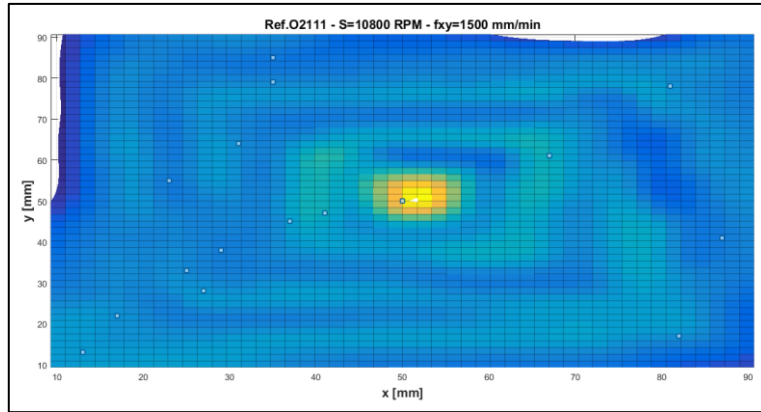


Figura E.19: Potencia sobre trayectoria en espiral 10800 RPM -1500mm/min.

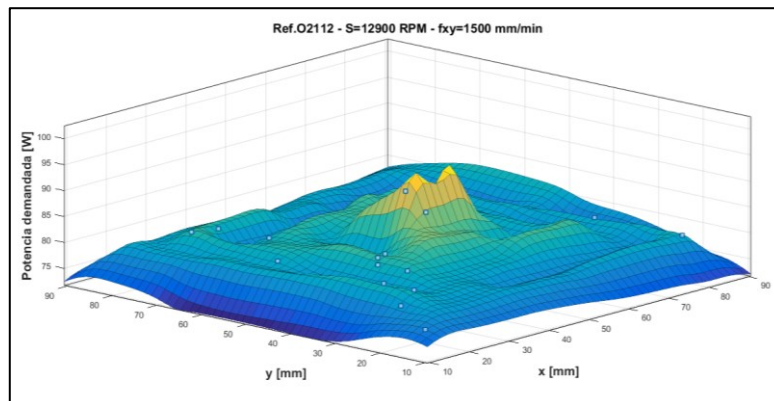
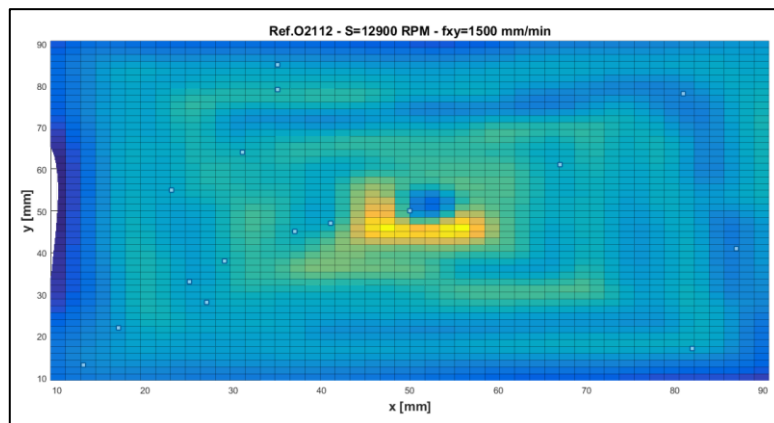


Figura E.20: Potencia sobre trayectoria en espiral 12900 RPM -1500mm/min.

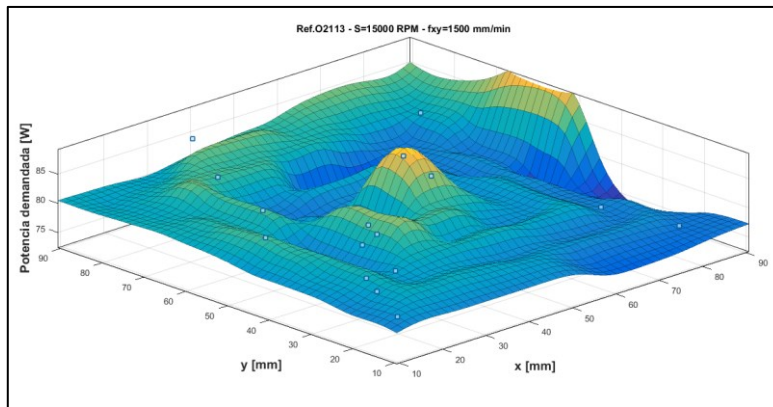
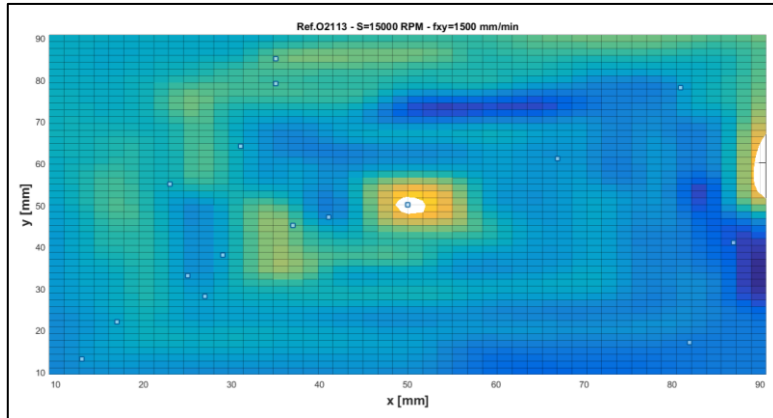


Figura E.21: Potencia sobre trayectoria en espiral 15000 RPM -1500mm/min.

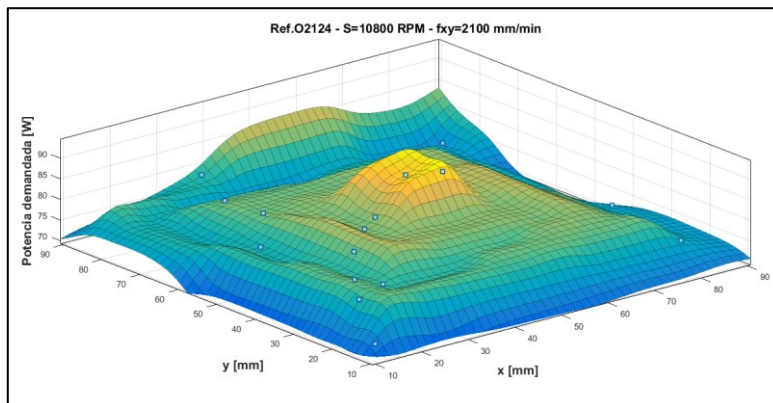
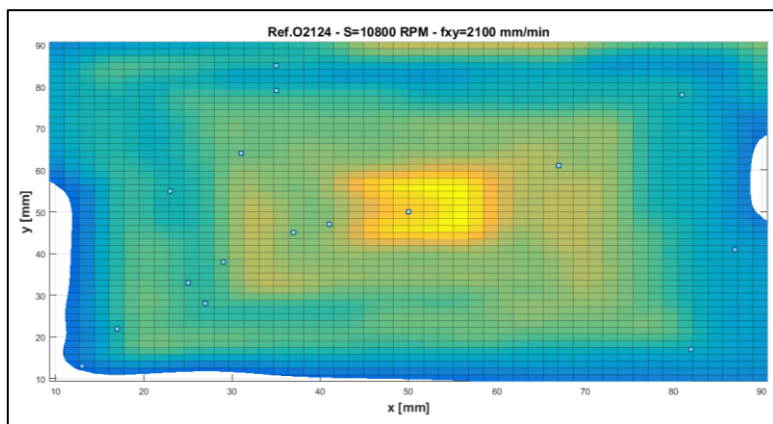


Figura E.22: Potencia sobre trayectoria en espiral 10800 RPM - 2100mm/min.

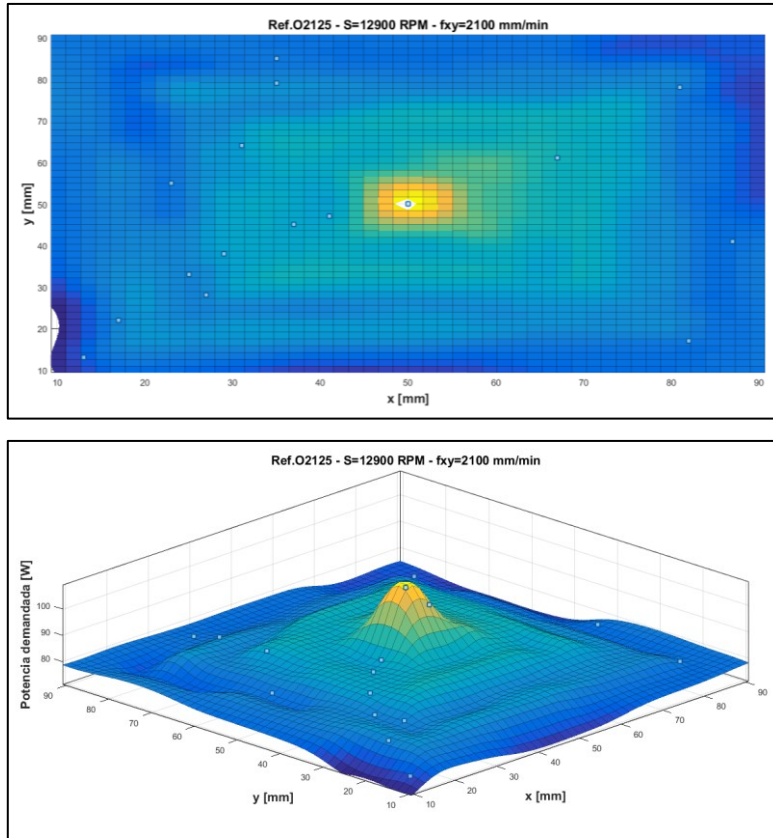


Figura E.23: Potencia sobre trayectoria en espiral 12900 RPM - 2100mm/min.

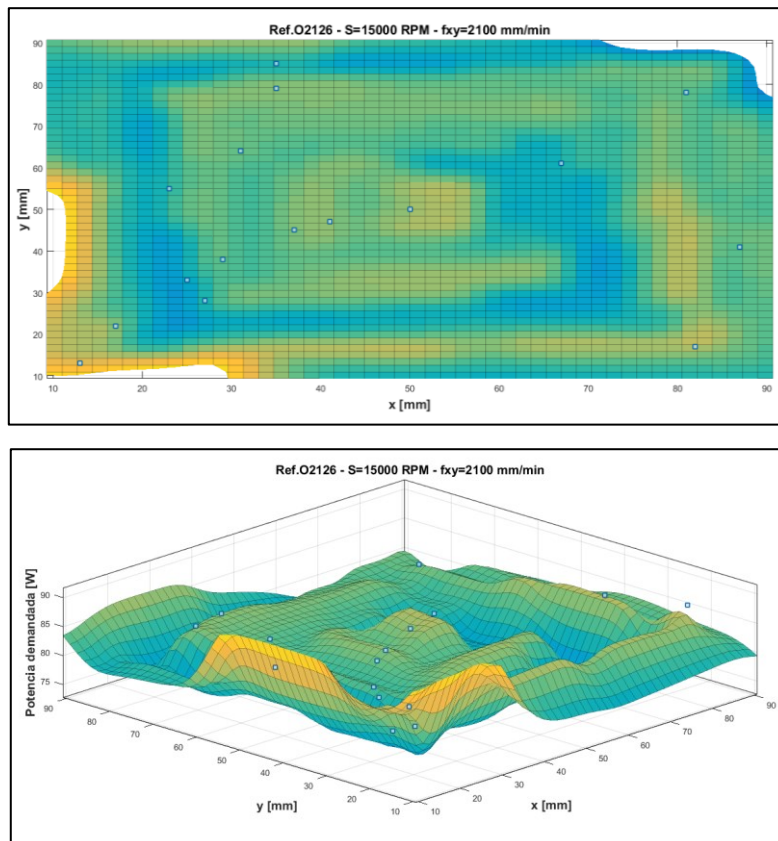


Figura E.24: Potencia sobre trayectoria en espiral 15000 RPM - 2100mm/min.

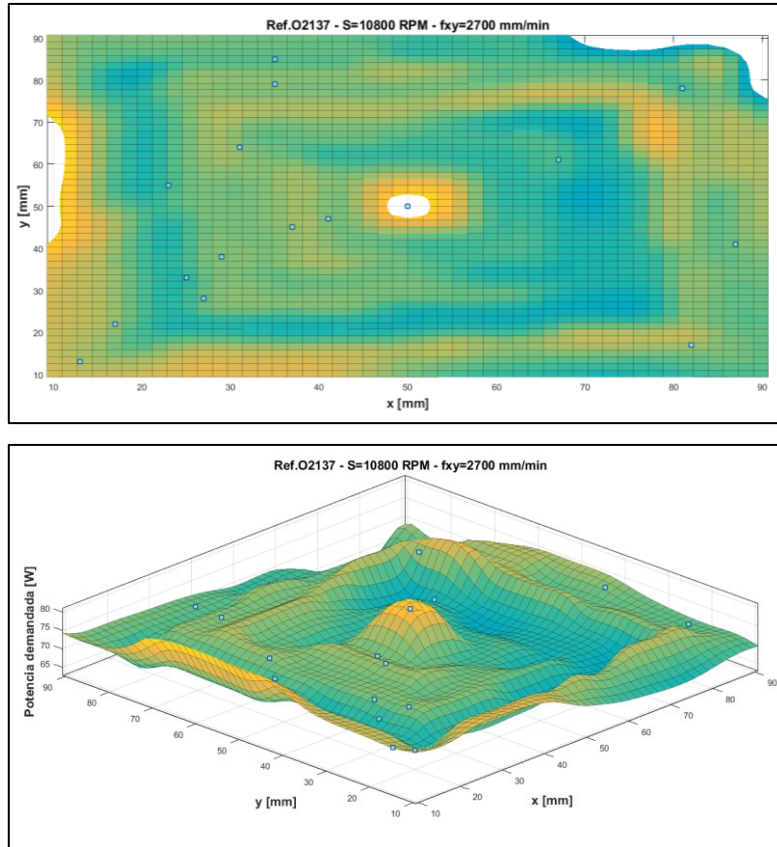


Figura E.25: Potencia sobre trayectoria en espiral 10800 RPM - 2700mm/min.

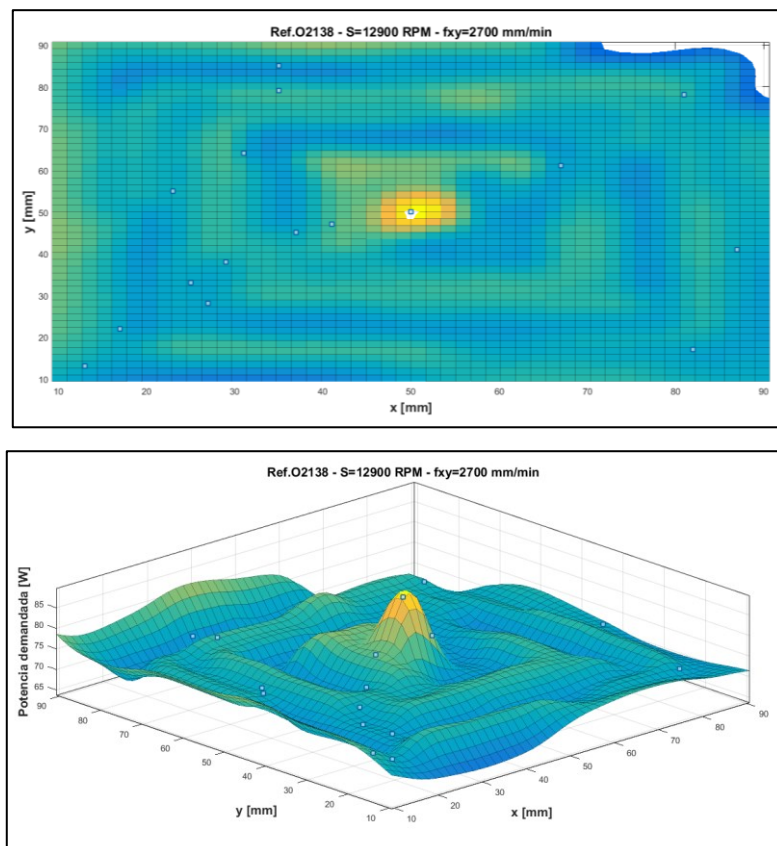


Figura E.26: Potencia sobre trayectoria de corte en espiral 12900 RPM - 2700mm/min.

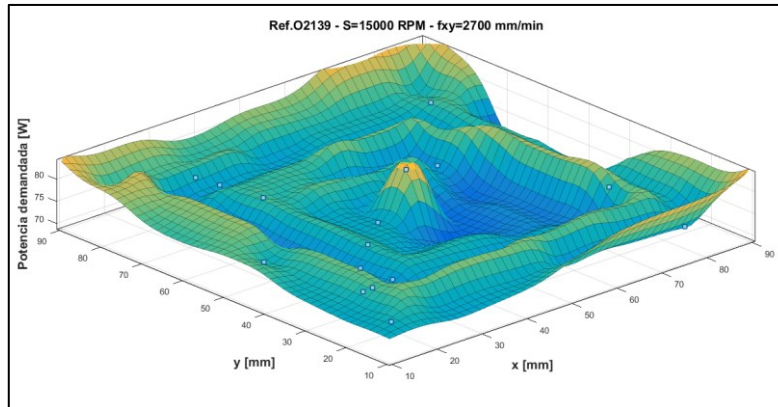
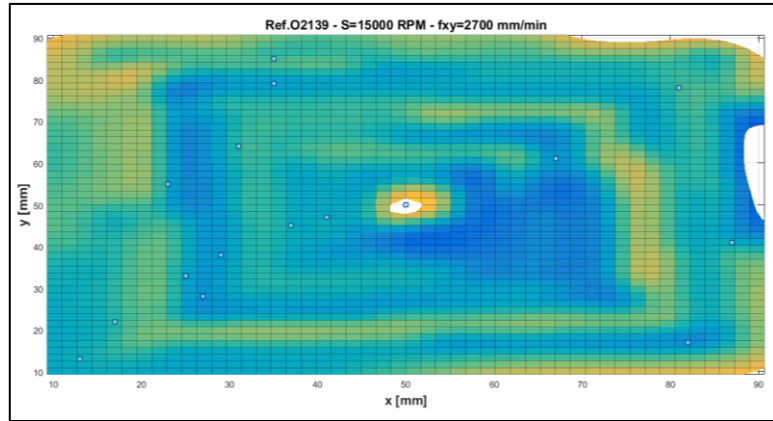


Figura E.27: Potencia sobre trayectoria en espiral 15000 RPM - 2700mm/min.

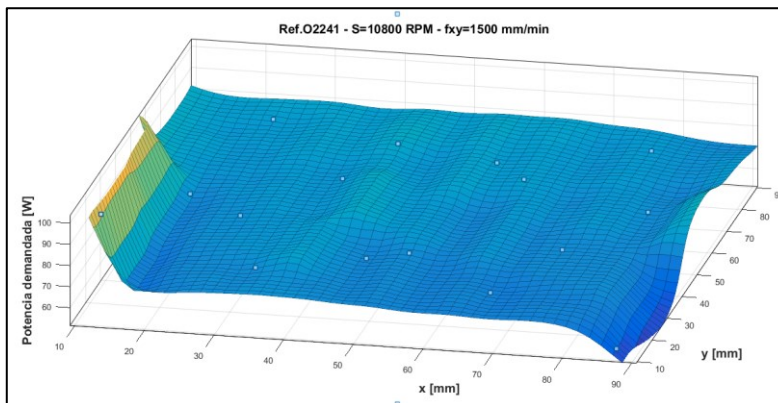
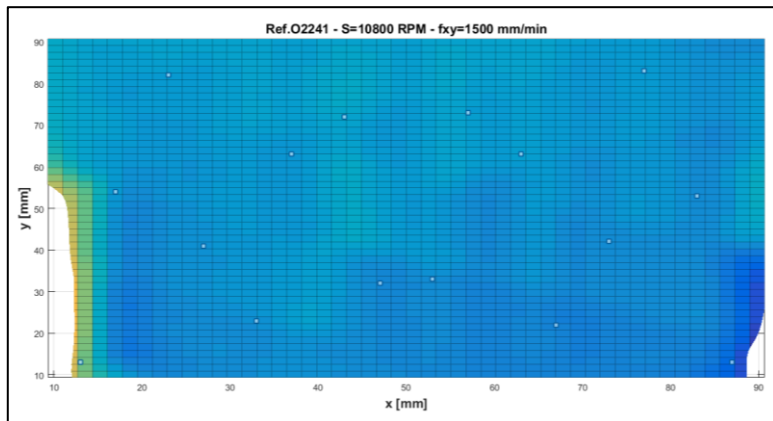


Figura E.28: Potencia sobre trayectoria zigzag 10800 RPM - 1500mm/min.

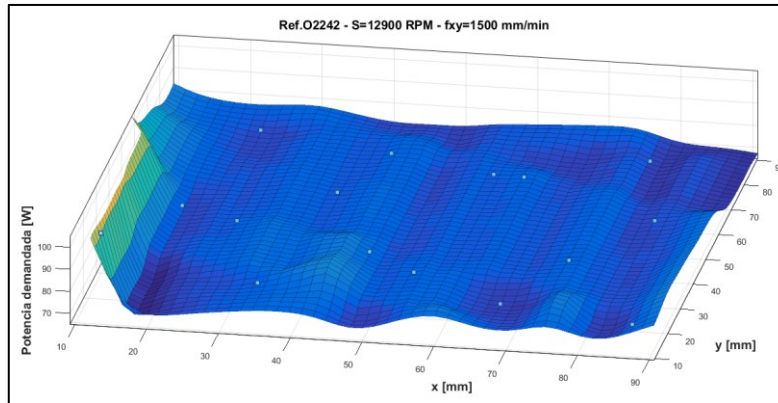
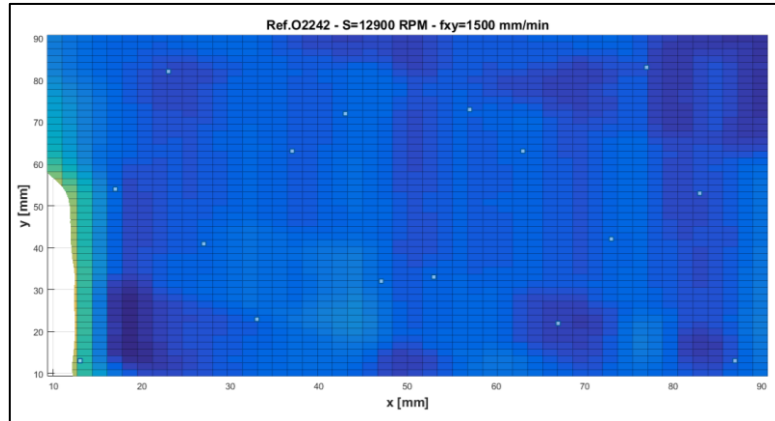


Figura E.29: Potencia sobre trayectoria zigzag 12900 RPM - 1500mm/min.

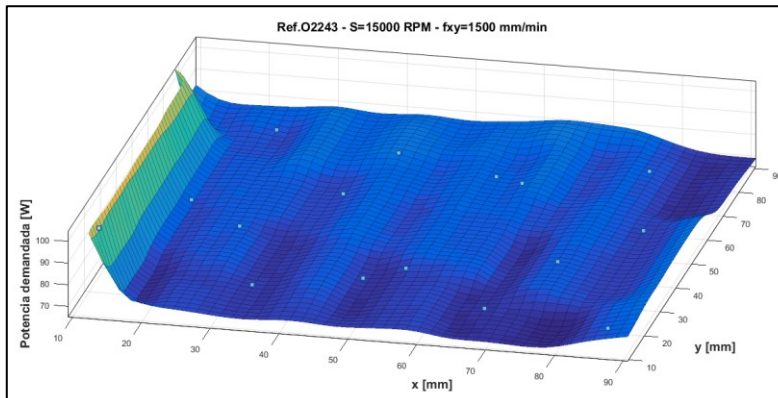
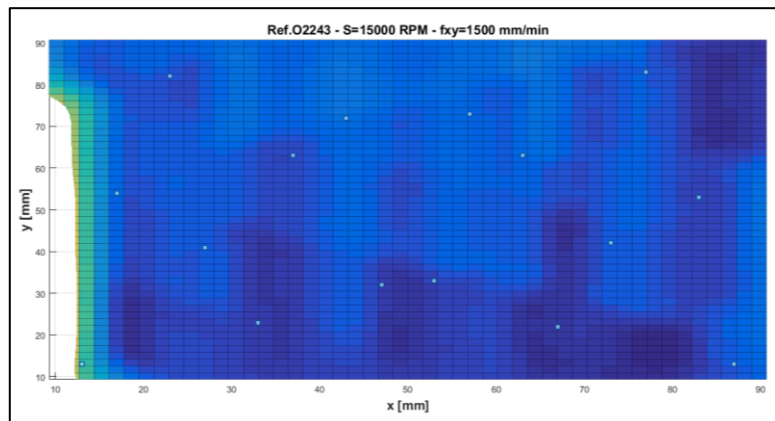


Figura E.30: Potencia sobre trayectoria zigzag 15000 RPM - 1500mm/min.

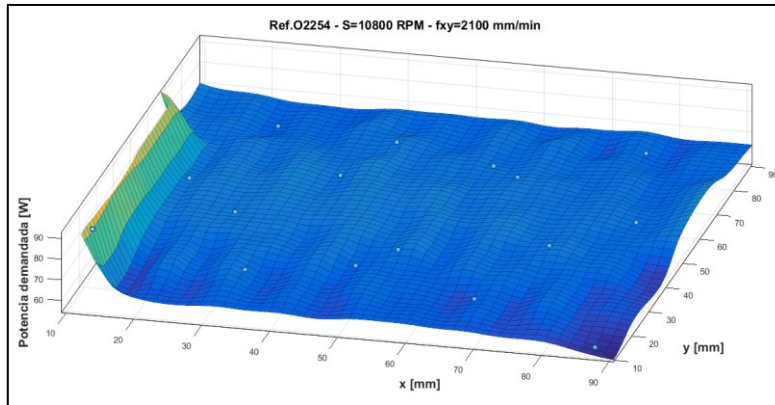
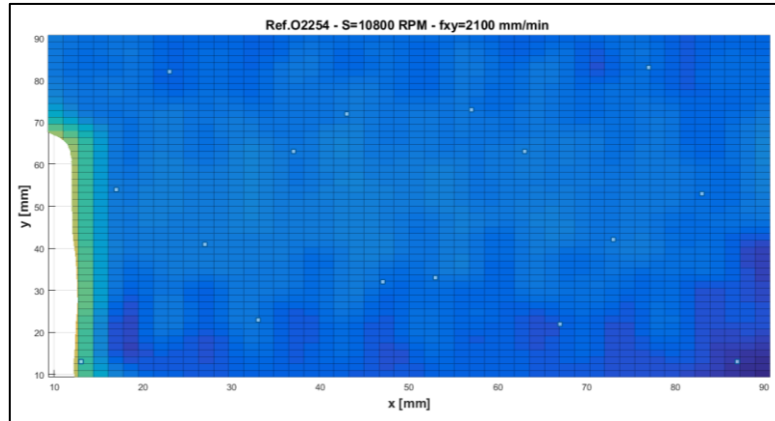


Figura E.31: Potencia sobre trayectoria zigzag 10800 RPM - 2100mm/min.

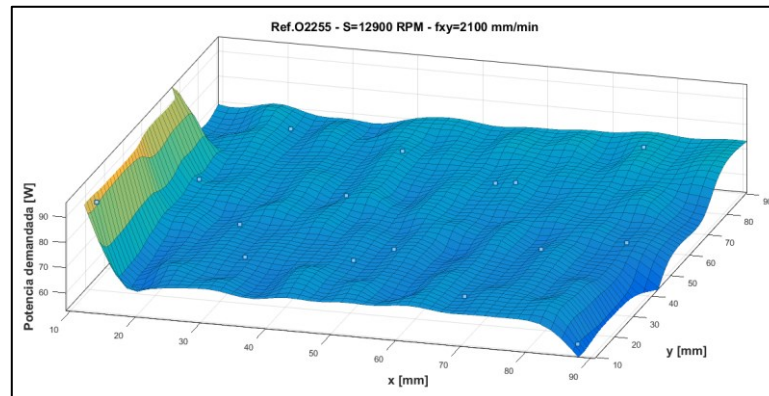
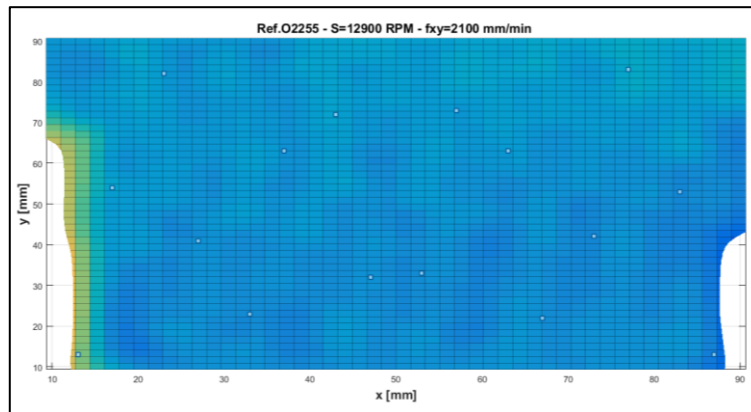


Figura E.32: Potencia sobre trayectoria zigzag 12900 RPM - 2100mm/min.

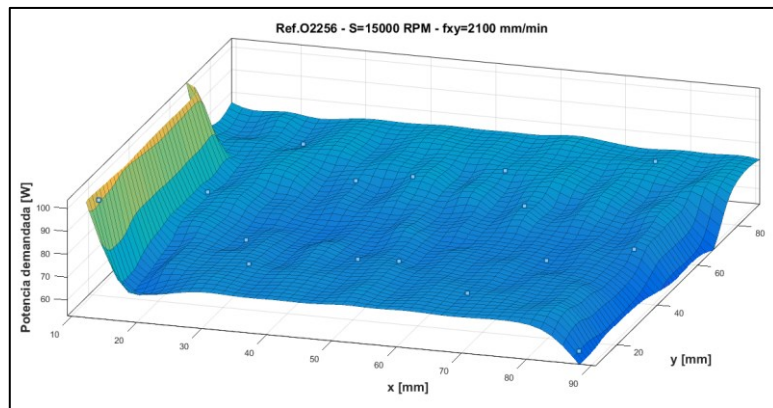
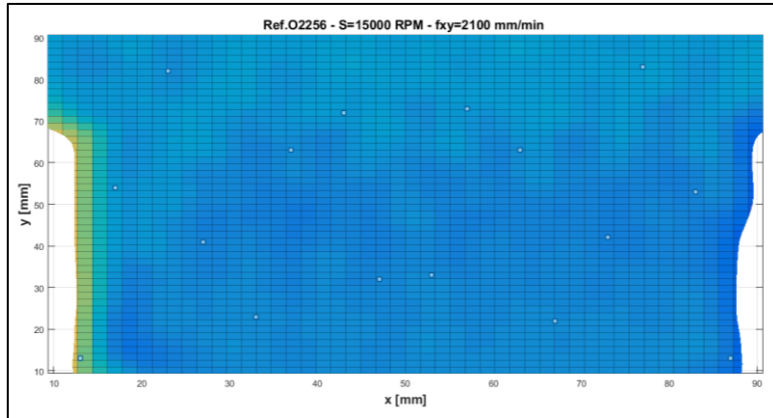


Figura E.33: Potencia sobre trayectoria zigzag 15000 RPM - 2100mm/min.

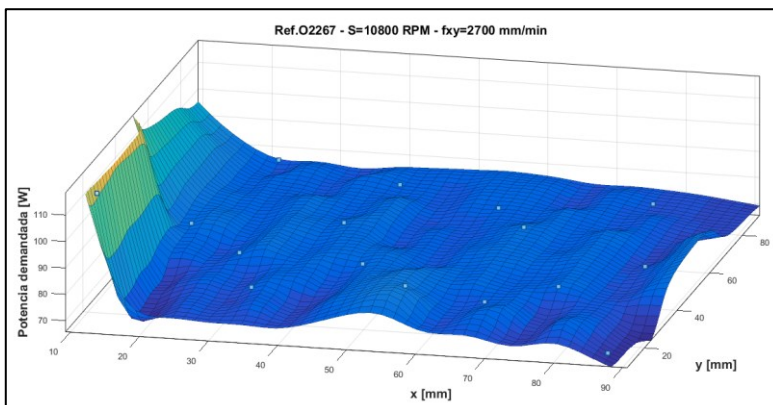
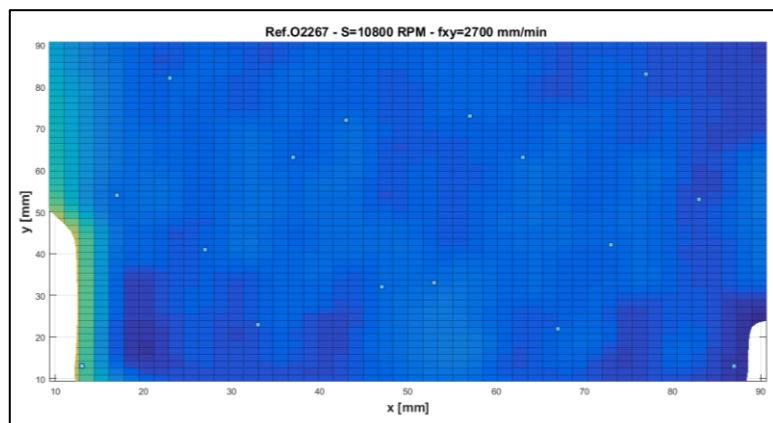


Figura E.34: Potencia sobre trayectoria zigzag 10800 RPM - 2700mm/min.

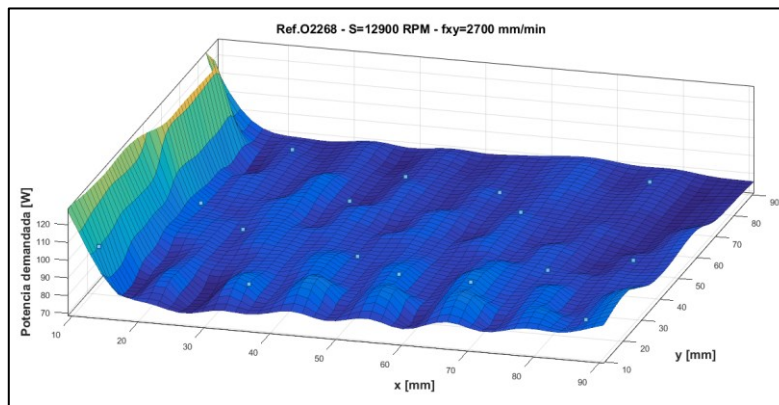
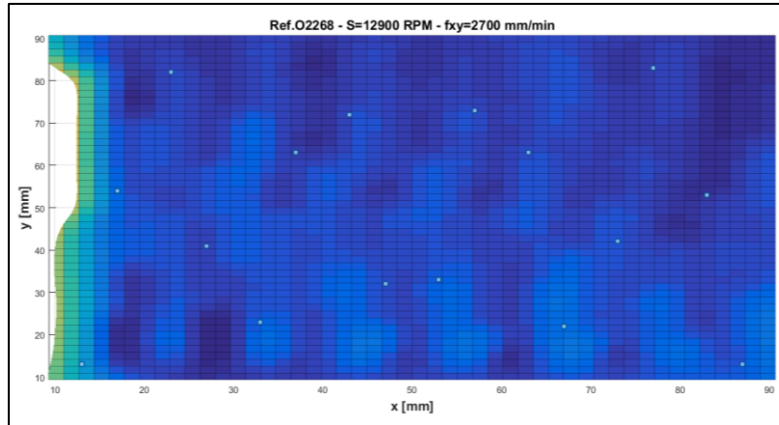


Figura E.35: Potencia sobre trayectoria zigzag 12900 RPM - 2700mm/min.

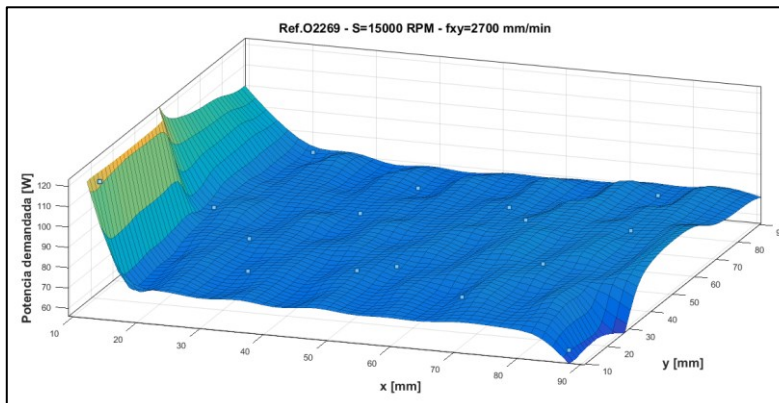
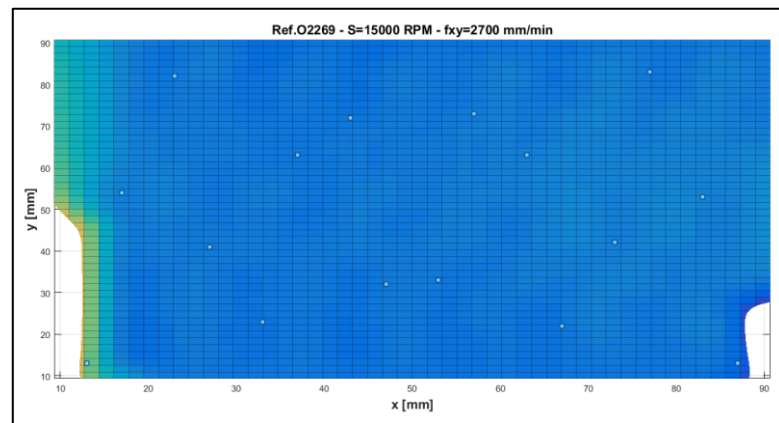


Figura E.36: Potencia sobre trayectoria zigzag 15000 RPM - 2700mm/min.

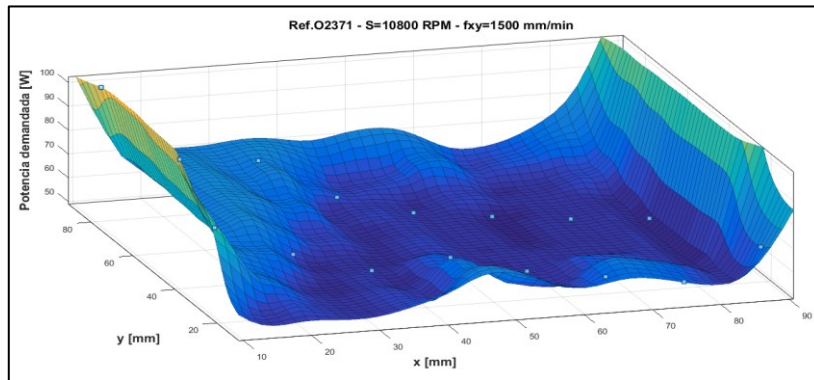
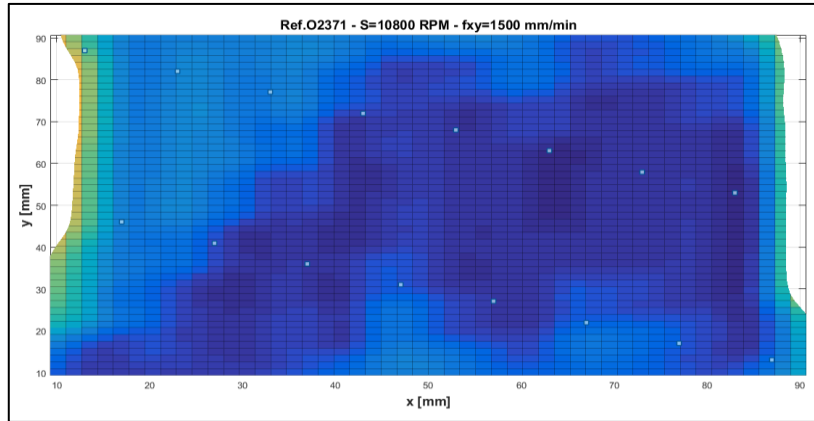


Figura E.37: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 10800 RPM - 1500mm/min.

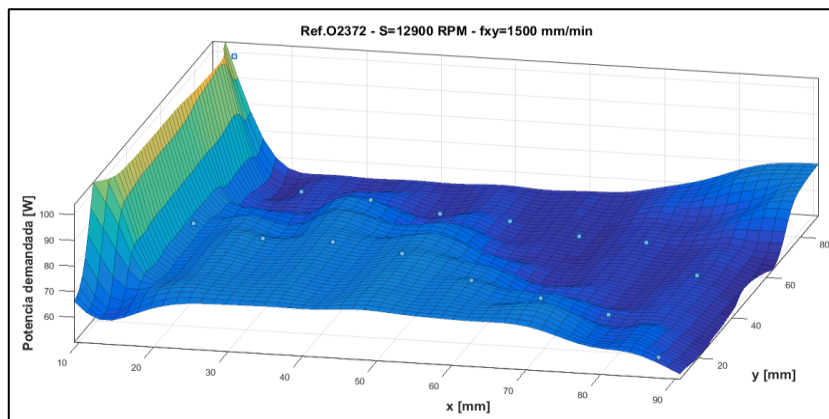
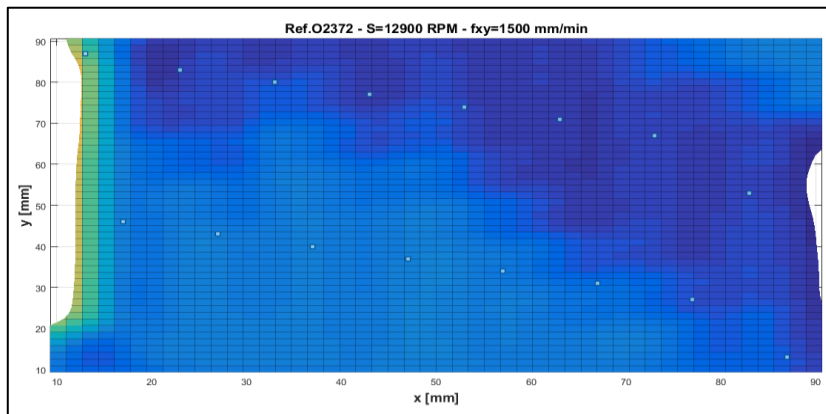


Figura E.38: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 12900 RPM - 1500mm/min.

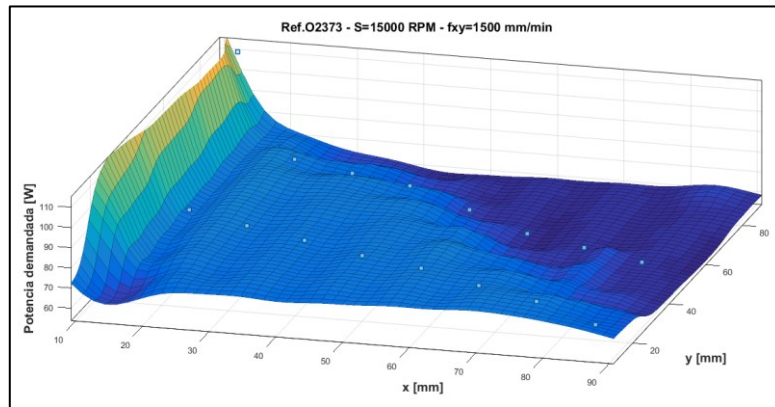
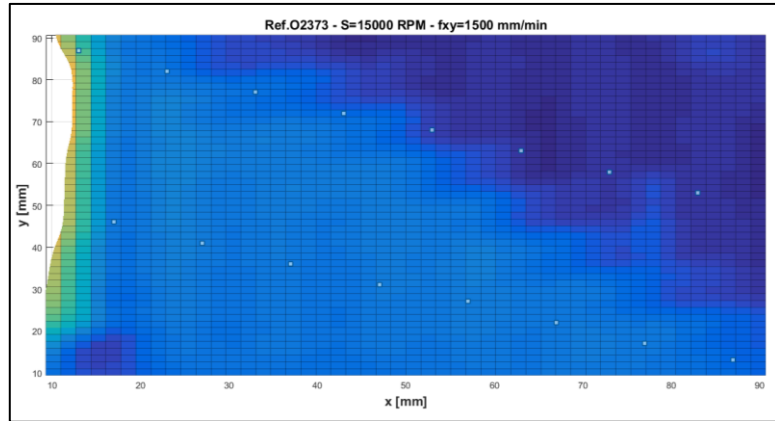


Figura E.39: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 15000 RPM - 1500mm/min.

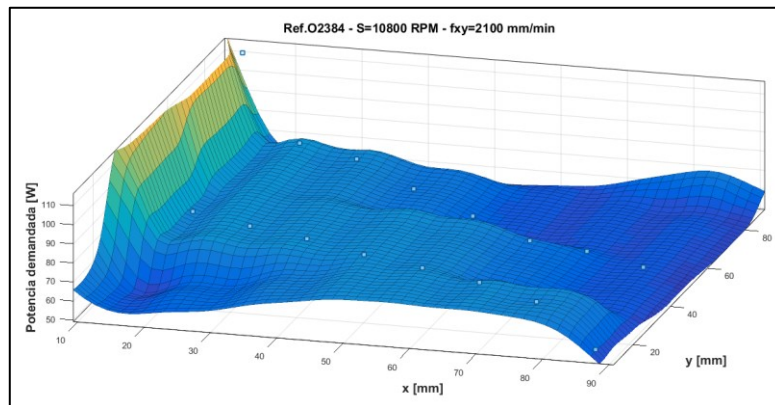
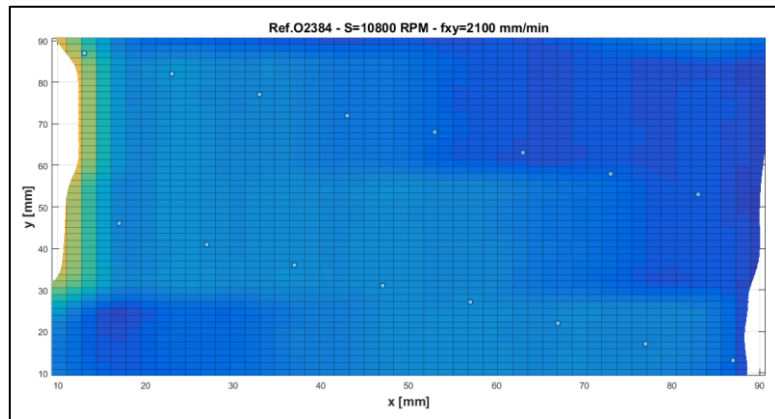


Figura E.40: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 10800 RPM - 2100mm/min.

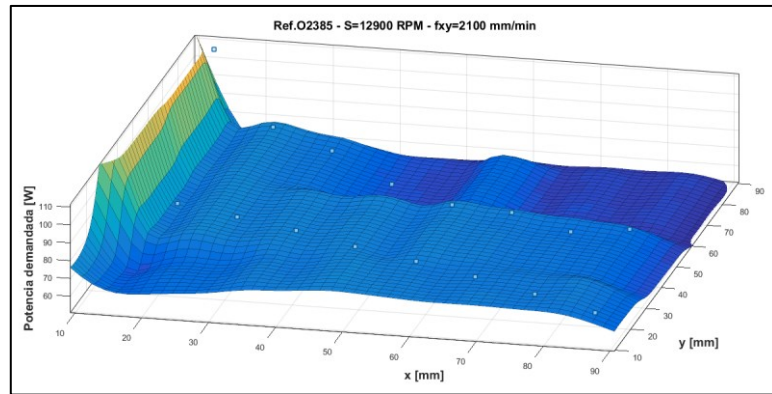
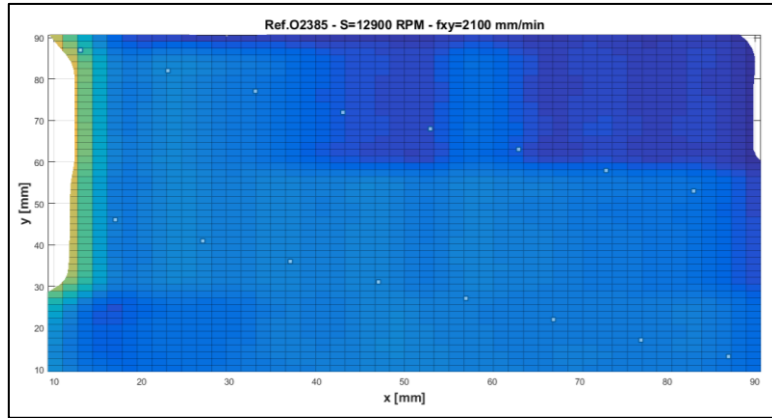


Figura E.41: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 12900 RPM - 2100mm/min.

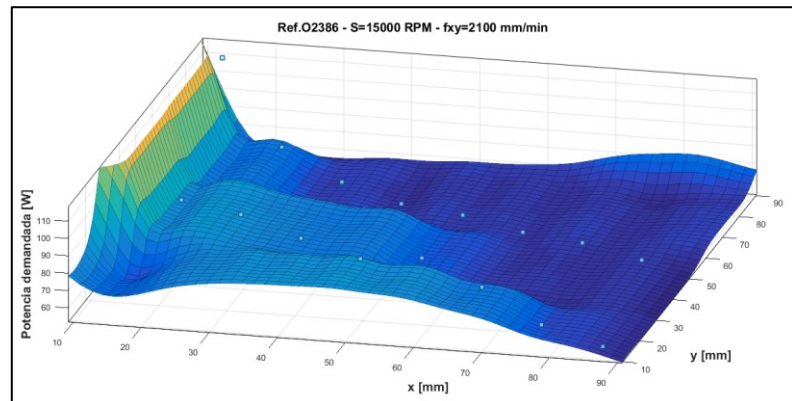
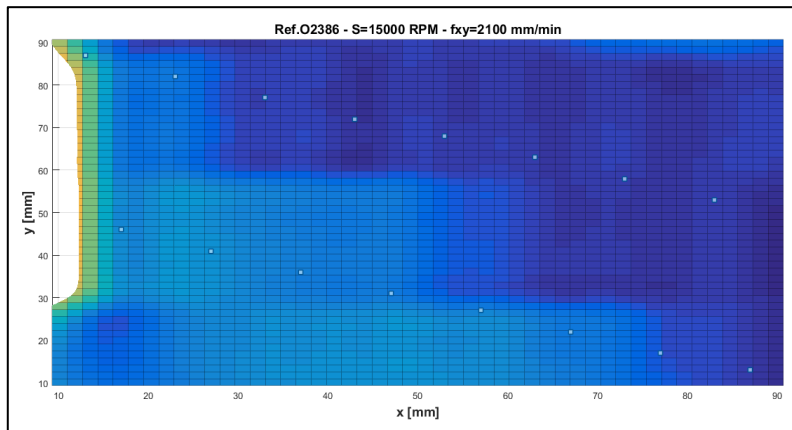


Figura E.42: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 15000 RPM - 2100mm/min.

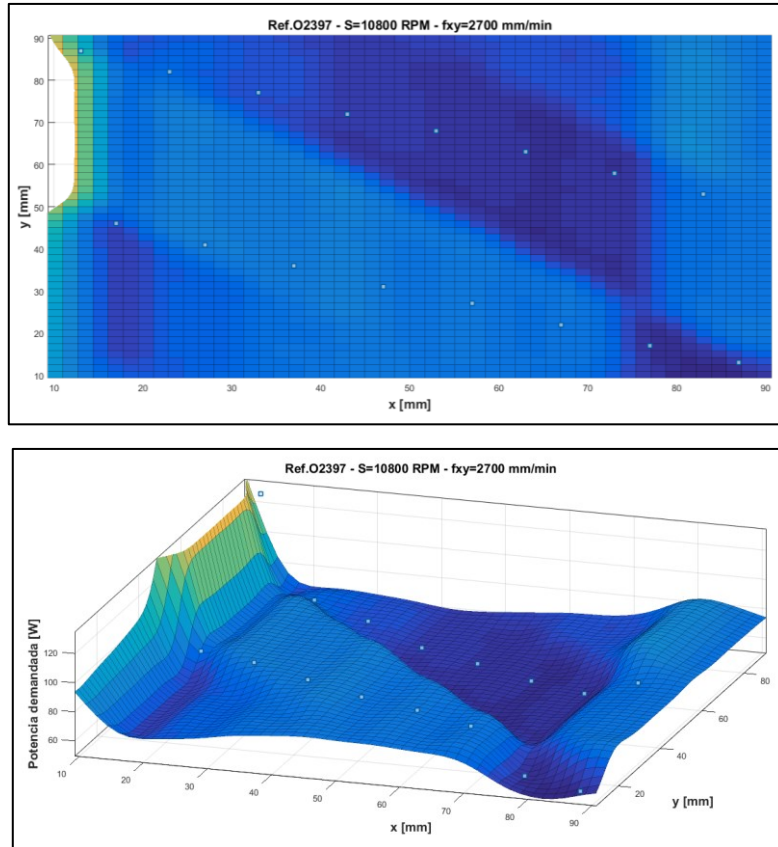


Figura E.43: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 10800 RPM -2700mm/min.

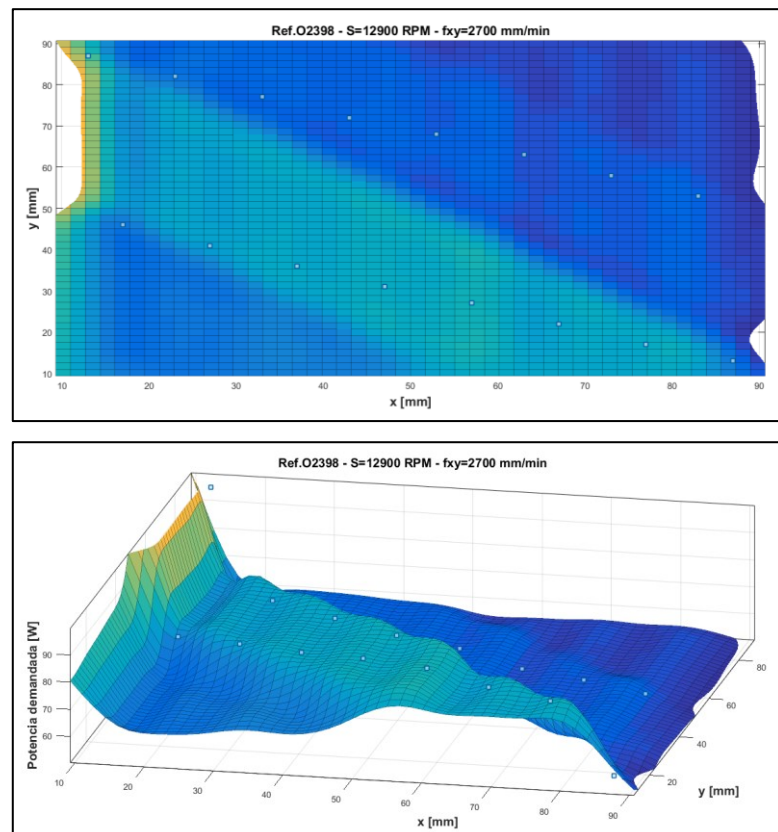


Figura E.44: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 12900 RPM -2700mm/min.

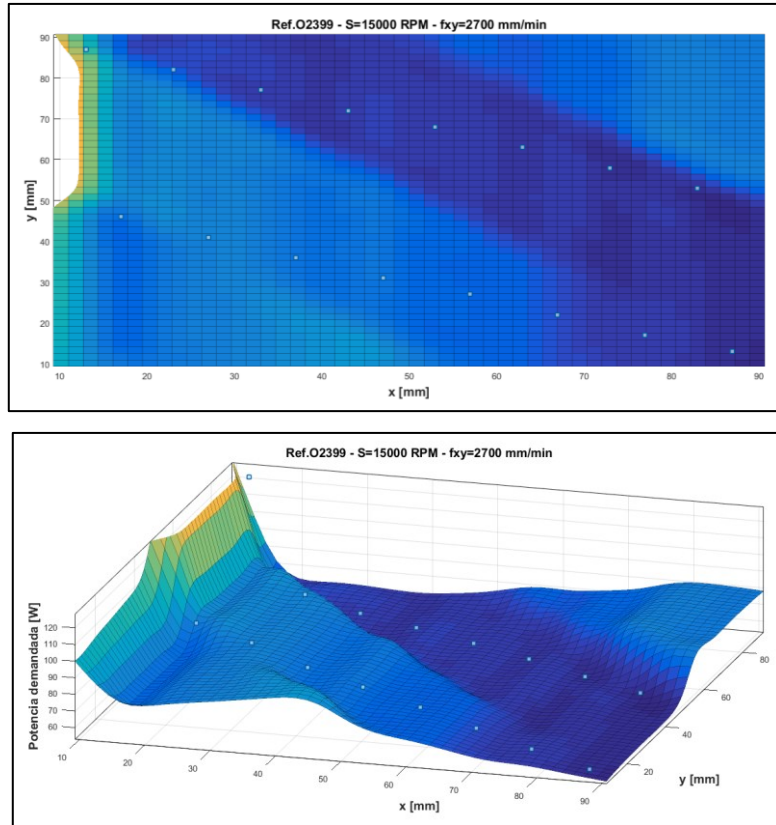
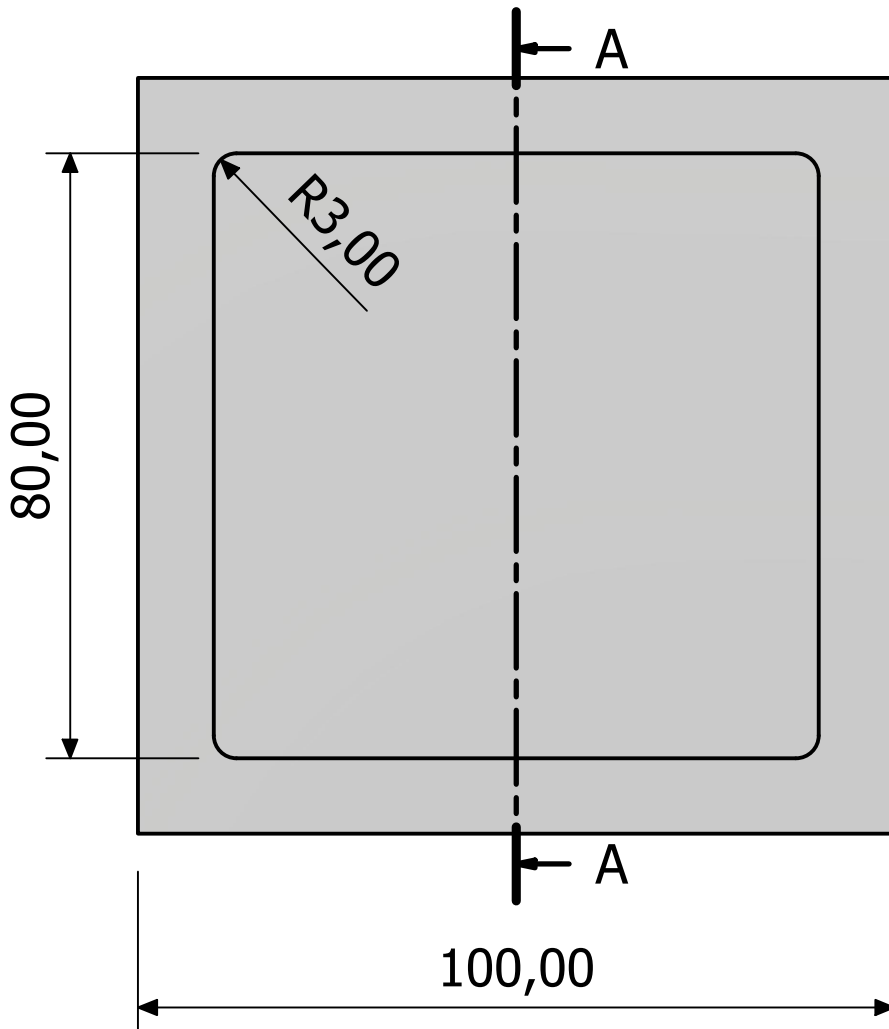
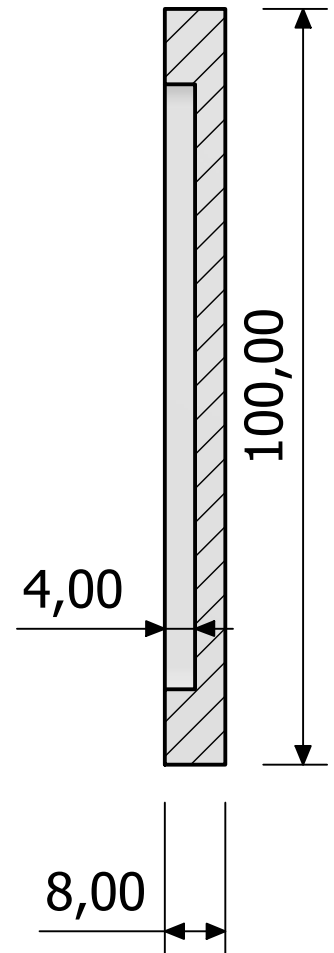



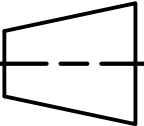
Figura E.45: Potencia sobre trayectoria corte un sentido 15000 RPM -2700mm/min.

APÉNDICE F
PLANOS



A-A (1 : 1)



Diseñado por: Roosevelt Santos		Aprobado por: Fausto Maldonado MSc		Fecha: 24/08/2021		Unidad: mm	
ESPOL			Escala 1:1	Título: Diseño de probeta			
				Modelo: Probeta cuadrada		Masa: 51 gr	