



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

**“Estudio general del Micromecanizado y análisis de estrategias
de corte para Microfresado”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN INGENIERIA Y ADMINISTRACIÓN DE LA
MANUFACTURA**

Presentada por:

Shirley Lilibeth Espinoza Armijos

Luis Fernando Tapia Palomino

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2025

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

PhD. Emérita A. Delgado P.

Profesor de Materia

MSc. Fausto A. Maldonado G.

Tutor de proyecto

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros Shirley Lilibeth Espinoza Armijos y Luis Fernando Tapia Palomino acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 15 de mayo del 2025.

Shirley Lilibeth Espinoza
Armijos

Luis Fernando Tapia
Palomino

RESUMEN

El microfresado es un proceso de mecanizado de alta precisión, la cual utiliza herramientas de corte de dimensiones pequeñas, menores a 1 mm, para fabricar piezas que requieren un alto nivel de detalle y son complejas; principalmente estas piezas son requeridas en diferentes sectores tales como en el campo médico, aeroespacial y en aumento en el sector electrónico. Este proceso es crucial para la manufactura de componentes en miniatura, donde el control de parámetros como acabado superficial, tiempo de corte y desgaste de la herramienta resulta un factor decisivo para garantizar calidad y eficiencia en el producto.

El presente proyecto, propone realizar un estudio experimental el cual ayude a determinar la mejor estrategia de corte de acuerdo con su trayectoria en el proceso de microfresado en polímeros, de manera específica en duralon HDPE, enfocándose en tres parámetros: acabado superficial, tiempo de corte y desgaste de la herramienta, donde se busca proporcionar información pertinente para la selección de la mejor estrategia en el proceso de manufactura en microfresado.

El objetivo del proyecto es analizar 3 estrategias de corte para microfresado, trayectoria en rampa helicoidal, lineal y trayectoria trocoidal; donde se evalúan los parámetros críticos antes mencionados. El desarrollo del proyecto inició con una revisión bibliográfica que abarcó conceptos fundamentales del micro mecanizado, destacando las características y factores clave que influyen en los procesos de corte a pequeña escala. Posteriormente, se diseñó una metodología experimental que permitió evaluar las estrategias de corte seleccionadas a partir de mediciones y análisis de parámetros críticos definidos previamente.

Finalmente se llevó a cabo pruebas experimentales para observar el desempeño de las diferentes estrategias de microfresado bajo condiciones controladas, los resultados obtenidos fueron analizados y comparados para determinar cuál de las metodologías de corte ofrece el mejor desempeño en términos de acabado superficial, tiempo de corte y desgaste de la herramienta.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	7
1.1. INTRODUCCIÓN	7
1.2. PROBLEMÁTICA	8
1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	9
1.4. OBJETIVOS	10
1.4.1. Objetivo General	10
1.4.2. Objetivo Específicos	10
1.5. Alcance	10
CAPÍTULO 2	12
2.1. METODOLOGÍA.....	12
2.2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.2.1. Micromecanizado.....	14
2.2.2. Tamaño mínimo de viruta (MTC)	18
2.2.3. Ventajas y limitaciones de micro mecanizado	19
2.2.4. Proceso de micromecanizado	19
2.2.5. Microfresado	21
2.2.5.1. Condiciones de corte.....	21
2.2.5.2. Dirección de rotación de herramienta de corte en fresado.....	22
2.2.5.3. Operaciones en microfresado	24
2.2.5.4. Máquinas y herramientas para microfresado.....	26
2.2.5.5. Estrategias de corte.....	27
2.2.5.6. Parámetros de análisis	31
2.2.5.7. Selección de estrategia de corte	33
2.2.5.8. Características de la máquina y equipos de medición	34
2.2.5.9. Selección de material y herramienta de corte	35
2.2.6. Definición/Cálculo de parámetros	36
• Velocidad del husillo	36

• Velocidad de corte	36
• Avance por diente	38
• Profundidad de pasada axial (<i>ap</i>) y radial (<i>ae</i>)	39
• Rugosidad	39
CAPÍTULO 3	41
3.1. RESULTADOS	41
3.1.1. Cálculo de parámetros de corte	41
3.1.2. Programación CAM	43
3.1.3. Datos recolectados.....	45
3.1.3.1. Medición de Rugosidad.....	46
3.1.3.2. Medición del tiempo de corte.....	53
3.1.3.3. Desgaste de herramienta	55
3.1.3.4. Selección de mejor estrategia de corte.....	61
3.1.4. Análisis de factibilidad técnica	63
3.1.5. Análisis de factibilidad financiera.....	63
CAPÍTULO 4	64
4.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
4.1.1. Conclusiones.....	64
4.1.2. Recomendaciones	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS	70

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

El micromecanizado es un conjunto de técnicas de manufactura que permite la fabricación de componentes a escala microscópica de alta precisión, este tipo de manufactura surgió debido a la necesidad de fabricar piezas y componentes cada vez más pequeños y precisos. Esta necesidad fue impulsada por avances en sectores como electrónica, bioingeniería, industria aeroespacial, automotriz y óptica. El micromecanizado comenzó a desarrollarse en la década de 1960 para la fabricación de circuitos integrados, es desde allí que ha ido evolucionando en la producción de microestructuras tridimensionales a partir de películas delgadas depositadas (Bustillo, Howe, & Muller, 1998). A lo largo de los años, han surgido nuevas técnicas a nivel micro, tales como el micromecanizado electroquímico (EMM), el cual ofrece ventajas en términos de velocidad, precisión y control con un impacto ambiental reducido (Bhattacharyya, Malapati, & Munda, 2005).

Debido a los surgimientos de nuevas tecnologías, el micromecanizado (Kumar, Jerald, Kumanan, & Prabakaran, 2014) se lo puede dividir en dos grandes grupos, en micromecanizado tradicional y avanzado; donde el tradicional comprende las operaciones de microtorneado, microtaladrado y microfresado. En cuanto al micromecanizado avanzado se clasifica de acuerdo con el origen del recurso utilizado para realizar el proceso de remoción de material los cuales son: térmico, mecánico y químico-electromecánico. La elección del tipo de micromecanizado depende de los materiales, herramientas, características del material a nivel microscópico, rendimiento, etc.

El presente proyecto se enfoca en el micromecanizado tradicional, de manera específica en el microfresado. El micromecanizado tradicional, permite fabricar implementos o piezas con detalles complejos, altas tolerancias y acabados superficiales mejorados, que lo convierte de alto valor en la industria. Estas técnicas se utilizan en la producción de microcomponentes para dispositivos electrónicos, fabricación de implantes médicos, desarrollo de piezas para la industria automotriz y aeroespacial, ya que son elementos que requieren alta precisión y ajustada tolerancia dimensional.

Debido a la capacidad de generar estructuras complejas y de alta tolerancia, el micromecanizado es ampliamente empleado también en la óptica de precisión y la industria relojera. Este proceso de manufactura se ha consolidado como una de las técnicas más relevantes debido a su versatilidad y capacidad en el proceso de mecanización de piezas pequeñas. El microfresado ha sido de gran utilidad en las diferentes industrias, desde aplicaciones aeroespaciales, como la fabricación de componentes miniaturizados para sistemas de navegación, hasta en el sector de la medicina, para la creación de prótesis y dispositivos médicos avanzados. El microfresado ha ido ganando mayor cobertura debido a su flexibilidad para la producción de geometrías complejas (Serje, Pacheco, & Diez, 2020). Sin embargo, existen desafíos como el efecto del tamaño y formación de viruta, la cual puede afectar la calidad superficial y la precisión al finalizar el proceso de corte.

Una de las principales particularidades de este proceso es el efecto del tamaño de filo de corte, puesto que, al ser más pequeño, la interacción entre la herramienta y el material se vuelve más compleja y no se rige a los mismos efectos que en los procesos de mecanizado a nivel macro. Esto puede llevar a una serie de defectos como la generación de fuerzas de

corte más altas y un mayor consumo de energía para la remoción del material (Zhang, Yu, Dai, Qu, & Zhao, 2020). A pesar de esto, el microfresado ha ido tomando peso en las diferentes industrias debido a las ventajas que ofrece, por lo que, se vuelve imperioso determinar parámetros adecuados para cada proceso, ya que como indica (Davim, 2014), no se cuenta con manuales o guías de parámetros para procesos a nivel micro.

A nivel global, el microfresado ha experimentado un crecimiento significativo, esto debido a la exigente demanda de componentes más pequeños y funcionales, donde se han realizado investigaciones con respecto a los diferentes parámetros que afectan de manera significativa al proceso. El desarrollo de herramientas de corte con geometrías optimizadas y recubrimientos de alta resistencia al desgaste ha permitido avances en el uso de esta tecnología (Serje, Pacheco, & Diez, 2020). En la actualidad, existe una creciente demanda por la producción de piezas pequeñas y con alta precisión, por lo que, este tipo de manufactura ha ganado más relevancia en diferentes sectores industriales, dado que es posible el mecanizado de gran variedad de materiales con geometrías complejas, excelente acabado superficial y tolerancias ajustadas (Davim, Mechanical Engineering. Research, development and Education, 2014).

Con el desarrollo de nuevas estrategias de manufactura y la integración de herramientas avanzadas, se espera que el microfresado tenga un papel clave en la modernización de la industria actual, no obstante, para lograr una implementación efectiva de estas tecnologías es fundamental fortalecer las redes de colaboración no solo entre instituciones académicas, sino también con empresas del sector manufacturero. Esto permite acelerar la adopción de técnicas de micromecanizado y mejorar la competitividad en el mercado global donde la transferencia de conocimientos y creación de softwares especializados ayudan a reducir la brecha tecnológica y facilitan su incorporación en los procesos productivos.

La implementación eficiente en este tipo de manufactura requiere un conocimiento más profundo de las variables involucradas que influyen en el rendimiento de las herramientas de corte, calidad de la pieza y eficiencia del proceso. Por esta razón, el presente proyecto es relevante al enfocarse en la evaluación y análisis de los parámetros críticos que afectan la calidad del producto final, el acabado superficial y costos operativos. Factores como velocidad de corte, desgaste de la herramienta y calidad superficial, pueden influir de manera directa en los equipos e insumos involucrados en el proceso, por lo que, una adecuada selección de estas variables es crucial para minimizar defectos como el desgaste prematuro de la herramienta, generación excesiva de calor, variabilidad en el acabado superficial, entre otros.

Al realizar pruebas experimentales en laboratorio, la información recolectada permitirá predecir el comportamiento del proceso de acuerdo con la estrategia de corte utilizada. Los resultados obtenidos podrán ser de gran utilidad para la toma de decisiones en la industria y será un punto de referencia para los profesionales involucrados con los procesos productivos para futuras investigaciones en este campo.

1.2. PROBLEMÁTICA

El microfresado es una tecnología clave en la fabricación de componentes miniaturizados de alta precisión, con aplicaciones en diferentes campos de la industria. Sin embargo, a

pesar del creciente auge y relevancia, existe una notable falta de estudios que aborden los parámetros de operación más críticos como son el acabado superficial, desgaste de la herramienta y el tiempo de corte. Esta falta de información limita la eficiencia del proceso y la vida útil de las herramientas, ya que, si no se utilizan parámetros adecuados resulta en un desgaste prematuro de la herramienta e inclusive puede llevar a la fractura de esta.

En el contexto ecuatoriano hay carencia de investigaciones específicas en microfresado, donde la mayoría de las investigaciones se centran en los procesos convencionales, donde el microfresado sigue siendo un área poco explorada. El uso de diferentes materiales como acero inoxidable, aluminio, cerámicos, polímeros, entre otros; a nivel micro presentan un gran desafío, debido que, las propiedades mecánicas de cada material no tienen el mismo comportamiento a esta escala, en los procesos de corte se evidencia altas resistencias, efecto de la escala, fuerzas de corte, generación de calor y estrés en el material, lo cual causa un desgaste significativo en las herramientas.

Esta carencia de conocimiento es preocupante ya que el desarrollo de la manufactura de precisión está limitado por la falta de estudios técnicos. Grandes empresas cuentan con áreas que desarrollan pruebas para evaluar procesos cuyos resultados les permiten tomar decisiones en comparación con las pequeñas y medianas empresa (PYMES), que de acuerdo con los resultados del Registro Estadístico de Empresas (REEM), el 93.9% corresponden a las microempresas, las cuales las convierten en el mayor contribuyente de plazas de trabajo y de aporte económico para el país (INEC - Registro Estadístico de Empresas, 2023). En este contexto las PYMES enfrentan una notable limitación en la infraestructura para realizar investigaciones en procesos avanzados como el microfresado, lo cual no solo dificulta desarrollar los conocimientos técnicos pertinentes sino también restringe la capacidad de seleccionar de manera adecuada la estrategia de corte en la manufactura de productos a pequeña escala.

Esta carencia de conocimiento puede incrementar los defectos causados en una estrategia efectiva que conduce a problemas de calidad y de acabado superficial, afectando la precisión dimensional y la integridad del material. También, provoca una baja competitividad en un mercado que exige cada vez estándares más elevados. El presente proyecto permitirá ampliar los conocimientos sobre el microfresado evaluando estrategias de corte y parámetros clave, aportando de manera significativa en la competitividad y sostenibilidad en la industria ecuatoriana.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En Ecuador la investigación en procesos de manufactura se ha enfocado principalmente en técnicas convencionales a nivel macro, dejando al micromecanizado como un área poco explorada. La falta de estudios limita el desarrollo de la manufactura de alta precisión, lo que es crítico para las pequeñas y medianas empresas. A diferencia de las grandes empresas, que cuentan con infraestructura y recursos para evaluar y optimizar sus procesos, las PYMES enfrentan dificultades significativas para realizar investigaciones aplicadas en microfresado. No se cuenta con manuales técnicos ni guías estandarizadas sobre microfresado, lo que presenta una barrera adicional para una implementación efectiva de este proceso en la industria. Esta ausencia de documentación dificulta la capacitación de operarios, una selección adecuada de parámetros de corte y el mantenimiento eficiente

de las herramientas de microfresado. La carencia de estudios sobre estrategias de corte no solo representa un obstáculo técnico, sino que repercute en temas de sostenibilidad y competitividad del sector manufacturero ecuatoriano.

El uso ineficiente de las herramientas puede provocar desgastes acelerados, defectos en la superficie y tiempos elevados, comprometiendo la calidad y competitividad de la industria, por lo que, es necesario un estudio experimental que permita evaluar estrategias de microfresado, uno de los principales desafíos en este campo es determinar el tipo de estrategia que presente mejores resultados en términos de acabado superficial, desgaste de herramienta y tiempo de corte.

Este proyecto busca abordar la problemática mediante la evaluación experimental de tres estrategias de corte para microfresado con la operación de planeado, analizando el impacto que tiene en los tres parámetros: acabado superficial, desgaste de la herramienta y tiempo de corte.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Analizar estrategias de corte para microfresado evaluando los parámetros: acabado superficial, desgaste de la herramienta y tiempo de corte.

1.4.2. Objetivo Específicos

- Realizar revisión bibliográfica del micromecanizado, características y factores clave del proceso de corte a pequeña escala.
- Desarrollar una metodología experimental analizando estrategias de trayectoria de corte para microfresado.
- Evaluar acabado superficial, desgaste de la herramienta y tiempo de corte en tres estrategias de corte en microfresado.
- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas experimentales para seleccionar la estrategia de corte más adecuada.

1.5. Alcance

El presente proyecto se enfoca en el análisis de estrategias para microfresado, considerando los parámetros clave: acabado superficial, desgaste de la herramienta y tiempo de corte. Para ello, se desarrolla una metodología experimental que permite evaluar y comparar tres estrategias de corte en condiciones controladas. Las estrategias para el análisis son: corte en rampa lineal, en rampa helicoidal y corte trocoidal.

El proyecto incluye una extensa revisión bibliográfica sobre el micromecanizado, sus características y factores que influyen en el desempeño del proceso. También detalla de

manera específica características del microfresado, principales aplicaciones, condiciones de corte, equipos y herramientas empleados.

La operación para las tres estrategias de corte es el planeado, debido a la alta relevancia y pertinencia en los diferentes campos de la manufactura. Las pruebas experimentales contemplan la medición y análisis de tres variables:

- Acabado superficial, determinado a través de parámetros de rugosidad
- Desgaste de la herramienta, evaluado mediante técnicas de inspección
- Tiempo de corte, registrado en cada estrategia

Estos parámetros serán abordados en el siguiente capítulo y los resultados obtenidos durante la experimentación serán contrastados para identificar la estrategia de corte que ofrezca el mejor balance entre las variables definidas.

CAPÍTULO 2

2.1. METODOLOGÍA

El proyecto está enfocado en el análisis experimental de tres estrategias para microfresado sin el uso de fluido de corte. El objetivo de la metodología experimental es evaluar el desempeño de cada estrategia en términos de:

- Acabado superficial
- Desgaste de la herramienta
- Tiempo de corte

A continuación, se presenta la metodología para el desarrollo del proyecto (Figura 2.1).

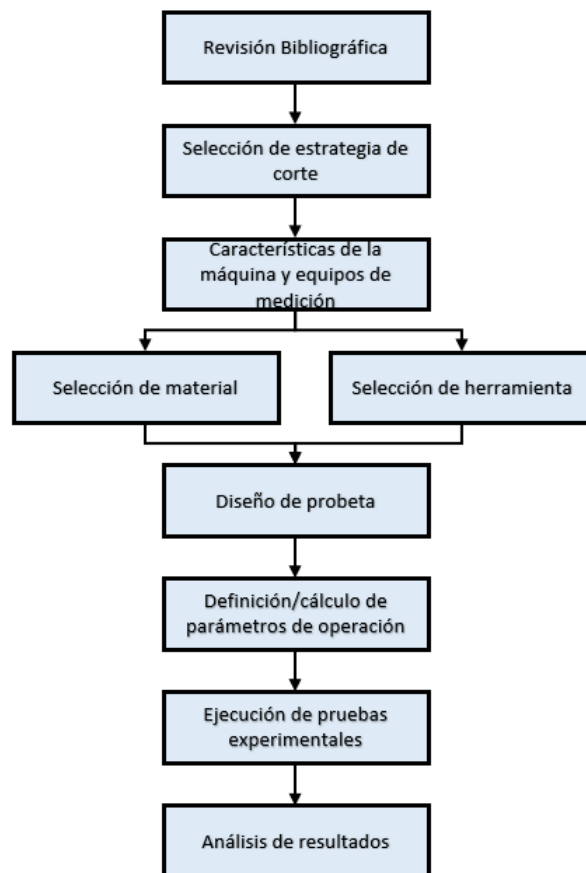


Figura 2.1 Flujograma de la metodología experimental

Fuente: Elaboración propia

1. **Revisión Bibliográfica:** En esta etapa se lleva a cabo un análisis profundo de la literatura científica y técnica relacionada con el proceso de microfresado existente, con el fin de recopilar las principales estrategias de corte empleadas y su impacto en parámetros como el acabado superficial, desgaste de la herramienta y formación de viruta.

Se examinan estudios previos con respecto a la influencia de diferentes trayectorias de herramienta, con el fin de identificar las mejores prácticas y sus aplicaciones en materiales. Los resultados de esta revisión permiten establecer un marco teórico sólido para el proyecto de titulación, facilitando la comparación de estrategias de corte y la selección de parámetros.

2. **Selección de la estrategia de corte:** La estrategia es crucial para determinar la trayectoria más adecuada en el proceso de microfresado, para esta etapa se profundizó en la revisión bibliográfica con el fin de identificar la trayectoria que genere mejores resultados en términos de acabado superficial, desgaste de la herramienta y tiempo de corte.

3. **Características de la máquina y equipos de medición:** En esta fase, se analiza las características de la máquina utilizada en el proceso de microfresado, con el objetivo de garantizar la precisión y confiabilidad de los experimentos. Se revisan parámetros como velocidad de rotación del husillo, compatibilidad con la herramienta seleccionada y tamaño de la mesa de trabajo. Además, se analiza la compatibilidad del material mecanizado y su influencia en el desgaste.

En esta etapa se asegura que los parámetros seleccionados sean adecuados para las condiciones experimentales, minimizando errores y obteniendo datos confiables en función de las variables a analizar. Con respecto a los equipos de medición, deben utilizarse bajo condiciones controladas para que los resultados sean claros y precisos.

4. **Selección de material y herramienta de corte:** En esta fase se determina el material para la experimentación, además de características clave para la selección de la herramienta de corte, como el mango de sujeción para la adecuada.

5. **Diseño de la probeta:** En esta etapa se define la geometría y dimensiones de las probetas que serán utilizadas en los experimentos de microfresado. El diseño es un aspecto crítico ya que influye en la facilidad de ejecutar las trayectorias, tomar mediciones y calidad de los resultados.

En cuanto a la geometría y dimensiones, deben ser adecuadas para evitar vibraciones y facilitar la sujeción en la máquina, deben tener un tamaño adecuado para realizar las pasadas sin interferencia entre ellas. La sujeción debe minimizar deformaciones y garantizar estabilidad durante el proceso experimental.

6. **Definición/Cálculo de parámetros de operación:** En esta fase, se establecen las ecuaciones y criterios para determinar los parámetros de corte del proceso de microfresado. A partir de la revisión bibliográfica, se seleccionan y definen las ecuaciones necesarias para el cálculo de parámetros como RPM, velocidad de

avance y profundidad de corte. Por otra parte, se recomienda el uso de tablas de referencia, las cuales proporcionan valores como velocidad de corte y avance por diente.

7. **Ejecución de pruebas experimentales:** Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio CAMPRO de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción de la ESPOL, en una fresadora CNC Roland MDX-40. En cada estrategia de corte ensayada se emplearon las mismas condiciones de corte y métodos de sujeción para el material y herramienta.
8. **Análisis de resultados:** Los resultados obtenidos de cada estrategia son comparados entre sí y se identifica cuál de ellas presenta la mejor combinación de las variables medidas (tiempo de corte, desgaste de la herramienta y acabado superficial).

La estrategia de corte lineal en rampa fue seleccionada por sus características de precisión en el proceso de mecanizado, con un avance controlado de la herramienta. En el caso de la trayectoria helicoidal en rampa, permite una entrada progresiva en el material, lo que contribuye en reducir las fuerzas generadas durante el corte. La estrategia de corte trocoidal ofrece diferentes ventajas, entre ellas, la eliminación eficiente de la viruta, evitando acumulación en la zona de trabajo.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Micromecanizado

El micro mecanizado es un proceso de fabricación de alta precisión que permite la producción de piezas con dimensiones pequeñas, cuyo rango se encuentran en micrómetros, permitiendo cambiar su forma, tamaño y superficie a través de la eliminación controlada de material. En la actualidad este tipo de proceso ha evolucionado gracias a los avances tecnológicos, permitiendo trabajar con diversos materiales y fabricando piezas con geometrías complejas, el principio de funcionamiento está basado en el mecanizado a nivel macro, pero requiere herramientas de menor tamaño y una mayor precisión en el control de los parámetros de corte. La micromecanización es una técnica sofisticada que opera en escalas muy pequeñas, llegando a dimensiones de varios micrómetros (Prabhakar, 2023).

El micromecanizado ha cobrado un papel protagónico en las últimas décadas, debido a un creciente interés por la industria e investigación. Esta creciente demanda responde a la incorporación de materiales atractivos como las superaleaciones, cerámicos y materiales compuestos, donde su manipulación requiere un mayor desarrollo y optimización de nuevas técnicas de fabricación. Esta manufactura se emplea en la fabricación de orificios de ventilación en las paletas de las turbinas, donde se mejora la eficiencia térmica y el rendimiento de los motores como se muestra en la figura 2.2 (a). También se utiliza en el sector biomédico, donde se produce micro agujas utilizadas en la administración de fármacos o en procedimientos de diagnósticos de mínima invasión figura 2.2 (b). En el

sector automotriz es fundamental en la perforación de componentes esenciales para la inyección de combustible, donde optimizan la combustión y reduce las emisiones de contaminantes (López Estrada, 2019). Entre las principales aplicaciones se encuentran dispositivos de micro fluidos, bombas y válvulas en miniatura, micro boquillas, componentes ópticos, micro moldes, micro perforaciones en diferentes materiales (Davim, Mechanical Engineering. Research, development and Education, 2014).



(a)



(b)

Figura 2.2 Aplicación de micromecanizado (a) fabricación de orificios de ventilación en las paletas de turbinas. (b) fabricación de micro agujas.

Fuente: (a) IA Copilot (b) (Bodega Aurrera, 2025)

El micromecanizado se distingue por varias características fundamentales:

- Componentes con tolerancias en el rango de micrómetros, donde incluso han llegado a nanómetros.
- Herramientas de corte de diámetros inferiores a 1mm.
- Altas velocidades de husillo para mantener una relación de corte efectiva.
- Baja profundidad de corte para minimizar la generación de fuerzas y evitar la deformación de la pieza.

Los procesos de mecanizado tanto a nivel macro y micro comparten principios similares, en la tabla 1 se presenta las diferencias entre fresado a nivel macro y micro.

Tabla 1
Cuadro comparativo de micro y macro fresado

		Micro fresado	Macro Fresado
Geometría de herramienta requerida	Diámetro de herramienta	<1000 μm	1-500 mm
	Tolerancia de diámetro de herramienta	0.1 – 5 μm	20-3000 μm
	Radio de filo de corte	0.1-10 μm	1-100 μm
	Simetría estructural	No simétrica para micro fresas con pequeños diámetros	Simétricas
Detalles de proceso y principios de remoción de material	Espesor de viruta no deformado (UCT)	0.1-50 μm	0.1-10 mm
	Descentramiento de la herramienta	< 2 μm	< 30 μm
	Energía de corte específica	>100 GPa	< 10 GPa
	¿Tiene recuperación elástica notable después del mecanizado?	SI	NO
	¿Tiene un notable efecto de tamaño?	SI	NO
Máquina	Tamaño	Compacto pero denso	Más voluminoso
	Velocidad del eje (RPM)	A menudo 60.000 o más	Hasta 20.000
	Enfriamiento	Sistemas precisos de control de temperatura	Refrigerantes estándar

Fuente: (Chen, y otros, 2020)

Se pueden distinguir dos grupos en micromecanizado, el primero utiliza técnicas convencionales basadas en herramientas y el segundo, procesos avanzados. Dentro de las técnicas convencionales se encuentran procesos de microtorneado, microtaladrado y microfresado, situando al micromecanizado dentro de las tecnologías basadas en el arranque de material, de manera específica en el micro corte (Pijek, Keran, & Math, 2013). Los procesos avanzados utilizan tecnologías fundamentadas en la miniaturización de procesos a nivel macro de formación de viruta, como el nano mecanizado. La clasificación completa se muestra en la figura 2.3.

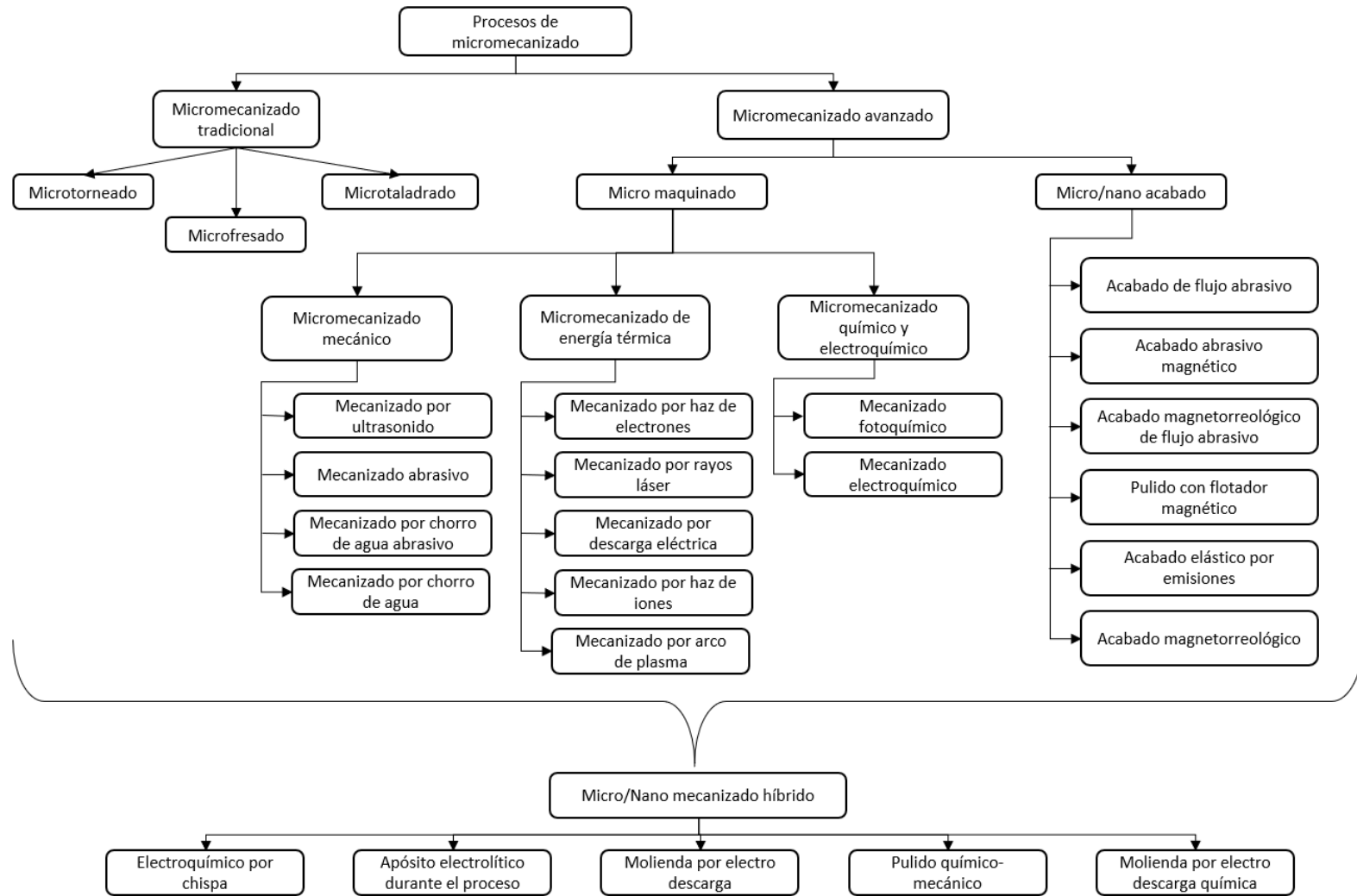


Figura 2.3 Clasificación de procesos de micro mecanizado y nano mecanizado

Fuente: (Kumar, Jerald, Kumanan, & Prabakaran, 2014)

La miniaturización en el mecanizado requiere precisión, ya que, pequeñas variaciones en el filo de corte afectan el acabado y la estabilidad del proceso. A escala micro, la interacción entre la herramienta de corte y el material a ser mecanizado se dificulta debido al tamaño mínimo de viruta (MTU). Según (López Estrada, 2019) aspectos como la interacción entre herramienta y material, precisión de la máquina y el control de los esfuerzos generados por el corte; afectan de manera significativa la viabilidad del micro mecanizado, por lo que, el uso de tecnologías avanzadas es clave para garantizar estabilidad y obtener piezas con tolerancias ajustadas.

2.2.2. Tamaño mínimo de viruta (MTC)

En el micromecanizado, la formación de viruta difiere del mecanizado a macro escala debido al tamaño mínimo de viruta (MTC), que ocurre cuando la profundidad de corte es igual o menor al radio del filo, esto se debe a que en el micro mecanizado el esfuerzo cortante aumenta de manera continua alrededor del filo de corte y el material parece ser empujado y deformado en lugar de ser cortado (Pijek, Keran, & Math, 2013), lo cual nos indica que existe una relación directa entre la profundidad del corte y el radio del filo de corte de la herramienta, ya que repercute en la calidad del acabado superficial de la pieza.

Al no tener en consideración el MTC, pueden ocurrir deslizamientos de la herramienta en lugar de realizar un corte efectivo, que conlleva a una ineficiente remoción del material, además, existe un aumento en la fricción lo que repercute en el desgaste de la herramienta. También, puede ocasionar generación de viruta discontinua, pequeños fragmentos irregulares, que ocasiona una remoción inestable del material afectando el acabado superficial (Pijek, Keran, & Math, 2013). La formación de viruta está directamente relacionada con el radio del filo de la herramienta de corte (R_e) y al espesor de viruta sin cortar (h), donde la relación que existe entre estos parámetros da lugar a diferentes comportamientos en el proceso de micromecanizado. El primer caso figura 2.4 (a), ocurre cuando $h < MTC$, existe deformación elástica del material sin remoción de este, esto ocurre debido a que la viruta no alcanza un espesor adecuado para superar la resistencia del material de la pieza generando acumulación de tensiones sin formación de viruta.

El segundo caso figura 2.4 (b), ocurre cuando $h \approx MTC$, aquí ocurre la formación de viruta por cizallamiento del material, existe deformación elástica lo cual provoca que la profundidad de corte se vea afectada, siendo esta profundidad menor a la requerida. El último caso figura 2.4 (c), ocurre cuando $h > MTC$, la deformación elástica es reducida de manera significativa por lo que el proceso de remoción del material se da de manera estable, dando como resultado una viruta definida, concordando con la profundidad de corte requerida. La eficiencia del micromecanizado está relacionada directamente con estos tres casos, ya que afectan la calidad superficial de la pieza, el desgaste de la herramienta y en la precisión dimensional, que es crítica en esta manufactura (Chen, y otros, 2020).

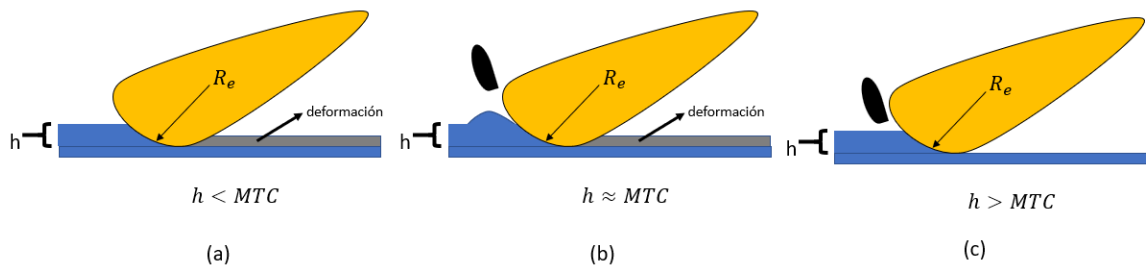


Figura 2.4 Casos relacionados al tamaño mínimo de viruta en micro mecanizado

Fuente: Elaboración propia

2.2.3. Ventajas y limitaciones de micro mecanizado

La tabla 2, nos muestra las ventajas y limitaciones del micromecanizado.

Tabla 2.

Ventajas y limitaciones del micromecanizado

Ventajas	Limitaciones
Alta precisión. Tolerancias ajustadas. Permite fabricación de microcomponentes. Fabricación de geometrías complejas. Posibilita manufactura directa sin requerir procesos adicionales. Reducción del material desperdiciado. La reducción de desperdicio lo vuelve un proceso eficiente.	Demanda un mayor conocimiento técnico. Desgaste acelerado de herramienta de corte. Relación entre radio de filo de herramienta y profundidad es alta. Requiere maquinaria de alta precisión. Requiere sistemas de sujeción sin deformación. Considerar MTC.

Fuente: Elaboración propia

Al ser un proceso de alta precisión, la remoción de material genera una menor cantidad de desperdicio (Davim, Mechanical Engineering. Research, development and Education, 2014), donde se demanda contar con un conocimiento profundo de los principios fundamentales del proceso, incluyendo la formación de viruta, la cinemática, efectos térmicos e integridad superficial (Mamedov, 2021). Así mismo, a pesar de que el fresado a nivel macro suele tener un mayor descentramiento, en muchos casos este efecto puede considerarse despreciable (Davim, Mechanical Engineering. Research, development and Education, 2014).

2.2.4. Proceso de micromecanizado

Los procesos de micromecanizado se pueden clasificar en dos grandes grupos, el micromecanizado tradicional, el cual incluye microtorneado, microfresado y microtaladrado y; en procesos avanzados de micromecanizado. El presente proyecto se enfoca en microfresado. La figura 2.5 detalla los 3 procesos de micromecanizado tradicionales con sus características y aplicaciones.



Figura 2.5 Operaciones de micromecanizado tradicional

Fuente: Elaboración propia

2.2.5. Microfresado

El microfresado es una tecnología de mecanizado a microescala que emplea herramientas rotativas con diámetros inferiores a 1 mm para la eliminación precisa de material. Este proceso permite alcanzar tolerancias geométricas y dimensionales menores a 5 μm , mientras que la rugosidad superficial de la pieza mecanizada puede ser inferior a 100 nm (Chen, y otros, 2020). La punta de las herramientas de microfresado es la zona efectiva de corte el cual cuenta con aristas de corte tanto en el extremo como en los lados, facilitando la remoción de material. El diámetro de estas herramientas está sujeto a estrictas tolerancias dimensionales que van entre 0.1 y 5 μm debido que, por cualquier desviación puede ocasionar errores en la dimensión, desplazamiento sobre el material o no realizar corte (Davim, Mechanical Engineering. Research, development and Education, 2014). Entre las características de este tipo de manufactura incluye una profundidad de corte (UCT) reducida, mínima desviación de la herramienta, elevada energía de corte específica, un marcado efecto de tamaño y una recuperación elástica posterior al mecanizado (Kumar, Jerald, Kumanan, & Prabakaran, 2014).

El uso de una UCT pequeña es fundamental para prevenir la fractura de la herramienta debido a las altas fuerzas de corte y para disminuir la altura residual en la superficie mecanizada. En comparación con las herramientas de mayor tamaño, la desviación de las herramientas debe mantenerse por debajo de 2 μm para reducir las vibraciones causadas por anisotropías geométricas (Chen, y otros, 2020). Por otro lado, la energía de corte específica requerida para remover una unidad de volumen de material en el microfresado es aproximadamente diez veces mayor que en el fresado a nivel macro, este efecto se debe a la alta relación que existe entre el radio del filo de corte de la herramienta y la UCT (Chen, y otros, 2020).

2.2.5.1. Condiciones de corte

Las condiciones de corte desempeñan un papel fundamental en la obtención de resultados óptimos, ya que influyen de manera directa en la calidad superficial, precisión dimensional y vida útil de la herramienta. La selección adecuada de los parámetros permite minimizar el desgaste de la herramienta, reducir la generación del calor y evitar fallas prematuras durante el proceso (Dimov, Pham, Popov, & Fansen, 2004). A continuación, en la tabla 3 se detalla las principales condiciones de corte y el impacto que tienen en el proceso.

Tabla 3.

Condiciones de corte y su impacto en el proceso

Condiciones de corte	Impacto en proceso
Profundidad de corte	•Afecta indirectamente a la calidad superficial. •Un aumento en la profundidad de corte genera mayores fuerzas de corte incrementando la vibración y zona térmica.

	•A mayor profundidad de corte, mayor inestabilidad de herramienta. •Las variaciones entre ancho de corte y diámetro de herramienta pueden alterar la integridad del material.
Velocidad de avance por diente	•A medida que aumenta el avance por diente, las marcas del diente se agrandan afectando a la calidad superficial. •Dentro de ciertos límites, el incremento de avance no genera mejoras significativas en la calidad superficial. •Una velocidad de avance alta permite aumentar la productividad del proceso, pero aumenta el riesgo de defectos en la superficie.
Velocidad de corte	•El incremento de la velocidad de corte contribuye a mejorar la calidad superficial. •Limitada por la velocidad de los husillos. •Altas velocidades pueden provocar desgaste acelerado de herramienta y fallos en el filo de corte.
Desgaste de la herramienta de corte	•Cualquier irregularidad en filos de corte afecta directamente en la superficie de la pieza. •A medida que se desgasta la herramienta, aumentan las vibraciones, y en condiciones extremas provocar la fractura. •Es necesario implementar estrategias para monitoreo y control del desgaste.
Uso de fluidos de corte, aire o niebla de aceite	•Mejora de manera significativa la calidad superficial y desempeño del proceso. •Ayudan a disipar el calor generado, reduciendo la afectación térmica sobre la pieza. •Alarga la vida útil de la herramienta de corte. •Facilita la remoción de viruta, evitando cortes secundarios •Existen estrategias como lubricación mínima (MQL), inyección de aire comprimido o niebla de aceite.

Fuente: Elaboración propia

2.2.5.2. Dirección de rotación de herramienta de corte en fresado

La dirección de rotación de la herramienta desempeña un papel fundamental en la calidad del mecanizado, la eficiencia y la vida útil de la misma. La selección adecuada influye directamente en factores como la distribución de las fuerzas de corte, generación de calor, evacuación de virutas y acabado superficial. En fresado tanto para niveles macro y micro son dos tipos de operación: fresado ascendente (Up-milling) y descendente (Down-milling).

El fresado ascendente, es una técnica de mecanizado en la que la fresa gira en sentido contrario al avance de la pieza, eliminando material de manera progresiva. Este método genera una fuerza resultante que tiende a levantar la pieza, lo que puede ser problemático al trabajar con materiales delgados, ya que podrían deformarse o levantarse durante el proceso, el movimiento de esta operación se muestra en la figura 2.6 (a).

El fresado descendente es una técnica de mecanizado en la que la fresa gira en la misma dirección que el avance de la pieza, lo que permite una eliminación eficiente del material donde la fuerza resultante empuja la pieza contra la base, lo que simplifica la sujeción y facilita el mecanizado de piezas delgadas sin deformaciones. Este fresado permite el uso de fresas con ángulos de desprendimiento altos, lo que mejora la eficiencia del corte. El movimiento de esta operación se muestra en la figura 2.6 (b). A continuación, la tabla 4 muestra las características y efectos de las operaciones de fresado.

Tabla 4.

Características y efectos de operación por dirección de rotación de herramienta

Dirección de rotación de herramienta	Características	Efectos
Fresado ascendente	Existe variación en espesor de viruta, comienza siendo mínimo y aumenta hacia el final del corte	Contribuye a un mayor desgaste de la herramienta.
	Presencia de “backlash”	Afecta de manera negativa al acabado superficial.
	Difusión de calor hacia la pieza	Puede alterar propiedades del material.
	Aplicación de refrigerante compleja	Debido a la naturaleza del corte dificulta su llegada al filo de la herramienta.
	Formación de rebabas	Se forman únicamente en superficies no terminadas permitiendo eliminarlas sin necesidad de procesos adicionales.
Fresado descendente	Durante el proceso de formación de viruta, inicia con un grosor máximo y termina con un contacto mínimo	Reduce el desgaste de la herramienta prolongando su vida útil.
	Presencia de “backlash”	Prácticamente inexistente dando un mejor acabado superficial.
	Difusión de calor hacia la viruta	Evita afectaciones a las propiedades del material.
	Aplicación de refrigerante	Más efectiva ya que se dirige directamente sobre la zona de corte, donde se genera más calor.
	Formación de rebabas	Se forman en la superficie terminada, lo que puede comprometer la calidad de corte y requerir procesos adicionales para su remoción.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con (Balázs, Jacsó, & Takács, 2020), se recomienda el fresado descendente para procesos de microfresado, debido a una reducción de las fuerzas de corte para que la dirección de avance de la herramienta coincida con la rotación de la fresa, lo que genera fuerzas de corte más controladas y menores vibraciones, reduciendo el riesgo de desviaciones en el mecanizado. Existe un menor desgaste en la herramienta ya que al reducir las fuerzas de corte y evitar movimientos excesivos en la herramienta, se disminuye el desgaste prematuro de la herramienta, y adicional a esto, permite una mejor evacuación de la viruta, ya que tiende a ser expulsada hacia la parte trasera del mecanizado, evitando que se acumule en la zona de contacto y reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento y fractura de la herramienta.

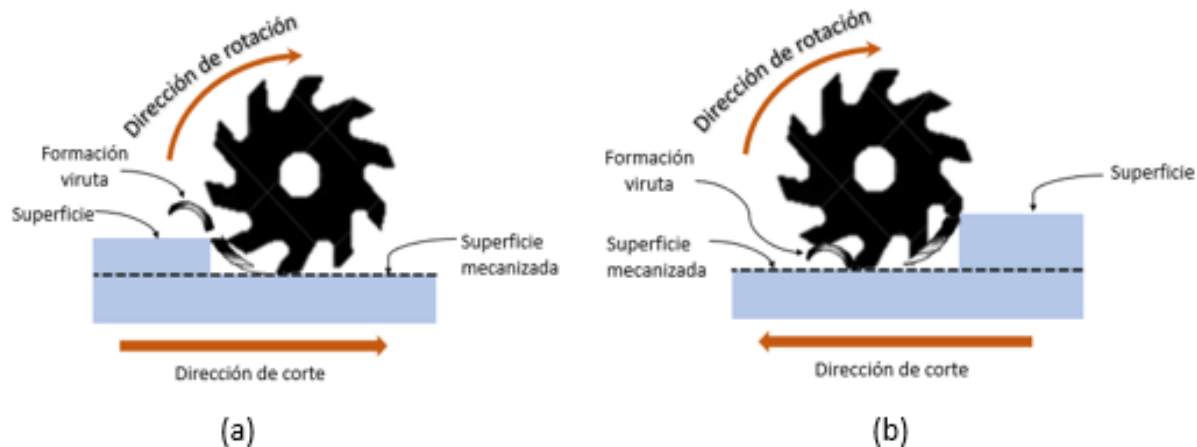


Figura 2.6 Fresado ascendente (a) y descendente (b)

Fuente: Elaboración propia

2.2.5.3. Operaciones en microfresado

Las operaciones de microfresado dependen del objetivo del mecanizado y material de la pieza de trabajo. No obstante, a nivel macro y micro, las operaciones son esencialmente las mismas. A continuación, se detallan las características específicas de estas operaciones en el ámbito del microfresado:

- **Desbaste (roughing)**

El desbaste no es la mejor opción en micro fresado debido a las altas fuerzas generadas y al riesgo de la fractura de la herramienta, por lo que cuando es necesario, se emplean estrategias de fresado trocoidal para reducir el contacto, tiempo de operación y carga sobre la herramienta (Rékasi & Bodzás, 2021). Depende de una selección adecuada de parámetros de corte, como altas tasas de avance y bajas profundidades de corte, además

del control de evacuación de virutas y generación térmica en la pieza, ya que son fundamentales para evitar daños en la herramienta y garantizar una mayor vida útil de la misma. Se suele utilizar fluidos de corte en mínima cantidad (MQL) para contribuir en el mejoramiento del proceso y calidad superficial para operaciones posteriores de acabados.

- **Acabado (finishing)**

Se utilizan bajas profundidades de corte y velocidades de avance controladas. Se requiere alta precisión ya que es de alto riesgo, puesto que en defectos presentados en la pieza puede generar rotura. En otras aplicaciones la superficie superhidrofóbica ha tenido crecimiento para las aplicaciones tanto en el sector aeroespacial, optoelectrónico, en Ingeniería Mecánica y biomedicina, por lo que, es imperativo tener un acabado superficial de alta calidad (Yu, y otros, 2016).

- **Planeado (Face milling)**

Se suele utilizar en piezas con superficies pequeñas y materiales blandos, pero es una operación poco utilizada. Se prefiere utilizar herramientas de diámetro pequeño con múltiples filos para mejorar la estabilidad. Está determinada por parámetros clave como la topografía, rugosidad y la planitud, los cuales son esenciales para cumplir con las especificaciones funcionales de las piezas.

- **Ranurado (Slot milling)**

Se emplean trayectorias trocoidales para minimizar el contacto y mejorar la evacuación de viruta, este tipo de operación es fundamental para fabricar micro canales, circuitos y piezas electrónicas. Se combinan estrategias de fresado, ascendente y descendente en las paredes opuestas de la ranura. Al implicar un mecanizado perimetral en ambas paredes de la ranura en un solo paso, proporciona mayor estabilidad a la herramienta por lo que se reduce el riesgo de deflexión y mejora la precisión geométrica, minimizando desviaciones en el paralelismo de las superficies opuestas, lo que es fundamental en aplicaciones de microfresado donde la precisión dimensional es crítica (Lanzetta & Rossi, 2020). Este tipo de operación es un proceso de alta precisión que requiere un control riguroso de los parámetros de corte para garantizar la estabilidad del mecanizado y la calidad de la superficie, el avance diente por diente se establece como un parámetro fundamental para definir la interacción entre la herramienta y el material, mientras que la profundidad de corte se emplea como un criterio de evaluación para determinar la eficiencia y precisión del mecanizado.

2.2.5.4. Máquinas y herramientas para microfresado

Para llevar a cabo el proceso de microfresado con precisión, es fundamental utilizar máquinas y herramientas especializadas, ya que es necesario operar con alta estabilidad, minimizando vibraciones y realizar cortes extremadamente precisos. La figura 2.7 detalla las características generales de la fresadora y herramientas para este tipo de manufactura.

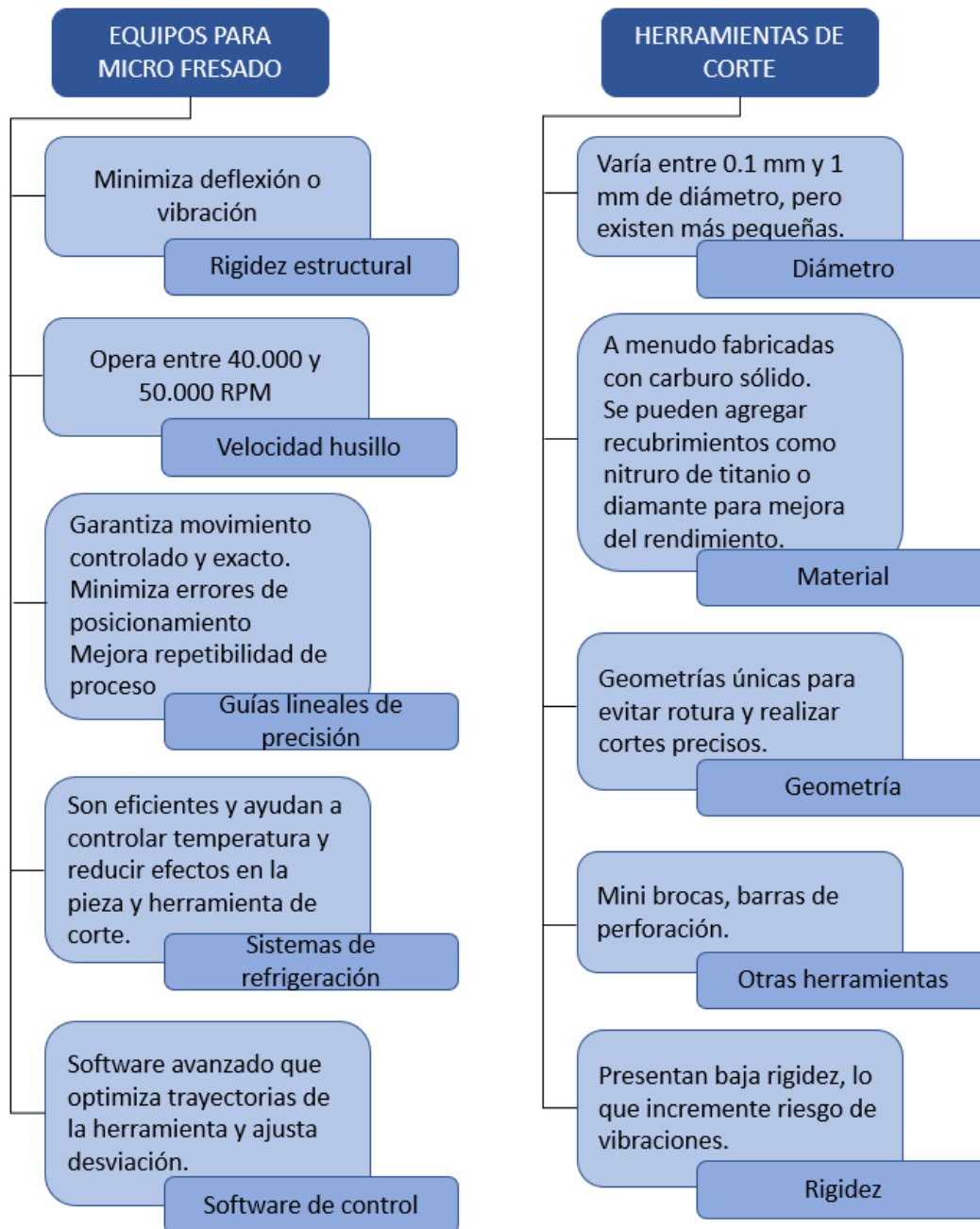


Figura 2.7 Características de máquina y herramienta de corte en microfresado

Fuente: Elaboración propia

El microfresado generalmente emplea técnicas de mecanizado a alta velocidad, con husillos que operan entre 40.000 y 50.000 RPM y requieren una programación especializada en CAM (Davim & Jackson, 2009), por lo que, es imperativo contar con una máquina rígida y un husillo estable. Con respecto a las herramientas de corte, la fabricación representa un gran desafío técnico, ya que su pequeño tamaño dificulta su elaboración y aumenta el riesgo de una ruptura durante el mecanizado. De acuerdo con (Davim, Mechanical Engineering. Research, development and Education, 2014), para minimizar las variaciones geométricas, se recomienda utilizar herramientas de corte provenientes de un mismo lote de fabricación.

2.2.5.5. Estrategias de corte

En microfresado se emplean trayectorias de corte dinámicas, lineales, circulares, axiales y en forma de onda, donde cada una influye de manera diferente en la eficiencia del mecanizado, la rugosidad superficial y en la formación de viruta. A continuación, se presentan las técnicas más comunes de estrategias de corte en función de la trayectoria para microfresado:

- **Fresado en rampa lineal**

Se distingue por su capacidad para producir componentes complejos con alta precisión y eficiencia. La herramienta ingresa en la pieza de trabajo siguiendo una trayectoria angular, donde se elimina el material de forma progresiva en un patrón espiral o helicoidal. Esta técnica es útil en operaciones de desbaste, ya que distribuye las fuerzas de corte de manera uniforme, reduciendo el desgaste de la herramienta y mejorando la calidad superficial.

El fresado en rampa se clasifica en lineal y circular, donde el fresado en rampa lineal implica un avance simultáneo en la dirección axial (eje Z) y en una dirección radial (eje X o Y) de la herramienta de corte, donde este tipo de fresado es útil para crear ranuras o escalones en la pieza de trabajo. Este tipo de corte presenta un mayor acoplamiento radial lo que puede comprometer en la integridad de la herramienta de corte y la rugosidad superficial.

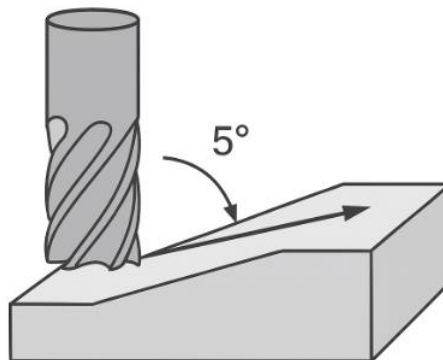


Figura 2.8 Trayectoria en rampa lineal

Fuente: Elaboración propia

El ángulo de rampa inicial influye en la estabilidad del proceso y eficiencia de la remoción del material, donde la selección depende de la dureza del material. La tabla 5 muestra los ángulos de rampa recomendados de acuerdo con el tipo de material.

Tabla 5.
Ángulos de rampa recomendados por tipo de material

Tipo de material	Ángulo de rampa recomendado
Materiales blandos o no ferrosos (aluminio, cobre, plásticos)	3° - 10°
Materiales duros o ferrosos (acero, aceros inoxidables, hierro fundido)	1° - 3°

Fuente: Elaboración propia

- **Fresado en rampa circular o interpolación helicoidal**

Posicionado como una técnica innovadora para la creación de agujeros, ofreciendo una alternativa eficiente al taladrado convencional. A diferencia del taladrado, el fresado en rampa circular, debido a su cinemática flexible permite obtener agujeros de diferentes diámetros sin necesidad de cambiar la herramienta, optimizando el tiempo de ciclo y eliminando la necesidad de procesos adicionales como re-taladrados, escariados o avellanados. Además, ajustes mínimos en el diámetro helicoidal permiten corregir errores dimensionales y geométricos durante el proceso por lo que se considera como un proceso ecológico y eficiente para la creación de agujeros.

El fresado en rampa circular introduce un movimiento en espiral sobre una trayectoria circular, combinando un avance axial (eje Z) con desplazamientos en X e Y, este tipo de estrategia de corte debido a su acción de corte más suave permite una mejor evacuación de la viruta resultando en una superficie más uniforme, este tipo de fresado es útil para crear superficies cóncavas o convexas en las piezas de trabajo.

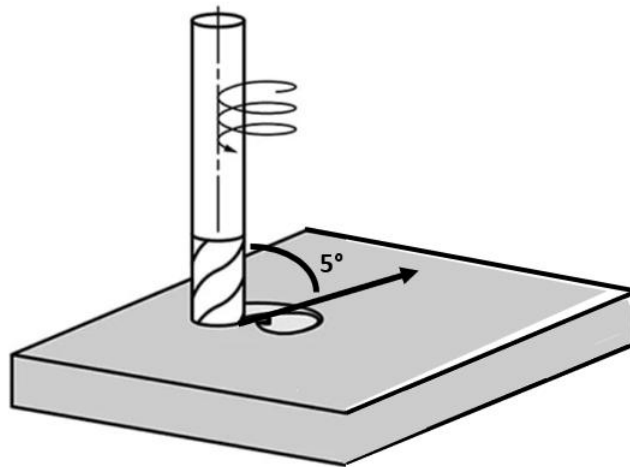


Figura 2.9 Diagrama trayectoria rampa helicoidal

Fuente: Elaboración propia

Entre las aplicaciones, el taladrado orbital (una variante del fresado helicoidal) elimina la necesidad de desmontar piezas para desbarbar, retirar virutas o limpiar residuos de lubricantes reduciendo tiempos de operación. Otro beneficio es su eficiencia en la evacuación de virutas ya que son expulsadas de la zona de corte mediante el espacio radial entre la herramienta y el agujero, permitiendo utilizar sistemas de soplado de aire para la evacuación, reduciendo la dependencia de refrigerantes líquidos. La aplicación de lubricación mínima (MQL) mejora aún más la calidad geométrica de los agujeros, reduce la temperatura y minimiza las fuerzas de corte.

El fresado helicoidal supera al taladrado en el mecanizado de materiales difíciles, ya que permite monitorear el desgaste de la herramienta, evitando fallos repentinos. Este desgaste ocurre en dos zonas: los filos de corte periféricos, con contacto intermitente, y los inferiores, donde el corte continuo provoca mayor desgaste y limita la vida útil de la herramienta. También permite ajustar la excentricidad para corregir trayectorias y mantener la precisión del diámetro, se minimizan problemas como la delaminación y los daños en materiales compuestos de fibra de carbono (CFRP) (Dutra, Cardoso, Paiva, Ferreira, & Davim, 2017).

Este fresado también se acoge a los ángulos detallados en la tabla 5, expuesto en la sección fresado en rampa lineal.

- **Fresado trocoidal**

Es una estrategia donde la herramienta sigue una trayectoria curva, similar a una serie de arcos superpuestos, con el objetivo de reducir el desgaste de la herramienta y aumentar la eficiencia en el corte. Al ser un movimiento oscilante se minimiza el contacto constante con

la pieza, reduciendo el calor y la fricción distribuyendo de mejor manera las fuerzas de corte. La figura 2.10 muestra la trayectoria del corte del corte trocoidal.

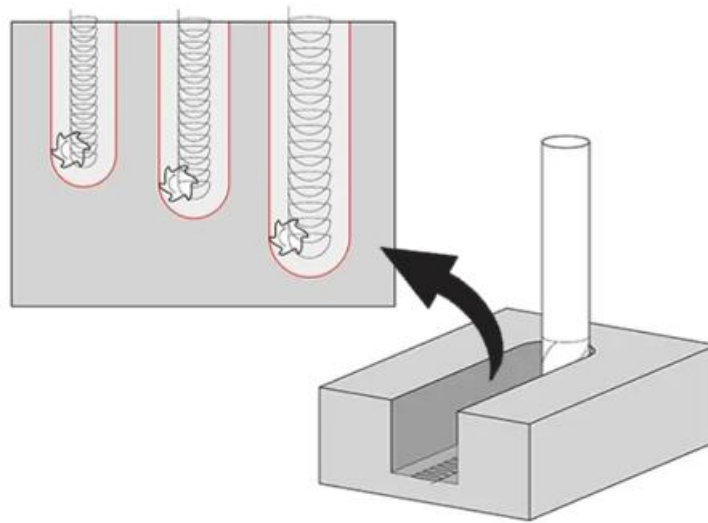


Figura 2.10 Diagrama corte Trocoidal

Fuente: Elaboración propia

Este tipo de corte permite que las virutas se desprendan más fácil, evitando que se acumule el material y reduciendo el riesgo de dañar la superficie de la pieza mecanizada. Según (Santos, y otros, 2023) también permite usar herramientas más pequeñas sin riesgo de rotura y mejora la calidad del acabado superficial. Esta estrategia es eficiente para mejorar la estabilidad del proceso, alargar la vida útil de la herramienta y garantizar una mejor evacuación de virutas, además tiene la capacidad en reducir el desgaste minimizando las cargas radiales y térmicas durante el proceso de mecanizado manteniendo un alto nivel de precisión.

Una consideración en este tipo de corte es la relación profundidad axial/diámetro de la fresa, puesto que en microfresado no se puede usar profundidades axiales grandes como en el caso de fresado a nivel macro, ya que la fresa es más frágil y el riesgo de flexión y rotura es mucho más alto. Lo recomendable es trabajar con profundidades axiales pequeñas, que oscilan entre $0.2D$ al $0.5D$, es decir entre el 20% y 50% del diámetro de la fresa.

- **Fresado de alto avance**

Se caracteriza por su capacidad para lograr altas tasas de arranque de material con cargas reducidas sobre la herramienta. Se utiliza herramientas con ángulos de ataque que oscilan entre 10° y 12° , que permite distribuir de manera eficiente las fuerzas de corte y menor deflexión en la herramienta. Presenta una alta tasa de avance por diente por lo que mejora

la productividad sin comprometer la calidad de la superficie mecanizada. Favorece una rápida evacuación de virutas, que es crucial en el mecanizado de cavidades pequeñas y en zonas de difícil acceso, la menor generación de calor en este tipo de corte contribuye a mantener la precisión dimensional, siendo una técnica altamente eficiente para trabajar materiales como aceros y aleaciones de titanio a escala microscópica. Es generalmente utilizado para el microfresado de materiales duros, sin embargo, debido a las altas velocidades es necesario el uso de fluido para reducir la fricción y el calor generado en la zona (Mittal, Kulkarni, & Singh, 2017).

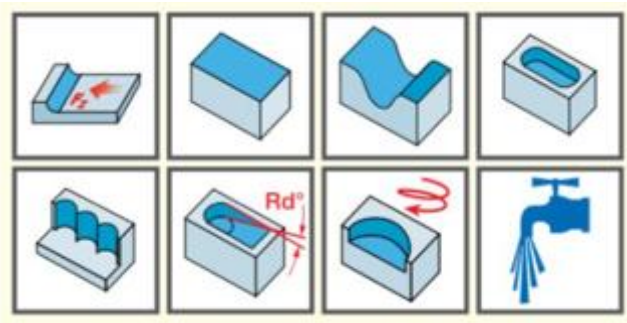


Figura 2.11 Diagrama trayectoria corte de alto avance

Fuente: (Sandvik Coromant, s.f.)

2.2.5.6. Parámetros de análisis

El proyecto se enfoca en el análisis de tres parámetros, los cuales tienen un alto impacto en los procesos de microfresado.

El primer parámetro es rugosidad, la cual puede ser medida por contacto y sin contacto. La medición por contacto utiliza un palpador con punta de diamante se desliza sobre la superficie registrando las variaciones. La ventaja es la alta precisión y mide de manera directa la rugosidad media aritmética (R_a), altura media de rugosidad máxima (R_z), Rugosidad cuadrática media (R_q), pero puede comprometer la superficie. Existen estudios en donde se ha realizado la medición sin contacto de la rugosidad superficial mediante la limpieza de la pieza con acetona con un limpiador ultrasónico y con la ayuda de un microscopio óptico analizar el acabado superficial (Varghese, Kumar, Kulkarni, & Joshi, 2019). Con respecto a la interferometría de luz blanca (WLI), está basado en la interferencia de luz blanca reflejada desde la superficie de la pieza, la ventaja de este método que es ideal para superficies frágiles y con detalles complejos. Para el caso de medición con focalización láser, usa un láser y un sistema de detección óptico para reconstruir la topografía de la superficie, donde la ventaja es que ofrece una alta resolución en 3D y un análisis rápido sin contacto. La microscopía de fuerza atómica (AFM) es un micro palpador que explora la superficie a nivel atómico brindando una resolución en el rango de nanómetros y medición de texturas ultrafinas, sin embargo, es lento y costoso para áreas grandes. El escáner óptico usa patrones de luz proyectados sobre la superficie y cámaras para medir la desviación y reconstruir el perfil, no es invasivo y es rápido.

	DESCRIPCIÓN	EQUIPOS DE MEDICIÓN
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	• Crucial para evaluar calidad de mecanizado y eficiencia de estrategia de corte seleccionada. • Restricción más importantes en eficiencia de producción.	• Medición por contacto Perfilómetros de contacto • Medición sin contacto Microscópico óptico Interferometría de luz blanca Focalización láser Microscopía de fuerza atómica Escaneo óptico 3D
DESGASTE DE HERRAMIENTA	• Crucial para evaluar la vida útil de la herramienta debido a las dimensiones reducidas de la misma. • Métodos de medición deben ser precisos y no invasivos para evitar interferencias con la geometría del corte.	• Microscopía óptica • Microscopía electrónica de barrido SEM • Interferometría de luz blanca (WLI) • Perfilometría óptica confocal • Análisis de imágenes con software de visión artificial
TIEMPO DE CORTE	• Definido como el período en el que la herramienta está en contacto efectivo con el material durante el mecanizado. • Crucial para la eficiencia del proceso, la vida útil de la herramienta y estabilidad del mecanizado. • Permite optimizar estrategias de corte.	• Registro manual con cronómetro • Monitoreo a través del equipo CNC • Monitoreo a través de la simulación del CNC

Figura 2.12 Características y equipos de medición de parámetros de experimentación

Fuente: Elaboración propia

El segundo parámetro es el desgaste de la herramienta, donde estudios analizan la relación entre la vida útil de la herramienta y rugosidad superficial, pero son limitados en comparación con los fresados a nivel macro lo que dificulta la evaluación y comparación del desgaste de la herramienta en este tipo de proceso (Varghese, Kumar, Kulkarni, & Joshi, 2019). Existen varios tipos de desgaste, los cuales se detallan en la tabla 6.

Tabla 6.
Tipos de desgaste en micro fresas

Tipo de desgaste	Detalle
Desgaste en el flanco	Ocurre en la cara de incidencia de la herramienta y es el criterio más utilizado para definir el final de la vida útil.
Desgaste en el cráter	Formación de cavidades en la cara de incidencia debido a temperatura y fricción.
Desgaste en la cara de ataque	Aparece en la zona de contacto entre la herramienta y la viruta, afectando a la calidad superficial.
Desgaste por fractura - impacto	Ocurre cuando la herramienta sufre roturas o grietas debido a cargas mecánicas excesivas, impactos o fatiga del material. Este tipo de desgaste es más común en herramientas de corte que operan en condiciones extremas, como altas velocidades de corte, materiales duros o intermitencias en el proceso de mecanizado.
Desgaste por fractura - por calor	Es causado por la combinación de altas temperaturas y tensiones mecánicas que generan grietas o roturas en la herramienta. Este fenómeno se debe a: ciclos térmicos, gradientes de temperatura, debilitamiento de materia, cargas mecánicas.
Desgaste por deformación	Ocurre cuando la herramienta se deforma plásticamente debido a las altas temperaturas y presiones generadas durante el mecanizado. Este tipo de desgaste es más común en herramientas de materiales menos resistentes al calor, como el acero rápido (HSS), o cuando se trabaja a velocidades de corte elevadas.

Fuente: Elaboración propia

El tercer parámetro es el tiempo de corte, se expresa en segundos (s) y depende de varios factores, los cuales se detallan a continuación:

- Velocidad de avance (f), la cual determina la rapidez que la herramienta avanza en la pieza.
- Profundidad de corte (a_p) y ancho de corte (a_e), la cual definen el volumen de material removido por cada pasada.
- Velocidad de rotación (n), que influye en la tasa de remoción de material y en la generación de calor.
- Estrategia de mecanizado, la cual depende si el fresado es ascendente o descendente.

2.2.5.7. Selección de estrategia de corte

Las estrategias de corte seleccionadas para el presente proyecto son 3:

- Estrategia de corte en rampa lineal
- Estrategia de corte en rampa helicoidal
- Estrategia de corte trocoidal

Estas estrategias fueron seleccionadas con el objetivo de evaluar su impacto en el acabado superficial, desgaste de la herramienta y el tiempo de corte. Un análisis comparativo entre estas tres estrategias permite determinar cuál ofrece un mejor desempeño contribuyendo a la búsqueda de optimización de procesos.

2.2.5.8. Características de la máquina y equipos de medición

Para garantizar la precisión y calidad en el microfresado, es necesario la revisión de parámetros técnicos de la máquina y equipos de medición. Estos determinan las condiciones óptimas de mecanizado. La figura 2.13 detalla especificaciones técnicas de la máquina y equipos de medición utilizados.

	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	MÁQUINA/EQUIPO
FRESADORA	Modelo: Roland MDX-40 Compatibilidad: Amplia variedad de materiales Aplicación: Diseño, manufactura e investigación.	
RUGOSÍMETRO	Modelo: Phase II SRG-4500 Resolución: 0.01 μm Rango: 0.01 - 40 μm Método: Inductancia Palpador: Diamante (radio 5 μm).	
MICROSCOPIO	Modelo: Microscopio Electron Modo enfoque: Manual Aumento: 50X a 1000X Iluminación: 8*LED (brillo ajustable). Resolución imagen 1920*1080P.	
CRONÓMETRO	Precisión: $\pm 0.01\text{s}$ Modo: Activación/desactivación manual.	

Figura 2.13 Especificaciones técnicas de máquinas y equipos

Fuente: Elaboración Propia. Imágenes: fresadora (Product Development Inc., 2025); Rugosímetro (Component distributors inc., 2025), Microscopio (Electron Microscope, 2025)

2.2.5.9. Selección de material y herramienta de corte

En esta sección se presentan las características de los elementos para la ejecución del experimento. La figura 2.14 detalla información sobre la probeta y herramienta de corte.



Figura 2.14 Especificaciones fresadora y microfresa utilizadas para experimento.

Fuente: Elaboración propia

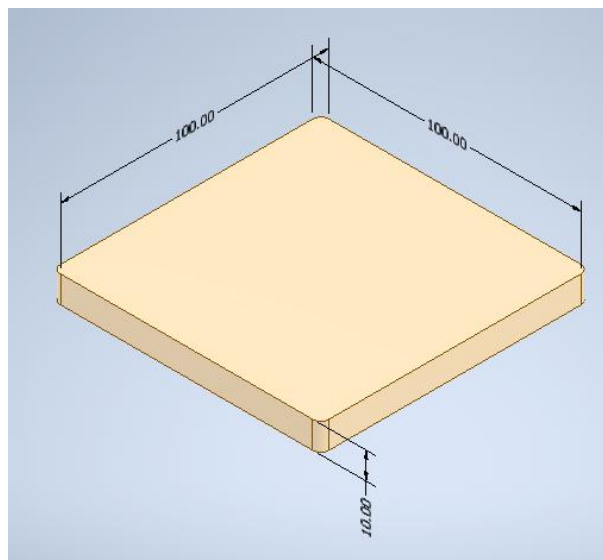


Figura 2.15 Dimensiones probeta de Duralón

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.16 Dimensiones fresa HSS

Fuente: Elaboración propia

2.2.6. Definición/Cálculo de parámetros

El proyecto tiene como objetivo analizar diversas estrategias de trayectoria de corte, para la evaluación de los parámetros clave previamente establecidos. A continuación, se detallan las ecuaciones pertinentes para el proyecto obtenidas de la revisión bibliográfica:

- **Velocidad del husillo**

La máquina Roland MDX-40 está diseñada para la creación rápida de prototipos de productos de consumo de pequeño tamaño. El área de trabajo es de 305 x 305 mm y la velocidad de husillo está en un rango de 4.500 y 15.000 RPM.

- **Velocidad de corte**

$$V_c = \frac{\pi \times N \times D}{1000} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde: N: las revoluciones del cabezal [rpm]

D: diámetro de la fresa [mm]

V_c : Velocidad de corte [m/min]

Existen tablas donde indican las velocidades de corte y avances recomendados de acuerdo con el tamaño del radio de la fresa. El material por mecanizar es Duralon HDPE, el cual forma parte del grupo de los termoplásticos de polietileno de ultra peso molecular (UHMWPE), que tiene una dureza de 66 en la escala Shore “D” (A&C Plastics Inc., 2023), lo cual lo clasifica como un plástico duro de acuerdo con la figura 2.17. La tabla 7 muestra la velocidad de corte recomendada para plásticos duros.



Figura 2.17 Escala dureza Shore

Fuente: (Poliuretano Industrial.com, 2021)

Tabla 7.
Velocidad avance micro fresa

	Velocidad de corte M/MIN	DIÁMETRO DE LA FRESA				
		φ 1mm	φ 2mm	φ 3mm	φ 4mm	φ 5mm
		Velocidad de alimentación en mm/dientes/Revolución				
Aluminio fundido > 6% Si	200	0.010	0.010	0.010	0.015	0.015
Aleación de aluminio forjado	500	0.010	0.020	0.025	0.050	0.050
Plásticos suaves	600	0.025	0.030	0.035	0.045	0.065
Plásticos duros	550	0.015	0.020	0.025	0.050	0.060
Madera dura	450	0.020	0.025	0.030	0.055	0.065
Madera suave	500	0.025	0.030	0.035	0.060	0.070
MDF	450	0.050	0.070	0.100	0.150	0.200
Latón, cobre, bronce	365	0.015	0.020	0.025	0.025	0.030
Acero	75	0.010	0.010	0.012	0.025	0.030

Fuente: (Stepcraft, s.f.)

- Avance por diente**

$$V_f = f_z \times z \times N \quad (\text{Ec.2})$$

Donde: V_f : velocidad de avance en mm/min, también se denota como F.

f_z : avance por diente en mm/ diente

Z: número de dientes

N: velocidad de giro de la fresa en rpm, también denotada como S

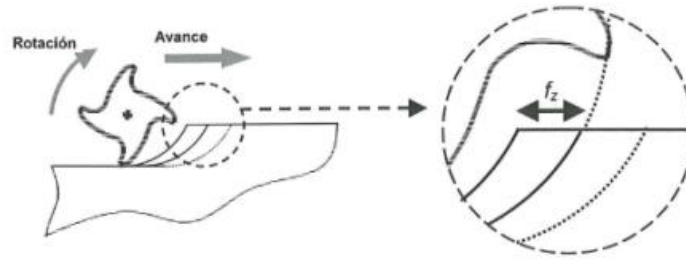


Figura 2.18 Avance por filo f_z en fresado descendente

Fuente: (Nicolalde & Tutillo, 2019)

- **Profundidad de pasada axial (a_p) y radial (a_e)**

$$a_e = 2\sqrt{R_{th}(D - R_{th})} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde: a_e : Profundidad radial o paso [mm]

D: Diámetro de la fresa [mm]

R_{th} = altura de la cresta, rugosidad máxima [mm]

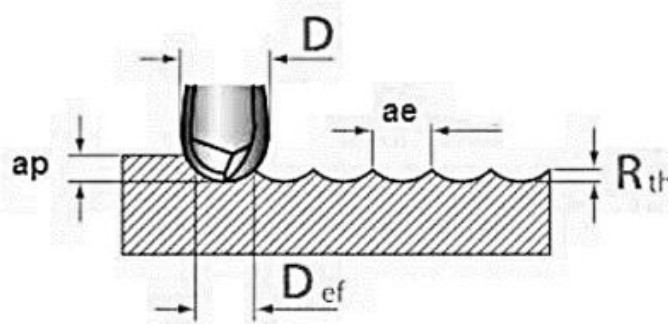


Figura 2.19 Esquema de corte de herramienta

Fuente: (Nicolalde & Tutillo, 2019)

- **Rugosidad**

Los valores de rugosidad media son obtenidos por el rugosímetro durante la experimentación y serán contrastados con los valores de rugosidad media establecidos en la tabla 8. Esto permitirá determinar qué tipo de rugosidad tiene las piezas y evaluar la calidad de estas.

Tabla 8.

Escala descriptiva de observación para determinar rugosidad

SYMBOLS AND LEVEL OF FINISHING			
Ra μm	AA- CLA μinch	Conventional symbols	Surface description
0.025	1	▼▼▼▼▼ ▼▼▼▼▼	Superfinishing
0.05	2		Burnishing diamond paste
0.1	4	▼▼▼▼▼	Lapped, high level of finish, perfectly smooth
0.2	8		Lapped for seal joints
0.4	16	▼▼▼▼	Ground, electric spark machining
0.8	32		Extra fine for machine tools, finish to the papers
1.6	63	▼▼▼	Very smooth for machine tools
3.2	125		Smooth for machine tools
6.3	250	▼▼	Medium for machine tools
12.5	500		Coarse for machine tools
25	1000	~	Raw material
50	2000	~	Raw material

Fuente: (Grupo Lucefin, 2024)

CAPÍTULO 3

3.1. RESULTADOS

3.1.1. Cálculo de parámetros de corte

Condiciones corte para rampa lineal y helicoidal

Los valores de la velocidad de corte y avance lineal fueron establecidos por los parámetros admitidos por el equipo (ROLAND), por lo que se trabajará con 12000 RPM. La velocidad de corte sugerida en la tabla 7 es de 550 m/min, sin embargo, debido a las restricciones del equipo se selecciona una velocidad de 35 m/min, para tener una velocidad acorde a las RPM permitidas por el equipo, aplicando la ecuación (1) determinamos:

$$V_c = \frac{\pi \times N \times D}{1000}$$

$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D}$$

$$N = \frac{35 \times 1000}{\pi \times 1}$$

$$N \approx 11146 \text{ rpm}$$

Aplicando la ecuación (2) determinaremos la velocidad de avance por diente. Donde N se obtuvo de la ecuación (1), Z corresponde al número de dientes de la fresa que son 4 y el avance por diente está dado en la tabla 8.

$$V_f = f_z \times z \times N$$

$$V_f = 0.015 \times 4 \times 11146$$

$$V_f = 668.76 \text{ RPM}$$

La profundidad de corte axial se realizó con dos variaciones, la primera con reducción de 1mm por pasada y la segunda con reducción de 0.5mm por pasada. La profundidad total de reducción es de 2mm.

Condiciones para corte trocoidal

De acuerdo con la bibliografía, en operaciones de fresado trocoidal, la profundidad axial (a_p) recomendada debe situarse entre el 20% al 50% del diámetro de la fresa. Esta selección busca reducir la carga de corte sobre la herramienta y evitar fenómenos como la deflexión o la fractura de la fresa, especialmente en procesos de microfresado.

Sin embargo, considerando los objetivos de este proyecto experimental y las condiciones particulares del equipo utilizado, se han establecido tres niveles de profundidad axial para realizar las pruebas: 0.3, 0.5 y 1 mm.

Los ensayos correspondientes a profundidades de corte de 0.5mm y 1 mm emplearán los mismos parámetros de corte ya definidos previamente para los ensayos con estrategias de fresado lineal y helicoidal, garantizando así la consistencia y comparabilidad de los resultados entre distintas trayectorias. En el caso de (a_p) de 0.3mm, debido a su menor valor se emplearán parámetros específicos los cuales se detallan a continuación.

Velocidad avance

La velocidad de avance para el corte trocoidal fue definido por tablas de fabricante de fresas, donde indica que la velocidad de corte recomendada de fresas HSS para corte de polímeros duros es de 18 m/min (ver tabla 9), sin embargo, para la experimentación la velocidad de corte definida es por 10 m/min.

Tabla 9.

Parámetros de corte fresa HSS

Grupo material	Ejemplo de materiales	Refrigerante	Vc (m/min)	Avance
Plásticos duros	Resina epóxica, Resopal, Pertinax, Motopren	Sin lubricante	18	0.014
Termoplásticos	Plexigas, Hostalen, Novodur, Makralon	Sin lubricante, aceite	28	0.016

Fuente: (STOCK precision, 2025), Tabla completa en anexo D

Avance por diente

El avance por diente para esta estrategia se escoge el recomendado por el fabricante de fresa, el cual detalla en la tabla 10 un valor de 0.014 mm/Rev.

Tabla 10.

Parámetros de avance por diente de fresa

Feed column									
Code-letter	A	B	C	D	E	F	G	H	I
0,50	0,004	0,006	0,007	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,019
1,00	0,006	0,008	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,023	0,025
2,00	0,020	0,025	0,032	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125
2,50	0,025	0,032	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160
3,15	0,032	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,160
4,00	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,200
5,00	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250
6,30	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315
8,00	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,315
10,00	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,400
12,50	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500
16,00	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630
20,00	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,630
25,00	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800	0,800
31,50	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800	1,000
40,00	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800	1,000	1,250

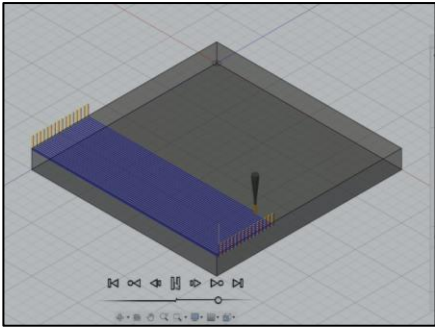
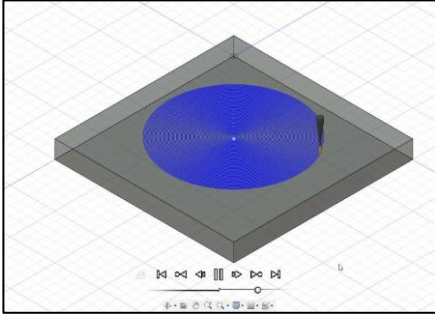
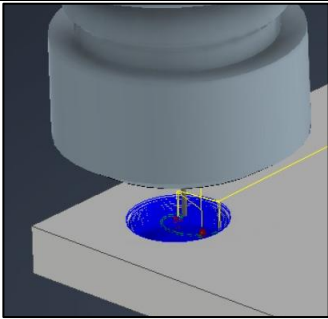
Fuente: (STOCK precision, 2025)

3.1.2. Programación CAM

Para la ejecución de las pruebas experimentales, se realizaron programaciones de corte en función de las trayectorias a realizar y la profundidad de corte por pasada, en total fueron 7 programaciones las cuales se detallan en la tabla 11. Todas las simulaciones fueron realizadas en Fusion360, donde se generó el código para la programación de los cortes en la máquina Roland MDX-40.

Tabla 11.

Programaciones de configuraciones de experimentación

Programación	Trayectoria	Profundidad axial	Profundidad total	Simulación trayectoria
1	Lineal	1 mm	2 mm	
2	Lineal	0.5 mm	2 mm	
3	Helicoidal	1mm	2 mm	
4	Helicoidal	0.5 mm	2 mm	
5	Trocoidal	1 mm	6 mm	
6	Trocoidal	0.5 mm	6 mm	
7	Trocoidal	0.3 mm	6 mm	

Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Datos recolectados

En la tabla 12 se detalla las configuraciones realizadas para la experimentación.

Tabla 12.

Configuraciones de experimentación

Probeta	Velocidad de corte (m/min)	Profundidad de corte total (mm)	Profundidad axial (mm)	No. De pasadas	Estrategia de trayectoria de corte
1	35	2	1	2	Rampa lineal
2	35	2	0.5	2	Rampa lineal
3	35	2	1	2	Rampa helicoidal
4	35	2	0.5	2	Rampa helicoidal
5	35	6	1	6	Trocoidal
6	35	6	0.5	12	Trocoidal
7	10	6	0.3	20	Trocoidal

Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se llevó a cabo la definición de parámetros de corte, considerando la velocidad de avance, velocidad de rotación del husillo, la profundidad de pasada y determinando la fresa correspondiente para cada probeta. Una vez definidos los parámetros se procedió a la simulación de las trayectorias de corte correspondientes a cada estrategia. Esta etapa fue esencial para visualizar y prever el comportamiento de la herramienta durante el mecanizado y estimar los tiempos de corte por cada probeta.

Posteriormente se realizó la generación del código G, adaptado para la máquina Roland, asegurando la compatibilidad del lenguaje de control con el equipo disponible en el laboratorio. Una vez validado el código se dio paso a la ejecución del proceso de corte donde cada probeta fue mecanizada utilizando su fresa correspondiente, asegurando que las condiciones de corte se mantuvieran constantes para todos los ensayos. Para cada tipo de trayectoria se mecanizaron 2 probetas, diferenciadas por la profundidad de pasada: una con pasadas de 1 mm y otra con pasadas de 0.5 mm, esta variación permitió observar el efecto que tiene la profundidad en la calidad superficial y el desgaste de la herramienta.

Una vez concluido el mecanizado, se realizó la toma de datos utilizando los equipos de medición designados, para luego analizar los datos comparando los resultados entre estrategias para identificar diferencias significativas. Finalmente se muestran los resultados obtenidos durante la experimentación.

3.1.3.1. Medición de Rugosidad

Para la medición de la rugosidad superficial de las probetas, se empleó el rugosímetro Phase II SGR-4500, donde se tomaron los datos de rugosidad de la siguiente manera:

Probetas estrategia rampa lineal

Debido a que la línea de corte es en un solo sentido, se consideró la dirección de la toma de datos del rugosímetro para obtener la rugosidad aritmética (R_a), por lo que se tomó datos de las esquinas y del centro, de manera horizontal y vertical, tal como se detalla en la figura 3.1.

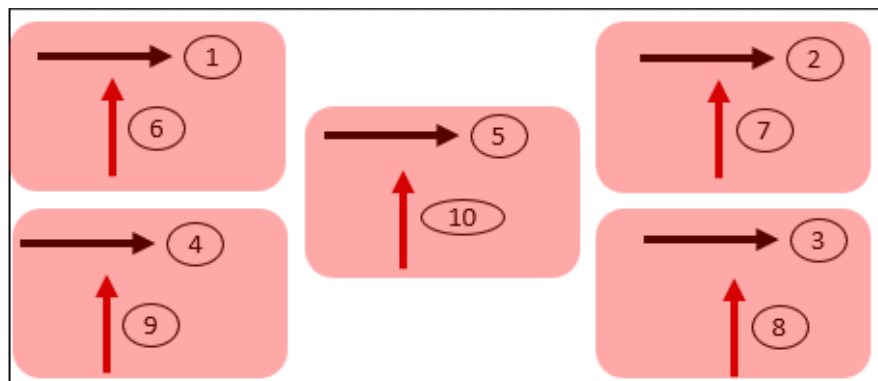


Figura 3.1 Bosquejo toma medidas probetas con trayectoria lineal

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo un total de 10 datos por probeta, donde R_a está definida por el promedio de todas las rugosidades de los datos tomados.

Los valores de rugosidad de la probeta 1 mecanizada con profundidad de 1 mm tomados en dirección del avance de la herramienta se muestran en la figura 3.2. Presenta una media de $2.387 \mu\text{m}$ con valor máximo de $2.979 \mu\text{m}$ en el punto 4, correspondiente a la esquina inferior izquierda, mientras que, se obtuvo un valor mínimo en el punto 2 de $2.026 \mu\text{m}$ en la esquina superior derecha de la probeta. La variación en las medidas de rugosidad puede atribuirse a factores como la vibración de la herramienta o la precisión del mecanizado.

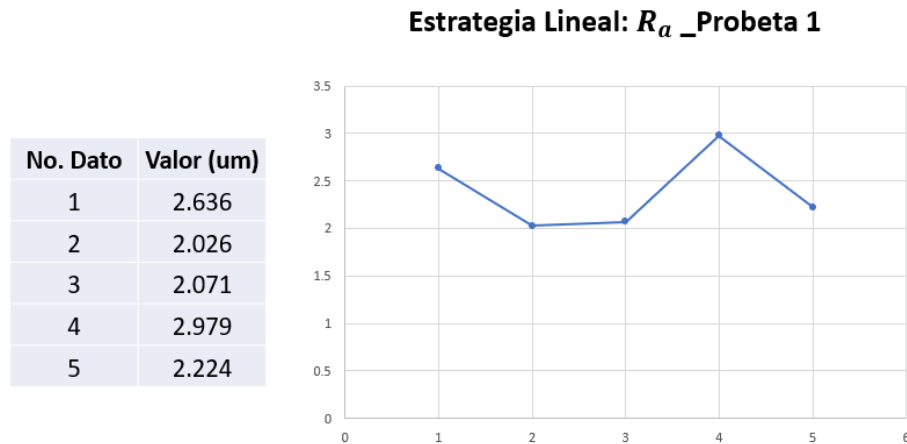


Figura 3.2 Datos rugosidad aritmética probeta 1 y gráfica de R_a _Probeta 1, rugosidad tomada en dirección del avance

Fuente: Elaboración propia

Los valores de rugosidad de la probeta 1 con profundidad de 1 mm tomados en dirección transversal al avance de la herramienta se muestran en la figura 3.3. Presenta una media de $3.153 \mu\text{m}$ con valor máximo de $3.476 \mu\text{m}$ en el punto 8, correspondiente a la esquina inferior derecha, mientras que, se obtuvo un valor mínimo de $2.658 \mu\text{m}$ en el punto 9, correspondiente a la esquina inferior izquierda de la probeta.

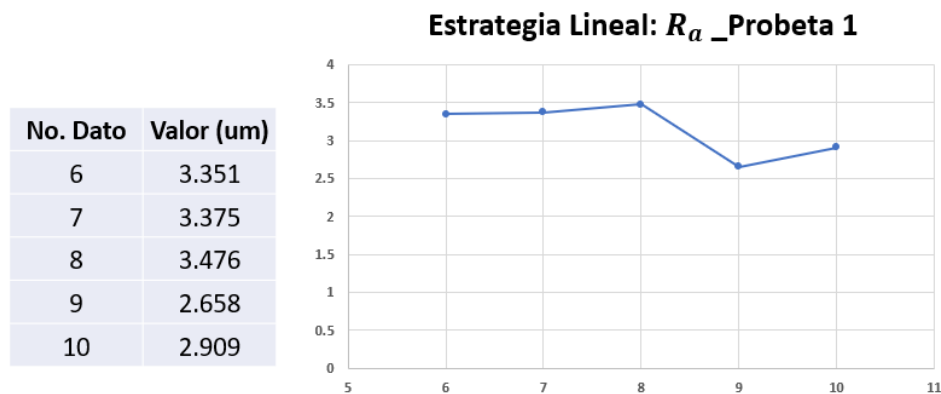


Figura 3.3 Datos rugosidad aritmética probeta 1 y gráfica de R_a _Probeta 1, rugosidad tomada de forma transversal al avance

Fuente: Elaboración propia

Los valores de rugosidad aumentan de manera significativa según la dirección en la que se mida. En la figura 3.2 se observa que el valor promedio de R_a en dirección del avance de la herramienta es $2.387 \mu\text{m}$ mientras que, al tomar los datos de manera transversal al avance, el promedio de R_a aumenta, esto ocurre en procesos donde la herramienta deja una huella marcada, lo cual está relacionado con la orientación de desplazamiento de la herramienta durante la trayectoria de corte. En este caso, la rugosidad es mayor cuando se mide en dirección transversal al avance de la herramienta.

Los valores de rugosidad de la probeta 2 con profundidad de 0.5 mm tomados en dirección del avance de la herramienta se muestran en la figura 3.4. Presentan una media de $1.208 \mu\text{m}$ y los datos varían entre $1.067 \mu\text{m}$ y $1.365 \mu\text{m}$, mostrando una superficie más uniforme, con pequeñas fluctuaciones, permitiendo obtener una textura superficial relativamente homogénea. El valor máximo fue en el punto 4, equina inferior izquierda, con un valor de $1.365 \mu\text{m}$, mientras que, el mínimo valor de R_a se obtuvo en el punto 2 correspondiente a la esquina superior derecha con un valor de $1.067 \mu\text{m}$.

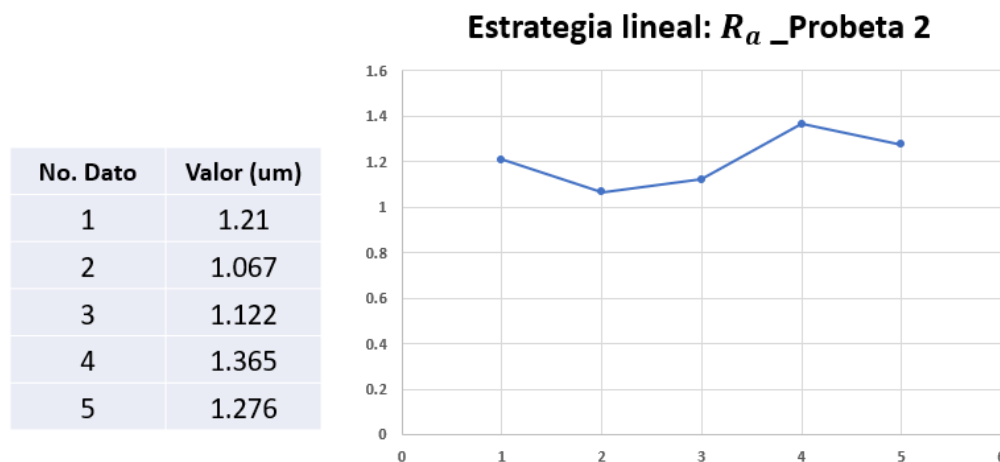


Figura 3.4 Datos rugosidad aritmética probeta 2 y gráfica de R_a _Probeta 2, rugosidad tomada en dirección del avance

Fuente: Elaboración propia

La figura 3.5 muestra que los valores de rugosidad son más altos cuando son tomados de manera transversal al avance de la herramienta que cuando son tomados en dirección paralela. Los valores mínimos y máximos son $1.766 \mu\text{m}$ y $1.967 \mu\text{m}$ respectivamente, con una media de $1.864 \mu\text{m}$, lo que indica una superficie menos rugosa que la probeta 1. Esta diferencia se debe a que, al aplicar cortes más profundos (1 mm por pasada) en la dirección vertical, se generaron marcas más pronunciadas en la superficie. La rugosidad medida de forma transversal al avance es 54.69% mayor que la medida en dirección paralela, esto indica que la superficie presenta una mayor irregularidad cuando se mide transversalmente.

Estrategia lineal: R_a _Probeta 2

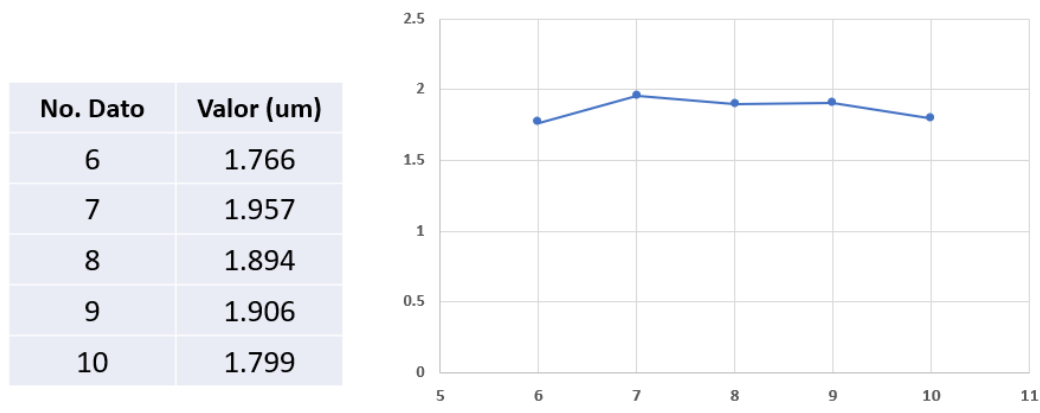


Figura 3.5 Datos rugosidad aritmética probeta 2 y gráfica de R_a _Probeta 2, rugosidad tomada de forma transversal al avance

Fuente: Elaboración propia

En la estrategia con trayectoria lineal, la rugosidad superficial se ve directamente influenciada por la dirección de avance de la herramienta, ya que para las probetas 1 y 2 con profundidades de corte de 1 mm y 0.5 mm respectivamente, se observó un aumento de valor del R_a al tomar la medida de manera transversal al avance, por lo tanto, el valor de R_a es menor cuando la medida es tomada en dirección del avance, independientemente de la profundidad de corte que se utilice. Además, se evidenció una disminución del valor de R_a en la probeta 2, lo que indica que una menor profundidad de corte conduce a una mejor calidad superficial. Menor profundidad axial favorece el acabado debido a que la herramienta experimenta menor vibración, fuerzas radiales y desgaste en el filo, lo que incrementa la estabilidad durante el mecanizado.

Probetas estrategia rampa helicoidal

Debido a la trayectoria circular, se tomó en total 5 datos de cada probeta, ya que la dirección de la toma de dato no afecta el valor R_a . La ubicación de la toma de datos se detalla en la figura 3.4.

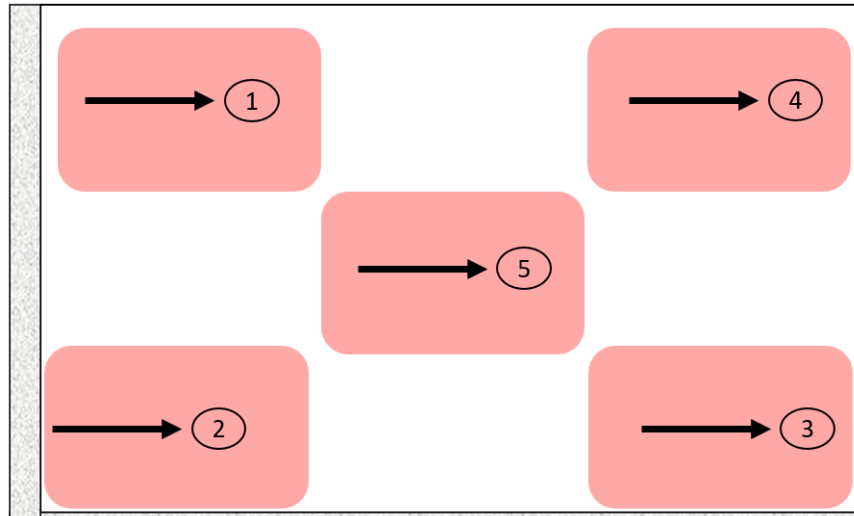


Figura 3.6 Bosquejo toma medidas probetas con trayectoria helicoidal

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo un total de 5 datos por probeta donde R_a está definida por el promedio de todas las rugosidades de los datos tomados.

Los valores de rugosidad de la probeta 3 con trayectoria helicoidal y profundidad de 1 mm presentan una media de $4.121 \mu\text{m}$ con valor máximo de $4.461 \mu\text{m}$ en el punto 1, correspondiente a la esquina superior izquierda, mientras que se obtuvo un valor mínimo de $3.588 \mu\text{m}$ en el punto 4, correspondiente a la esquina superior derecha de la probeta.

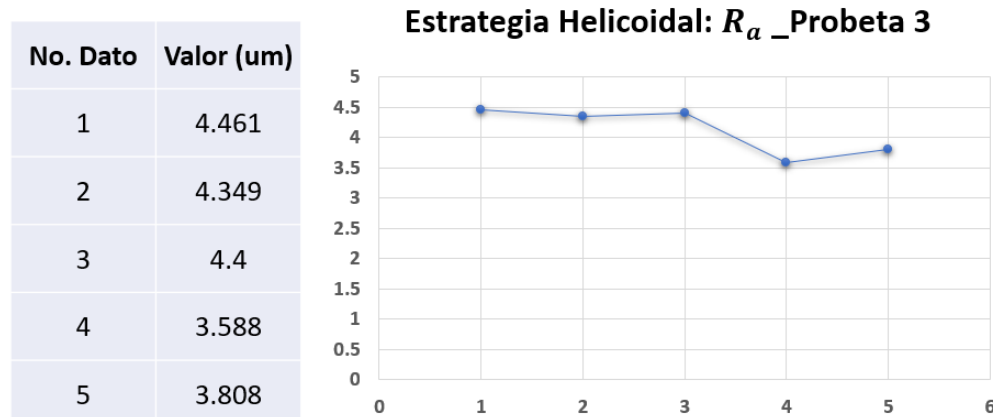


Figura 3.7 Datos rugosidad aritmética probeta 3 y gráfica de R_a _Probeta 3

Fuente: Elaboración propia

La rugosidad para la estrategia helicoidal con profundidad de 0.5 mm se muestra en la figura 3.8. Presenta una media de 2.260 μm con valor máximo de 2.664 μm en el punto 5, correspondiente al centro de la probeta, mientras que se obtuvo un valor mínimo de 1.915 μm en el punto 4, correspondiente a la esquina superior derecha de la probeta.

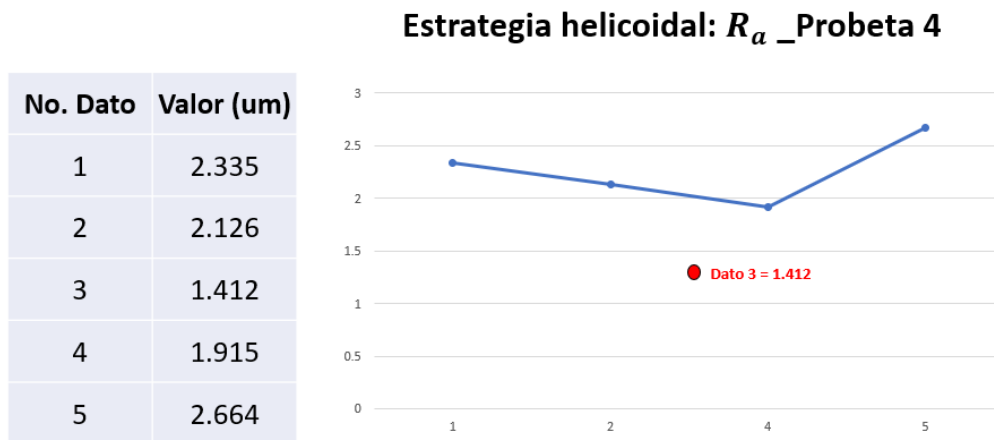


Figura 3.8 Datos rugosidad aritmética probeta 4 y gráfica de R_a _Probeta 4

Fuente: Elaboración propia

El dato 3 de los valores de rugosidad para la probeta 4 con profundidad de 0.5 mm se considera un dato aberrante, puesto que, se encuentra fuera de los límites aceptables de las mediciones de rugosidad. El gráfico 3.9 de caja y bigotes determina los cuartiles $Q1=1.915 \mu\text{m}$; $Q2= 2.126 \mu\text{m}$; $Q3=2.335 \mu\text{m}$, donde el valor del dato 3 (1.412 μm) está marcado fuera del límite inferior.

Diagrama de Caja y Bigotes - Rugosidad Aritmética

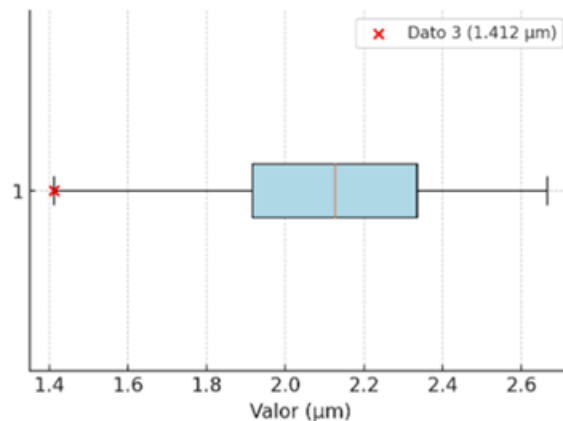


Figura 3.9 Diagrama de caja y bigotes de rugosidad aritmética estrategia helicoidal con profundidad de corte 0.5 mm

Fuente: Elaboración propia

El hecho de que uno de los valores de Ra obtenidos haya salido fuera de los rangos aceptables, puede atribuirse al desgaste puntual o acumulativo de la herramienta durante el proceso de mecanizado, además es posible que la acumulación localizada de viruta en algún punto de la trayectoria afectara temporalmente la calidad del acabado superficial.

En los cortes con trayectoria helicoidal, la rugosidad superficial está directamente influenciada por la profundidad axial de corte. En el caso de la probeta 3, cuya profundidad axial es de 1 mm, obtuvo un valor promedio de $Ra = 4.121 \mu m$, mientras que en la probeta 4, con profundidad de 0.5 mm, el Ra promedio fue de $2.260 \mu m$. Esto representa una mejora del 82.34% en el acabado superficial, en comparación con la probeta de mayor profundidad axial, lo que indica que, un corte menos profundo contribuye a obtener mejores resultados de la calidad superficial.

Probetas estrategia corte trocoidal

Durante el proceso de mecanizado utilizando la estrategia trocoidal, se produjo la rotura de las herramientas utilizadas (probetas 5 y 6). Este fenómeno se debió por la profundidad de corte empleada, generando fuerzas radiales significativas que las herramientas no lograron soportar, provocando su fractura y, en consecuencia, la imposibilidad de obtener datos en este experimento.

Durante la experimentación se observó que, al ingresar al material e introducirse a la profundidad axial programada, la fresa tendía a flexionarse y tras pocos avances, se fracturaba. Aunque la estrategia trocoidal se caracteriza por movimientos circulares de la

herramienta, lo que permite una reducción de la carga radial, si la profundidad de corte es excesiva o la velocidad de avance no es adecuada, el método puede generar fuerzas radiales elevadas que comprometen la integridad de la herramienta.

El experimento en la probeta 7 fue modificado con una profundidad de corte de 0.3 mm y variando los parámetros de corte, sin embargo, presentó una medida de rugosidad R_a “fuera de rango”, por lo cual los datos obtenidos no fueron empleados en el análisis final.

3.1.3.2. Medición del tiempo de corte

Para el análisis del tiempo de corte en la estrategia rampa lineal, se tomó en cuenta el valor de tiempo registrado en el laboratorio, donde se realizó el desbaste de un área parcial de la probeta (100*37 mm). En cambio, en el caso de rampa helicoidal, se efectuó el desbaste completo, con una profundidad total de 2 mm. Sin embargo, para la comparación entre ambas estrategias, se utilizaron los tiempos obtenidos en la simulación, ya que esta considera el desbaste completo de 5 mm en toda la superficie de la pieza, garantizando una evaluación equitativa de ambos métodos. A continuación, se detallan los tiempos de corte de cada tipo de estrategia:

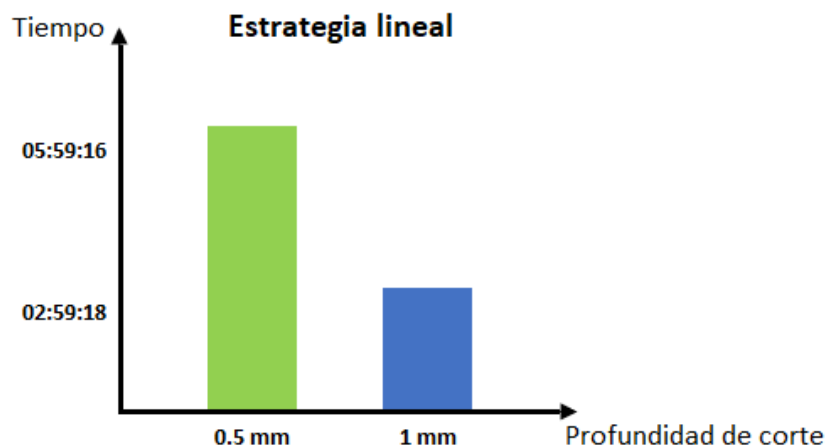


Figura 3.10 Tiempos de corte probeta 1 y 2 con estrategia lineal

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que, el tiempo de mecanizado para la estrategia rampa lineal, con una profundidad de corte de 1 mm fue en un 50.9% más rápido que con una profundidad de 0.5 mm (Figura 3.10).

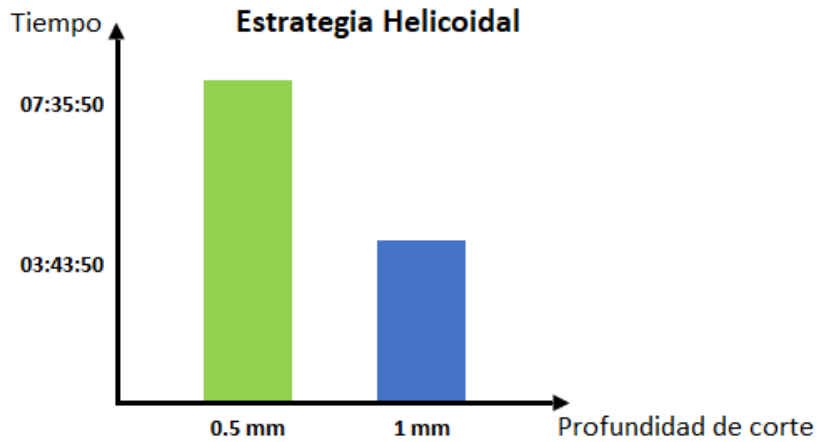


Figura 3.11 Tiempos de corte probeta 3 y 4 con estrategia helicoidal

Fuente: Elaboración propia

Se observa que, el tiempo de mecanizado para la estrategia helicoidal con una profundidad de corte de 1 mm fue en un 50.8% más rápido que con una profundidad de 0.5 mm.

Para la estrategia de corte trocoidal, debido a la rotura de la herramienta en las probetas 5 y 6, solo se obtuvo información del tiempo de mecanizado para la probeta 7 (Figura 3.12).

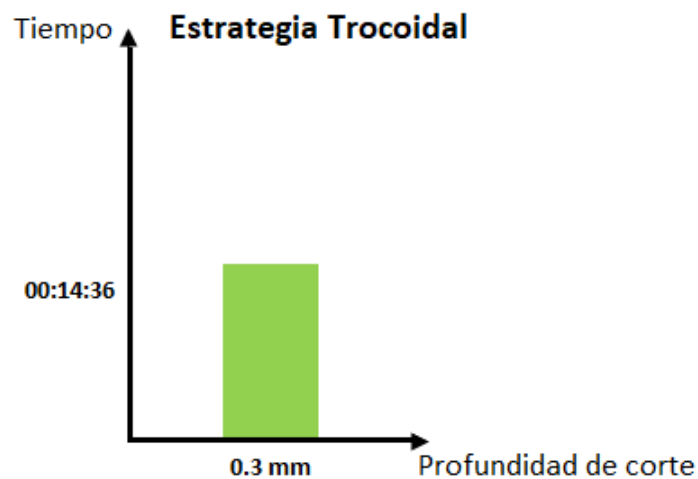


Figura 3.12 Tiempo de corte probeta 7 con estrategia trocoidal

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestran que, la estrategia en rampa helicoidal es más eficiente en términos de tiempo de corte comparada con la estrategia lineal (Figura 3.13). Para una profundidad axial de 1 mm, el tiempo de corte con la estrategia helicoidal fue de 3 horas, 43 minutos y 50 segundos, mientras que, la estrategia lineal tomó alrededor de 25 horas, 12 minutos y 25 segundos, lo que representa una reducción del tiempo de corte en 85.20%. De manera similar, con una profundidad axial de 0.5 mm, el tiempo de corte helicoidal fue de 7 horas y 36 minutos, en contraste con las 90 horas y 18 minutos necesarias para la estrategia lineal, lo que equivale a una disminución del 91.59%. Estos resultados demuestran que el corte helicoidal es más rápido, independiente de la profundidad axial utilizada.

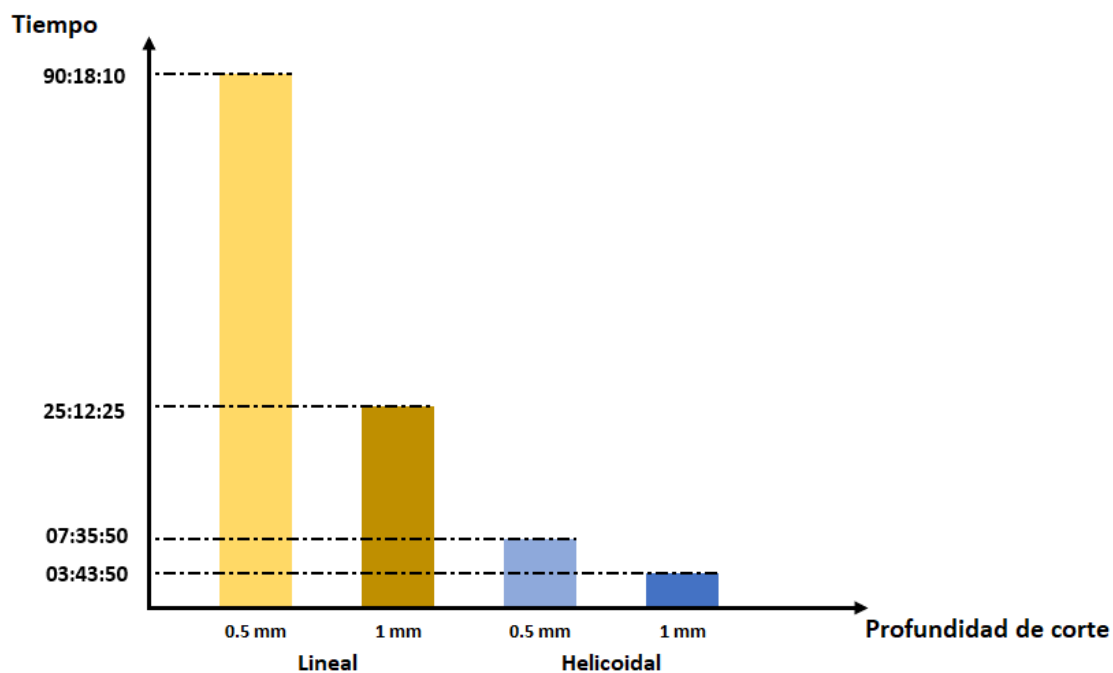


Figura 3.13 Tiempos de corte en trayectorias lineal y helicoidal con profundidad de corte de 5 mm

Fuente: Elaboración propia

3.1.3.3. Desgaste de herramienta

La medición del desgaste de la herramienta de corte fue realizada visualmente con un microscopio digital.

Probetas con corte lineal

Fresa 1 – Profundidad axial 1 mm

La figura 3.14 presenta el desgaste en la cara de ataque y flanco, se observa que 3 filos muestran gran desgaste, adicional muestra un filo con un pequeño cráter.

Vista superior

Se puede apreciar múltiples puntos de desgaste localizados principalmente en los filos de corte. Las áreas marcadas evidencian una pérdida de material, posiblemente ocasionada por fenómenos de abrasión o fatiga debido al uso repetido de la herramienta.

Vista lateral

El desgaste es visible tanto en el borde de corte como en la superficie lateral de la fresa. Este patrón podría estar relacionado con la aplicación de fuerzas laterales durante el mecanizado, o bien con un uso prolongado sin realizar procesos de afilado.

Fresa 2 – Profundidad axial 0.5 mm

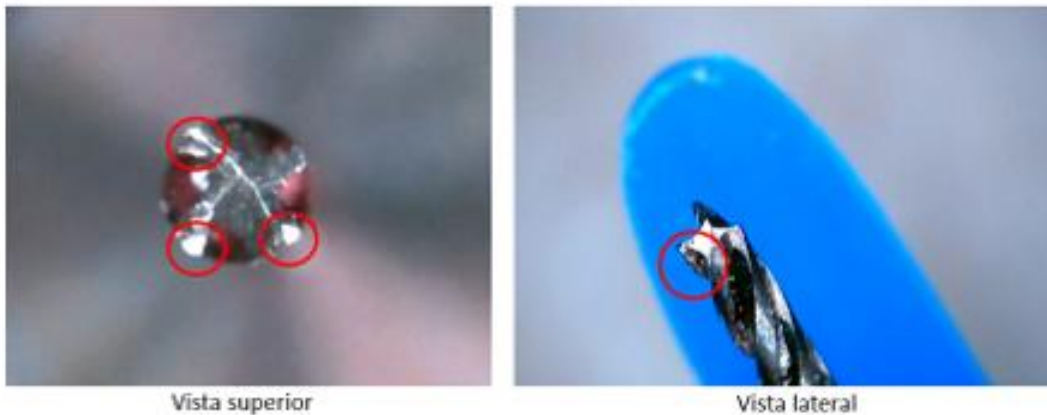
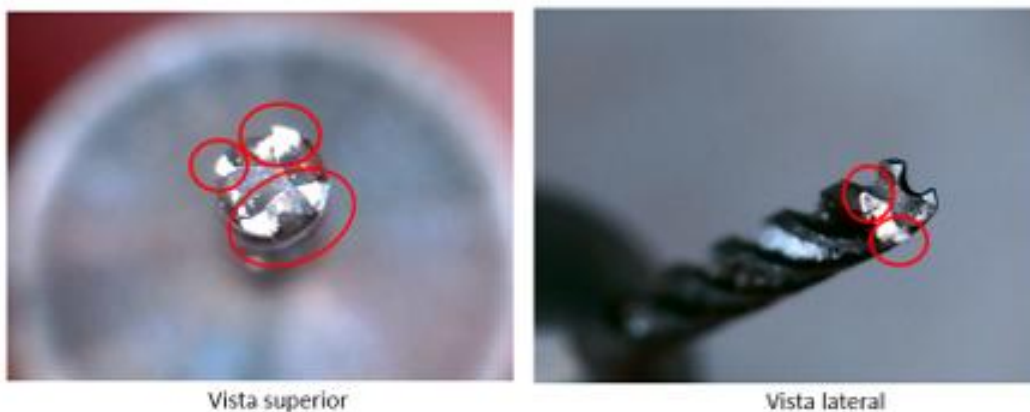
La fresa 2 presenta desgaste en la cara de ataque y flanco, pero de una manera más uniforme en las 4 puntas en comparación con la fresa 1.

Vista superior

Al igual que en la Fresa 1, se detectan zonas desgastadas en los filos. En este caso, el desgaste presenta una distribución más uniforme, lo cual sugiere que la herramienta fue utilizada bajo condiciones de trabajo constantes y controladas.

Vista lateral

Se observa un desgaste significativo en la punta y en la hélice de la fresa. Esta condición puede repercutir negativamente en la precisión del corte y en la calidad superficial de la pieza mecanizada, comprometiendo así los estándares del proceso productivo.

Fresa 1**Fresa 2****Figura 3.14 Desgaste de herramienta corte lineal**

Fuente: Elaboración propia

Probetas con corte helicoidal

Fresa 3 – Profundidad axial 1 mm

La figura 3.15 muestra que la fresa 3 sufrió desgaste en la cara de ataque y flanco, la herramienta se fue desgastando de manera uniforme, sin embargo, también se observa (en la vista lateral) una ranura ocasionada por fractura-calor.

Vista superior

Se identifica un punto de desgaste en uno de los filos de corte, donde el material parece haber sido eliminado, probablemente como consecuencia de una fricción constante con la pieza de trabajo.

Vista lateral

Se observan dos zonas claramente afectadas por el desgaste: una localizada en la punta y otra que se extiende a lo largo de la hélice. Este patrón sugiere que tanto el filo frontal como el lateral han estado expuestos a esfuerzos considerables durante el proceso de mecanizado.

Fresa 4 – Profundidad axial 0.5 mm

Presenta desgaste en la cara de ataque y flanco, se observa que la herramienta tiene un mayor desgaste en las 4 puntas y no en el centro.

Vista superior

Los filos de corte presentan múltiples zonas con desgaste evidente. Esta condición podría estar asociada a un tiempo de uso más prolongado o a condiciones de corte más exigentes que las aplicadas a las herramientas anteriores.

Vista lateral

El desgaste se manifiesta tanto en la punta como en el borde lateral de la herramienta, similar a lo observado en la fresa 3, aunque en este caso las zonas afectadas son más extensas y numerosas, lo que refuerza la hipótesis de un mayor esfuerzo operativo o una menor frecuencia de mantenimiento.

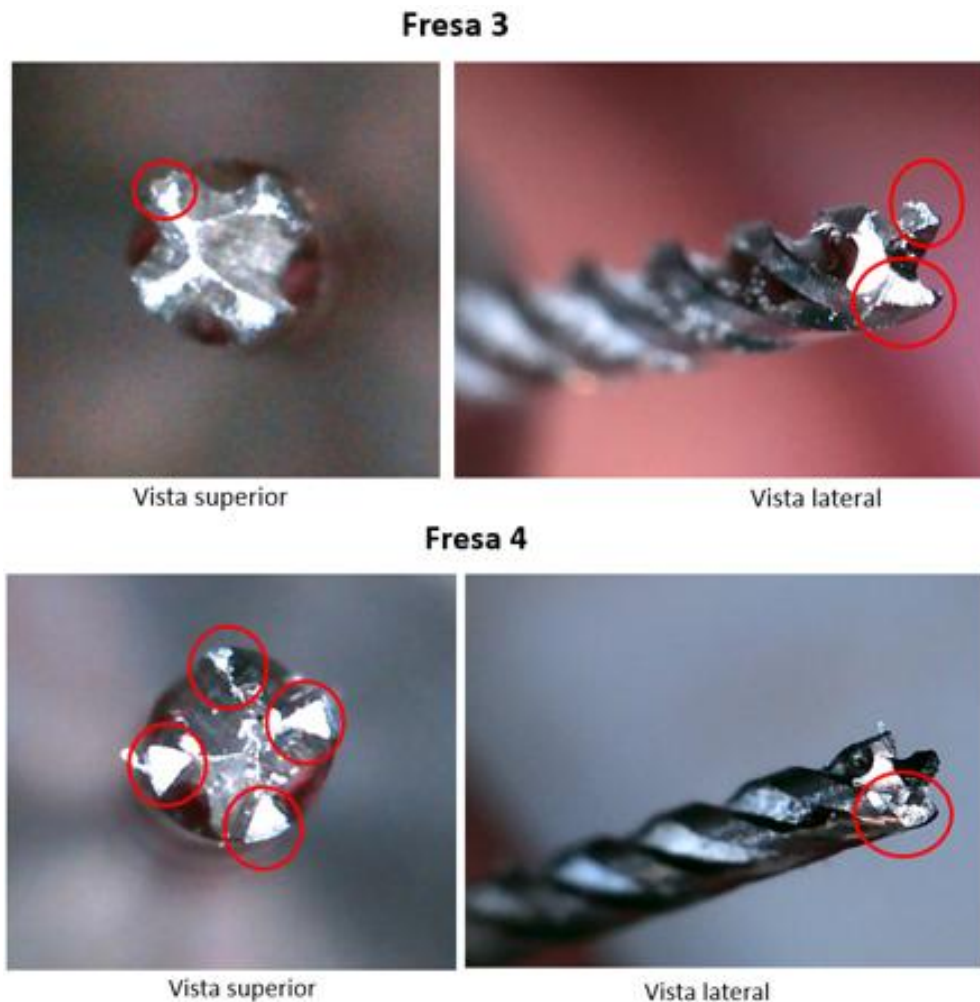


Figura 3.15 Desgaste herramienta corte helicoidal

Fuente: Elaboración propia

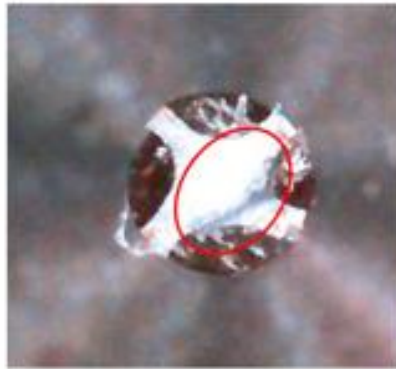
Probetas con corte trocoidal

La figura 3.16 muestra las herramientas 5 y 6 que presentaron fractura, lo cual se debió a parámetros de corte no adecuados para la estrategia de corte aplicada. Las profundidades de corte empleadas (0.5 y 1 mm) resultaron excesivas para la estrategia trocoidal, provocando fuerzas radiales elevadas que se concentraron en la punta de la herramienta. Esto ocasionó que la herramienta se flexionara y finalmente llegase a la fractura debido a la carga excesiva.

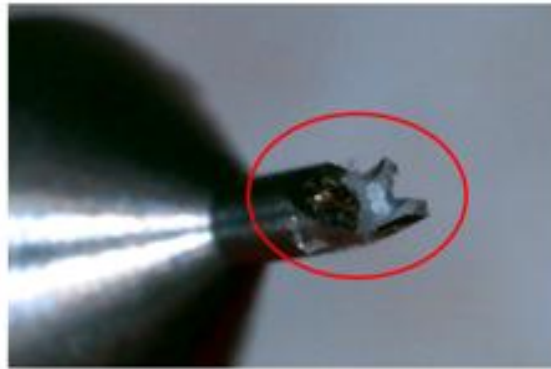
Para evitar fracturas, se realizó el corte en la probeta 7 modificando los parámetros de mecanizado, la velocidad de corte se redujo de 35 m/min a 10 m/min, el avance por diente se disminuyó a 0.014 mm/diente y la profundidad axial se ajustó a 0.3 mm. Con estos cambios la herramienta no se fracturó y presentó desgaste en la cara de ataque y flanco, para los cuatro filos de la fresa y no en el centro. Además, se evidenció la formación de

cavidades en la cara de incidencia, atribuida al aumento de temperatura por fricción durante el proceso de mecanizado.

Fresa 5

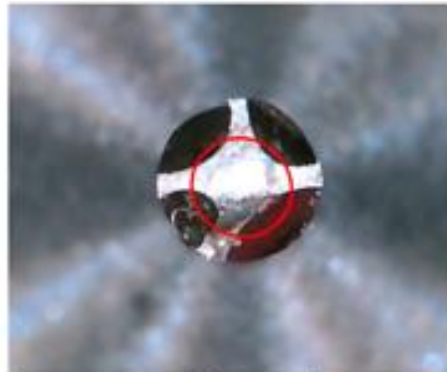


Vista superior

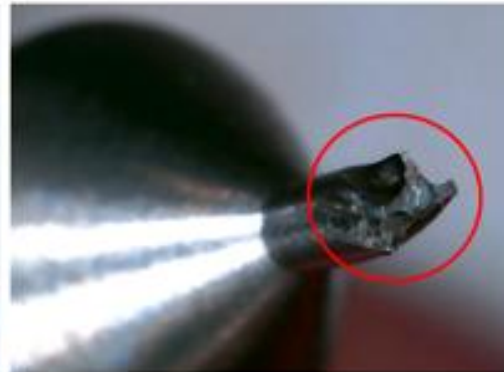


Vista lateral

Fresa 6

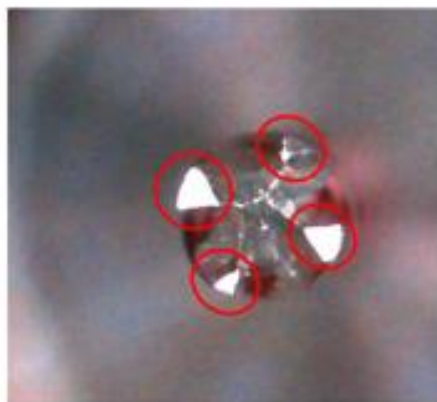


Vista superior

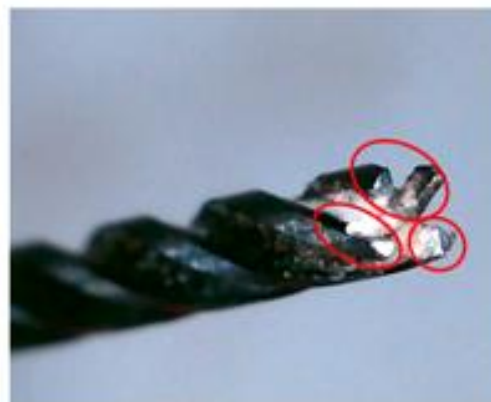


Vista lateral

Fresa 7



Vista superior



Vista lateral

Figura 3.16 Desgaste herramienta corte trocoidal

Fuente: Elaboración propia

Análisis desgaste de la herramienta de corte entre estrategias

Las herramientas para corte lineal y helicoidal, tanto para las profundidades axiales de 1mm y de 0.5 mm, presentan desgaste principalmente en las puntas y filos de corte, cuya intensidad y distribución varían según la profundidad y las condiciones de trabajo, mostrando signos de abrasión, fatiga y calor como cráteres, ranuras o pérdida de material en sus filos. En el corte trocoidal, si los parámetros no están bien ajustados, las fuerzas radiales excesivas provocan fractura por flexión, por lo que, es clave regular correctamente la velocidad, avance y profundidad de corte para evitar daños anticipados.

Las trayectorias de corte lineal y helicoidal con menor profundidad axial (0.5 mm), son las que menor desgaste generan en las herramientas, favoreciendo una distribución uniforme del desgaste y prolongando la vida útil de la fresa, esto se debe a que, al reducir la profundidad axial, la sección de material removido por pasada disminuye, lo que genera menores fuerzas de corte y por consecuencia disminuye el esfuerzo sobre la herramienta. Adicionalmente, existe una menor generación de vibraciones, evitando un desgaste irregular, permitiendo que la herramienta trabaje con más estabilidad, reduciendo el impacto y los picos de carga que pueden acelerar el desgaste.

3.1.3.4. Selección de mejor estrategia de corte

En el proceso de micromecanizado, la elección de la estrategia de corte es fundamental para optimizar el rendimiento, calidad y eficiencia del proceso. Luego de analizar los tiempos de corte, acabado superficial y desgaste de la herramienta en diferentes estrategias, se determinó lo siguiente:

- La estrategia de corte en rampa lineal con profundidad axial de 0.5 mm, ofrece el mejor acabado superficial con un valor Ra de 1.864 μm .
- La estrategia de corte en rampa helicoidal con profundidad de 1 mm tiene un mejor tiempo de corte de 03:43:50 llegando a una profundidad total de 5 mm.
- Las estrategias de corte en rampa lineal y helicoidal con profundidad 0.5 mm, presentan un menor desgaste en la herramienta.

La tabla 13 presenta un resumen de los datos obtenidos durante la experimentación:

Tabla 13.
Datos de la experimentación

Probeta	Estrategia	Profundidad / pasada axial (mm)	Total profundidad (mm)	Rugosidad superficial (Promedios Ra)	Tiempo de corte (t_c), laboratorio	Tiempo de corte (t_c), simulación Profundidad 5 mm	Desgaste herramienta	Observaciones
1	Lineal	1	2	2.770	2:59:18	25:12:25	Desgaste en la cara de ataque; Desgaste en el flanco	
2	Lineal	0.5	2	1.536	5:59:16	90:18:10	Desgaste en la cara de ataque; Desgaste en el flanco	
3	Helicoidal	1	2	4.121	1:42:19	3:43:50	Desgaste en la cara de ataque; Desgaste en el flanco; desgaste por fractura-calor	
4	Helicoidal	0.5	2	2.090	3:36:11	7:35:50	Desgaste en la cara de ataque; Desgaste en el flanco	
5	Trocoidal	1	6	N/A	N/A	N/A	Desgaste por fractura - impacto	Rotura de fresa
6	Trocoidal	0.5	6	N/A	N/A	N/A	Desgaste por fractura - impacto	Rotura de fresa
7	Trocoidal	0.3	6	FDR	0:14:36	59:00:00	Desgaste en la cara de ataque; Desgaste en el flanco; desgaste en el cráter; desgaste por fractura-calor;	Rugosidad fuera del rango del equipo

Fuente: Elaboración propia

3.1.4. Análisis de factibilidad técnica

Infraestructura

Las pruebas experimentales del presente proyecto se realizaron en el laboratorio de CAMPRO perteneciente a la facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESPOL, el cual cuenta con un centro de mecanizado capaz de realizar el proceso de microfresado en un entorno controlado. El laboratorio contaba con los siguientes equipos:

- **Fresadora Roland MDX-40:** Adecuada para procesos de microfresado, permitiendo ajustar los parámetros de corte para trabajar con herramientas de diámetro pequeño.
- **Espacio de trabajo:** El laboratorio cuenta con áreas adecuadas y seguras para realizar las pruebas.
- **Instrumentos de medición:** Se dispone de un rugosímetro para evaluar el acabado superficial; el desgaste de la herramienta de corte es medido con un microscopio y los tiempos de corte son tomados con un cronómetro digital.
-

Materiales y herramientas de corte.

Para el desarrollo de la fase experimental, se aseguró la disponibilidad de los materiales y herramientas requeridos, lo cual permitió validar la factibilidad técnica del estudio. Las probetas de duralon HDPE y las herramientas fueron halladas de manera local, facilitando una rápida adquisición. En total se utilizaron 7 fresas, asegurando que cada una trabajara exclusivamente con una probeta distinta y evitando así la interferencia de variables relacionadas con el desgaste acumulado en las herramientas de corte.

3.1.5. Análisis de factibilidad financiera

Las herramientas y material fueron adquiridos localmente, las probetas fueron cortadas por el proveedor. Los costos asociados a la adquisición se detallan en la tabla 14.

Tabla 14.

Costo de experimentación

Rubro	Costo
Adquisición de 12 probetas de duralon HDPE	\$165.50; \$12 c/probeta
Adquisición fresas 1 mm (12 piezas)	\$7.39 + IVA c/fresa
Costo hora/máquina	\$40.00 / hora Tiempo experimentación: 8 días laborales, 8 horas al día.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4

4.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.1. Conclusiones

- La estrategia de corte rampa lineal con profundidad axial de 0.5 mm por pasada (probeta 2) ofreció el mejor acabado superficial con un valor de R_a de 1.536 μm , evidenciando que menores profundidades por pasada permiten una mejor calidad superficial en microfresado. En contraste, la estrategia rampa helicoidal con profundidad de 1 mm (probeta 3) presentó la mayor rugosidad (R_a de 4.121 μm), lo que indica que una mayor carga axial combinada con la trayectoria helicoidal puede generar vibraciones o acumulación de calor perjudicial para el acabado.
- Disminuir la profundidad axial por pasada aumenta significativamente el tiempo de corte. La estrategia lineal con 0.5 mm (probeta 2) duplicó el tiempo respecto a 1 mm (probeta 1), lo cual evidencia la necesidad de balancear calidad superficial y productividad.
- La probeta 5 ensayada con trayectoria trocoidal, profundidad axial de 1 mm y probeta 6 con profundidad axial de 0.5 mm presentaron ruptura de la herramienta durante el mecanizado.
- Todas las estrategias presentaron desgaste en la cara de ataque y flanco, pero se observaron otras fallas por condiciones más agresivas o complejas:
 - ✓ Rampa helicoidal a 1 mm presentó desgaste por fractura y calor, lo que sugiere que esta estrategia induce mayores esfuerzos térmicos y mecánicos.
 - ✓ Trocoidal (probeta 7), mostró el mayor desgaste y rugosidad fuera de rango, lo que indica condiciones de corte severas incluso con menos profundidad.
- Para maximizar la calidad superficial sin comprometer demasiado el tiempo, la estrategia lineal con 0.5 mm por pasada representa la mejor estrategia.
- Las estrategias helicoidales pueden ser útiles, pero deben limitarse a menores profundidades por pasada (≤ 0.5 mm) para evitar deterioro acelerado de la herramienta.

4.1.2. Recomendaciones

- Se recomienda controlar y registrar condiciones ambientales, factores como temperatura y humedad ambiental pueden influir en el comportamiento del material y de la herramienta durante el mecanizado.
- Dado que durante la experimentación se presentaron rupturas en mecanizado trocoidal, se recomienda realizar una etapa preliminar variando sistemáticamente parámetros como velocidad de corte, avance por diente y profundidad axial.
- Ante la presencia de valores fuera de rango en las mediciones de rugosidad, se sugiere utilizar un rugosímetro con mayor capacidad de lectura o técnicas de caracterización superficial alternativas.
- Se recomienda realizar nuevas pruebas experimentales utilizando diferentes combinaciones de parámetros de corte, ya que los parámetros inicialmente establecidos provocaron la ruptura de la herramienta durante el mecanizado con trayectoria trocoidal.

BIBLIOGRAFÍA

- A&C Plastics Inc. (2023). *www.acplasticsinc.com*. Obtenido de https://www.acplasticsinc.com/media/documents/PD_UHMW.pdf
- Arizmendi, M., & Jiménez, A. (2018). Modelling and analysis of surface topography generated in face milling operations. *International journal of mechanical Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105061>
- Aslantas, K., Ülker, S., Sahan, Ö., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2022). Mechanistics modeling of cutting forces in high-speed microturning of titanium alloy with consideration of nose radius. *The international Journal of advanced manufacturing technology*.
- Balázs, B., Jacsó, A., & Takács, M. (2020). Micromachining of hardened hot-work tool steel: effects of milling strategies. *The international journal of advanced manufacturing technology*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05561-x>.
- Bhattacharyya, B., Malapati, M., & Munda, J. (2005). Experimental study on electrochemical micromachining. *Materials Processing technology*. doi:<https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2005.04.074>.
- Bodega Aurrera. (2025). *Bodega Aurrera*. Obtenido de <https://www.bodegaurrera.com.mx/ip/f/microaguja-12-uds-microagujas-de-12-pines-aguja-derma-facial-microaguja-electrica-magistralmente-creada/00090229114551>
- Bustillo, J., Howe, R., & Muller, R. (1998). Surface micromachining for microelectromechanical systems. *Proc. IEEE, 86, 1552-1574*. doi:<https://doi.org/10.1109/5.704260>
- Chen, N., Li, H., Wu, J., Li, Z., Liu, G., & He, N. (2020). Advances in micro milling: From tool fabrication to process outcomes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- Component distributors inc. (2025). *Octopart.com*. Obtenido de <https://octopart.com/es/datasheet/srg-4500-phase+2+plus-24876179>
- Davim, J. P. (2014). *Mechanical Engineering. Research, development and Education*. Aveiro: Springer.
- Davim, J. P., & Jackson, M. J. (2009). *Nano and Micromachining*.
- Dimov, S., Pham, D. T., Popov, K., & Fansen, K. (2004). Micromilling strategies: optimization issues. *Engineering Manufacture*.
- Dutra, R., Cardoso, L., Paiva, A. d., Ferreira, J., & Davim, J. (2017). A review of helical milling process. *International journal of machine tools and manufacture*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.05.002>

- G0 Z100. (febrero de 2025). *www.g0z100.com*. Obtenido de <https://g0z100.com/curso-cnc/interpolacion-helicoidal/>
- Grupo Lucefin. (2024). *www.studylib.net*. Obtenido de <https://studylib.net/doc/27123350/roughness>
- Guu, Y., Deng, C. S., Hou, M. T.-K., Hsu, C.-H., & Tseng, K.-S. (2012). Optimization of machining parameters for stress concentration in microdrilling of titanium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*.
- INEC - Registro Estadístico de Empresas. (2023). Boletín técnico No. 01-2023-REEM. Ecuador.
- ISCAR. (s.f.). *Fast Feed Milling Quick Tool*. Obtenido de FRESADO CON ALTO AVANCE: https://www.iscar.com.tr/Catalogs/publication-2022/Spain-14/Fast%20Feed%20Milling%20Quick%20Tool%20Selector%20Guide_14.pdf
- Jansen, P., Hoefnagels, J., Keijser, T. H., & Geers, M. (2008). Processing induced size effects in plastic yielding upon miniaturisation. *Journal of the mechanics and physics of solids*.
- Jing, X., Li, H., Wang, J., Yuan, Y., Zhang, D., Kwok, N., & Nguyen, T. (2017). An investigation of surface roughness in micro-end-milling of metals. *Australian Journal of Mechanical Engineering*.
- Kumar, S. L., Jerald, J., Kumanan, S., & Prabakaran, R. (2014). Review on current research aspects in tool-based Micromachining processes. *Taylor & Francis*.
- Lanzetta, M., & Rossi, A. (2020). Micro slot milling of glass. *Precision Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.06.001>
- López Estrada, L. A. (2019). Modelado y análisis del proceso de micromecanizado realizado con herramientas de filo único.
- Mamedov, A. (2021). Micro milling process modeling: a review. *Manufacturing Review*.
- Mittal, R. K., Kulkarni, S. S., & Singh, R. K. (2017). Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V. *Journal of manufacturing processes*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.007>
- Nam Duong cutting tool Co Ltd. (2019). *www.namduongtool.com*. Obtenido de <https://namduongtool.com/ramping-phay-doc-xuong-theo-hai-truc-tuyen-tinh-va-tron/>
- Nicolalde, F., & Tutillo, M. (Agosto de 2019). Análisis comparativo del acabado superficial en aleación de aluminio 7075-T6 para un proceso de mecanizado cnc entre un sistema de lubricación de mínima cantidad hasta 50 ml/h y un sistema de lubricación por inundación. Quito, Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17724>

- Özel, T., Liu, X., & Dhanorker, A. (2009). Modelling and simulation of Micro-milling process. *Materials and Manufacturing Processes*.
- Patra, K., Anand, R. S., Steiner, M., & Biermann, D. (2015). Experimental analysis of cutting forces in microdrilling of austenitic stainless steel (X5CrNi18-10). *Materials and Manufacturing Process*.
- Pijek, P., Keran, Z., & Math, M. (2013). Micromachining.
- Poliuretano Industrial.com. (2021). www.poliuretanoindustrial.com.
- Prabhakar, P. (2023). Micromachining and Its Applications. *SSRN*. Obtenido de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4532257
- Proconsa. (2020). *Proconsa México*. Obtenido de <https://proconsamexico.com/categoria-de-producto/rugosímetros/>
- Product Development Inc. (2025). www.pdi3d.com. Obtenido de https://www.pdi3d.com/Roland_MDX_40A_p/mdx-40a.htm?srsId=AfmBOopKEOvkkCc3r7joSSmG0c8bLVoyd-iSm0aQGNJJWGiuFrXxD3PH
- Rékasi, R., & Bodzás, S. (2021). Designing and Analysis of trochoidal technology for CNC production. *Australian journal of multi-disciplinary engineering*.
- Rodríguez, E. C. (2015). www.biblus.us.es. Obtenido de https://biblus.us.es/bibing/proyectos/buscar/influencia+de+parametros+de+corte+y+vibraciones+en+la+rugosidad+superficial+en+procesos+de+torneado+/en/todo/and//en/todo/limitado_a/todos/entre/1970/y/2025///1
- Sandvik Coromant. (s.f.). www.sandvik.coromant.com. Obtenido de <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/ramping>
- Santos, A. J., Oliveira, D. A., Pereira, N. F., Abrao, A. M., Rubio, J. C., & Camara, M. A. (2023). Effect of conventional and trochoidal milling paths on burr formation during micromilling of grade 4 commercially pure titanium. *Arabian Journal for Science and Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1007/s13369-023-07989-1>
- Scientific, B. (2025). www.biomed.com.ec. Obtenido de https://cdn.shopify.com/s/files/1/0555/3782/7940/files/Ficha_Tecnica_BS40X.pdf?
- Serje, D., Pacheco, J., & Diez, E. (2020). Micromilling research: current trends and future prospects. *The international journal of advanced manufacturing technology*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-020-06205-w>
- Stepcraft. (s.f.). *Stepcraft Store*. Obtenido de <https://stepcraft.odoo.com/milling-parameters>

- Tamez-Tamez, J. I., Vásquez-Lepe, E., Rodríguez, C. A., Martínez-López, J. I., & García-López, E. (2023). Assessment of geometrical dimensions and punctura feasibility of microneedles manufactured by micromilling. *The international journal of advanced manufacturing technology*.
- Tools, H. (17 de 5 de 2022). *Helion Tools Producing Cutting Solutions*. Obtenido de <https://helion.tools/es/b/blog/helion-tools/p/el-poder-del-fresado-trocoidal-30-1>
- Varghese, A., Kumar, P., Kulkarni, V., & Joshi, S. S. (2019). Experimental investigation of the correlation between surface roughness and tool-life in micromilling. *Advances in materials and processing technologies*.
- Yu, H. D., Zhang, X. R., Wan, Y. L., Xu, J. K., Yu, Z. J., & Li, Y. Q. (2016). Superhydrophobic surface prepared by micromilling and grinding on aluminium alloy. *Surface Engineering*.
- Zhang, S., To, S., Wang, S., & Zhu, Z. W. (2015). A review of surface roughness generation in ultra precision machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- Zhang, x., yu, T., Dai, Y., Qu, S., & Zhao, J. (2020). Energy consumption considering tool wear and optimization of cutting parameters in micro milling process. *International Journal of Mechanical Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105628>

ANEXOS

ANEXO A



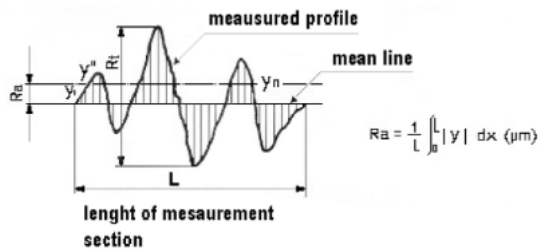
ROUGHNESS

ROUGHNESS CONVERSION TABLE

Ra μm ISO 468 e 4287	AA pinch USA ASA B.46.1	Centre Line Average CLA pinch GB BS 1134	Rt μm Germany	Rz μm JIS mean of 10 points	Ry μm max height	UEFCO	ISO 1302	MCC
0.006	0.25						N01	
0.012	0.5			0.05	0.05		N0	
0.025	1		0.25	0.1	0.1		N1	
0.05	2		0.5	0.2	0.2		N2	
0.1	4	4	0.8	0.4	0.4		N3	f5
0.2	8	8	1.6	0.8	0.8	fP	N4	
0.4	16	16	2.5	1.6	1.6	fP	N5	f4
0.8	32	32	4	3.2	3.2	fG	N6	f3
1.6	63	63	8	6.3	6.3	fF	N7	f2
3.2	125	125	16	12.5	12.5	fO	N8	f1
6.3	250	250	25	25	25	fO	N9	f
12.5	500	500	50	50	50	fR	N10	
25	1000	1000	100	100	100	fT	N11	
50	2000			200	200		N12	
100	4000			400	400		N13	
200	8000						N14	

SYMBOLS AND LEVEL OF FINISHING

Ra μm	AA- CLA pinch	Conventional symbols	Surface description
0.025	1	▼▼▼▼	Superfinishing
0.05	2	▼▼▼▼	Burnishing diamond paste
0.1	4	▼▼▼▼	Lapped, high level of finish, perfectly smooth
0.2	8	▼▼▼▼	Lapped for seal joints
0.4	16	▼▼▼	Ground, electric spark machining
0.8	32	▼▼▼	Extra fine for machine tools, finish to the papers
1.6	63	▼▼	Very smooth for machine tools
3.2	125	▼▼	Smooth for machine tools
6.3	250	▼	Medium for machine tools
12.5	500	▼	Coarse for machine tools
25	1000	~	Raw material
50	2000	~	Raw material



- Roughness is the series of micro-geometrical errors present on a surface prepared with any machining process.
- Roughness is measured on the surface in a transversal direction to the main grooves.
- The mean arithmetical value "Ra" in μm is assumed for the roughness measurement.
- Rt = maximum value of roughness or height from the lowest point to highest point
- Rz = average roughness in 10 points

ANEXO B



Precision Measuring Tools From CDI

www.cdiweb.com/phase2

1-800-777-7334

Surface Roughness Testers Profilometers NEW! SRG-4500



SRG-4500 PORTABLE SURFACE ROUGHNESS TESTER PROFILOMETER

The newest addition to our state-of-the-art surface roughness testers profilometer, the SRG-4500 will instill the highest level of confidence in your production, shop floor or QC lab. Extended memory and output coupled with multiple useful functions the SRG-4500 surface roughness tester profilometer is clearly the new leader in ultra accurate surface profile testing.

These surface roughness testers profilometers are distinguished by a high level of accuracy, multiple parameters and simplicity of operation. Extremely sensitive and highly accurate readings from this Phase II surface roughness tester profilometers are offered via 15 popular surface roughness scales including Ra, Rq(Rms), Rt, Rz and Rmax.

The diamond stylus is hypersensitive and sophisticated enough to allow for a .001 (µm) micron display resolution. The SRG-4500 surface roughness tester profilometer can utilize an easy interface to allow for changes of in/mm (µin/µm), cutoff length, sampling length, parameters, level of test(stylus position), digital filters and more! Measurement results are displayed as large characters on the LCD screen for easy recognition.

Battery powered portability allows the SRG-4500 surface roughness testers profilometers to mobilize productivity throughout the shop.

- 15 Different roughness parameters
- Inside/Outside Diameters
- Stylus position indicator
- Output to optional printer/PC
- Extended memory functions

Web: www.cdiweb.com/phase2 Toll-Free: 1-800-777-7334 Phone: 303-357-2730 Email: Steven.Rushing@cdiweb.com



Precision Measuring Tools From CDI

www.cdiweb.com/phase2

1-800-777-7334

SRG-4500 comes supplied with:

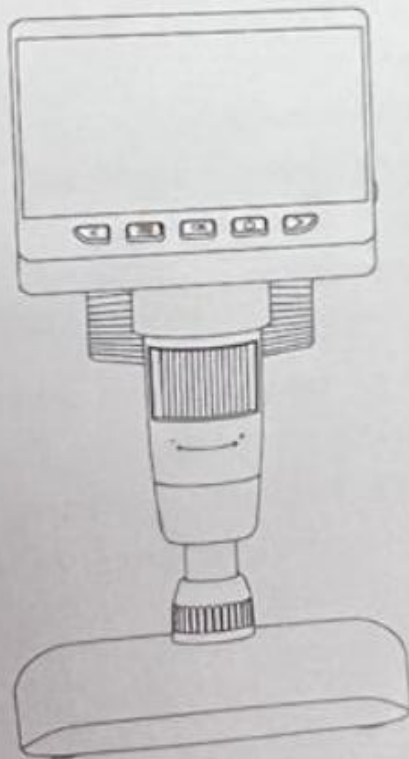
- Base Instrument with 5µm Stylus
- Leveling Plates
- Calibrated Reference Standard
- A/C Adapter
- Rugged Carry case
- Operation Manual
- Certificate of Calibration

Technical Specifications:

- Measures flat, Inside, Outside Diameters and sloping surfaces
- Measures grooves and recessions: wider than 0.16in (4mm)
- Surface Roughness parameters: Ra, Rz, Ry, Rq, Rt, Rp, Rs, Rv, Rsm, Rmax, Rm, R3z, Rsk, Rpc, Rmr.
- Surface Roughness standards: ISO/DIN/JIS/ANSI
- Display resolutions: 0.01µm/+/-20 µm
0.02µm/+/-40 µm
0.04µm/+/-80 µm
- Measuring accuracy: $\leq \pm 10\%$
- Repeatability: Less than or equal to 6%
- Measuring range:
Ra, Rq: 0.01-40µm
Rz, Ry, Rp, Rt, R3z, Rm: 0.02-160µm
Sm, S: 2-4000µm
Rsk: 0-100%
- Maximum drive range: 0.7in(17.5mm)
- Cut-off length: 0.009/0.03/0.09inch (0.25/0.8/2.5mm)
- Tracing speeds:
speed 1mm/s (sampling length 2.5mm)
speed 0.5mm/s (sampling length 0.8mm),
speed 0.135mm/s (sampling length 0.25mm)
- Sensor: Inductance type
- Sensor-stylus: Diamond, radius 5µm
- Pick up Force: <4mN
- Filter: RC, PC-RC, GAUSSIAN, D-P
- Data output: Yes
- Operating temperature: 41°F-104°F (5°-40°C)
- Weight: 0.97lb(440g)
- Dimensions: (119 x 47 x 65mm)
- Power: Li-Ion rechargeable battery
- Auto shut-off

Optional accessories available for the SRG-4500 surface roughness testers profilometers include:

- Stylus Extension Rod
- Support Stand
- Deep Slot Stylus
- Small Bore Stylus
- Curved Surface Stylus

ANEXO C**ELECTRON MICROSCOPE**

User Manual

307-B

TECHNICAL PARAMETERS:

Screen parameters	4.3" IPS
Pixels	2 megapixels
Image resolution	1920*1080P
Video resolution	1920*1080P
Magnification	50-1000X
Focus mode	Manual focus (0~40mm)
Image format	JPG
Video format	AVI
Frame rate	30 f / s
Light source	8*LED ((brightness adjustable)
Battery capacity	2000 mA
Operating time	6 hours
Charging time	3hours
Supported systems	Windows vista/7/8/10/11. MacOS X 11.0 or higher
Interface type	USB 2.0

- EN11 -



ANEXO D



Application recommendations for drills

Feed column										
Code-letter	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
Drill Ø mm	0,50	0,004	0,006	0,007	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016	0,019
	1,00	0,006	0,008	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,023	0,025
	2,00	0,020	0,025	0,032	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125
	2,50	0,025	0,032	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160
	3,15	0,032	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,160
	4,00	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,200
	5,00	0,040	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250
	6,30	0,050	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315
	8,00	0,063	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,315
	10,00	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,400
	12,50	0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500
	16,00	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630
	20,00	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,630
	25,00	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800	0,800
	31,50	0,160	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800	1,000
	40,00	0,200	0,250	0,315	0,400	0,500	0,630	0,800	1,000	1,250

Tools with feed column no. in bold are preferred choices for listed material group.

- R** right-hand cutting
(catalogue no. without symbol is always right-hand cutting)
- L** left-hand cutting

Lubricants:

- cutting oil, highly activated ■
soluble oil (emulsion) ■
without lubricant □
air only □

Material group	Materials examples, new designations (old designation in brackets) Figures in bold = material no. to DIN EN	Tensile strength MPa (N/mm ²)	Hardness	Coolant
General purpose steels	1.0035 S185(S133), 1.0486 P275N(S1E285), 1.0345 P235GH(H1), 1.0425 P265GH(H2) 1.0050 E295 (S150-2), 1.0070 E360 (S170-2), 1.8937 P500NH (W51E500)	≤500 >500-850	■ ■	□ □
Free-cutting steels	1.0718 11SMnPb30 (95SMnPb28), 1.0736 11SMn37 (95SMn36) 1.0727 46S20 (45S20), 1.0728 (60S20), 1.0757 46SPb20 (45SPb20)	≤850 850-1000	■ ■	□ □
Unalloyed tempering steels	1.0402 C22, 1.1178 C30E (Ck30) 1.0503 C45, 1.1191 C45E (Ck45) 1.0601 C60, 1.1221 C60E (Ck60)	≤ 700 700-850 850-1000	■ ■ ■	□ □ □
Alloyed tempering steels	1.5131 50MnSi4, 1.7003 38Cr2, 1.7030 28Cr4 1.5710 36NiCr6, 1.7035 41Cr4, 1.7225 42CrMo4	850-≤1000 1000-1200	■ ■	□ □
Unalloyed case hardened steels	1.0301 (C10), 1.1121 C10E (Ck10)	≤750	■	□
Alloyed case hardened steels	1.7043 38Cr4 1.5752 15NiCr13 (15NiCr13), 1.7131 16MnCr5, 1.7264 20CrMo5	850-≤1000 1000-1200	■ ■	□ □
Nitriding steels	1.8504 34CrAl6 1.8519 31CrMoV9, 1.8550 34CrAlNi7	≥850-≤1000 >1000-1200	■ ■	□ □
Tool steels	1.1750 C75W, 1.2067 102Cr6, 1.2307 29CrMoV9 1.2080 X210Cr12, 1.2083 X42Cr13, 1.2419 105WCr6, 1.2767 X45NiCrMo4	≤850 >850-1000	■ ■	□ □
High speed steels	1.3243 S 6-5-2-5, 1.3343 S 6-5-2, 1.3344 S 6-5-3 1.5026 55Si7, 1.7176 55Cr3, 1.8159 51CrV4 (51CrV4)	≥650-1000	■ ■	□ □
Spring steels			≤330 HB	■
Hardened steels			≤40-48 HRC >48-60 HRC	■ ■
Stainless steels, sulphured	1.4005 X12CrS13, 1.4104 X14CrMoS17, 1.4105 X6CrMoS17, 1.4305 X8CrNiS18-9	≤850	■	□
austenitic	1.4301 X5CrNi18-10 (V2A), 1.4541 X6CrNiTi18-10, 1.4571 X6CrNiMoTi 17-12-2 (V4A)	≤850	■	□
martensitic	1.4057 X20CrNi17.2 (X17CrNi16-2), 1.4122 X39CrMo17-1, 1.4521 X2CrMoTi18-2	≤850	■	□
Cast iron	0.6010 EN-GJL-100(GG10), 0.6020 EN-GJL-200(GG20) 0.6025 EN-GJL-250(GG25), 0.6035 EN-GJL-350(GG35)	850-≤1000 1000-1200	■ ■	□ □
Spheroidal graphite iron and malleable cast iron	0.7050 EN-GJS-500-7(GGG50), 0.8035 EN-GJMW-350-4(GTW35) 0.7070 EN-GJS-700-2(GGG70), 0.8170 EN-GJMB-700-2(GTS70)		≤240 HB ≤300 HB	■ ■
Chilled cast iron			≤350 HB	■
New Cast iron GGV	EN-GJV250 (GGV25), EN-GJV350 (GGV35) EN-GJV400 (GGV40), EN-GJV500 (GGV50), SiMo6		■ ■	□ □
New Cast iron ADI	EN-GJS-800-8 (ADI800), EN-GJS-1000-5 (ADI1000) EN-GJS-1200-2 (ADI1200), EN-GJS-1400-1 (ADI1400)	800-1000 1200-1400	■ ■	□ □
Special alloys	Nimonic, Inconel, Monel, Hastelloy	≤1200	■	□
Ti and Ti-alloys	3.7024 Ti99,5, 3.7114 TiAl6Sn2,5, 3.7124 TiCu2 3.7154 TiAl6Zr5, 3.7165 TiAl6V4, 3.7184 TiAl4Mo4Sn2,5, = TiAl8Mo1V1	≤850 >850-1200	■ ■	□ □
Aluminium and Al-alloys	3.0255 Al99,5, 3.2315 AlMgSi1, 3.3515 AlMg1	≤400	■	□
Al wrought alloys	3.0615 AlMgSiPb, 3.1325 AlCuMg1, 3.3245 AlMg3Si, 3.4365 AlZnMgCu1,5	≤450	■	□
Al cast alloys ≤ 10 % Si	3.2131 G-AlSi5Cu1, 3.2153 G-AlSi7Cu3, 3.2573 G-AlSi9	≤600	■	□
> 10 % Si	3.2581 G-AlSi12, 3.2583 G-AlSi12Cu, = G-AlSi12CuNiMg	≤600	■	□
Magnesium alloys	3.5200 MgMn2, 3.5612.05 G-MgAl8Zn1, 3.5612.05 G-MgAl6Zn1	≤450	■	□
Copper, low alloyed	2.0070 SE-Cu, 2.1020 CuSn6, 2.1096 G-CuSn5Zn2Pb	≤400	■	□
Brass, short-chipping	2.0380 CuZn39Pb2, 2.0401 CuZn39Pb3, 2.0410 CuZn43Pb2	≤600	■	□
long-chipping	2.0250 CuZn20, 2.0280 CuZn33, 2.0332 CuZn37Pb0,5	≤600	■	□
Bronze, short-chipping	2.1090 CuSn7Zn2Pb, 2.1170 CuPb5Sn5, 2.1176 CuPb10Sn	≤600	■	□
long-chipping	2.0790 CuNi18Zn19Pb	>600-850	■	□
Bronze, long-chipping	2.0916 CuAl5, 2.0960 CuAl9Mn, 2.1050 CuAl10	≤850	■	□
	2.0980 CuAl11Ni, 2.1247 CuBe2	>850-1000	■	□
Duroplastics	Epoxy resin, Resopal, Pertinax, Moltapren		=	□
Thermoplastics	Flaxiglas, Hostalen, Novodur, Makalon		=	□
Kevlar			=	□
Glass/carbon-concentr. plastics	GFK/CFK		=	□



$\leq 3 \times D$ drilling depth

Catalog no.	71108	71110	71114
	71109 [L]	71111 [L]	71113 [L]
Tool material	HSS	HSS	HSS
Surface finish	bright/st.	bright	bright
DIN/Form	1897	1897	Stock
Type	N	N	V72
Page	194/196	190/192	209/210

61118
HSS
TiN
1897
N
197

71112	71168	71169	71303 71304	71106
HSS-Co	HSS-Co	HSS-Co	HSS-Co8	M42
bright/st.	bright	bright	bright	bright
1897	Stock	Stock	Stock	1897
VX	V72	V72	N	N
206	262	263	296/297	199



v m/min	Feed column no.		
27	F	F	F
22	E	E	E
30	F	F	F
30	E	E	E
25	E	E	E
25	E	E	E
30	F	F	F
16	D	D	
30	F	F	F
30	F	F	F
25	F	F	F
20	F	F	F
70			G
70			G
50	G	G	G
50	F	F	F
70	F	F	F
60	E	E	E
40	E	E	E
30	D	D	D
25	D	D	D
15	D	D	D
18	D	D	D
28	E	E	E

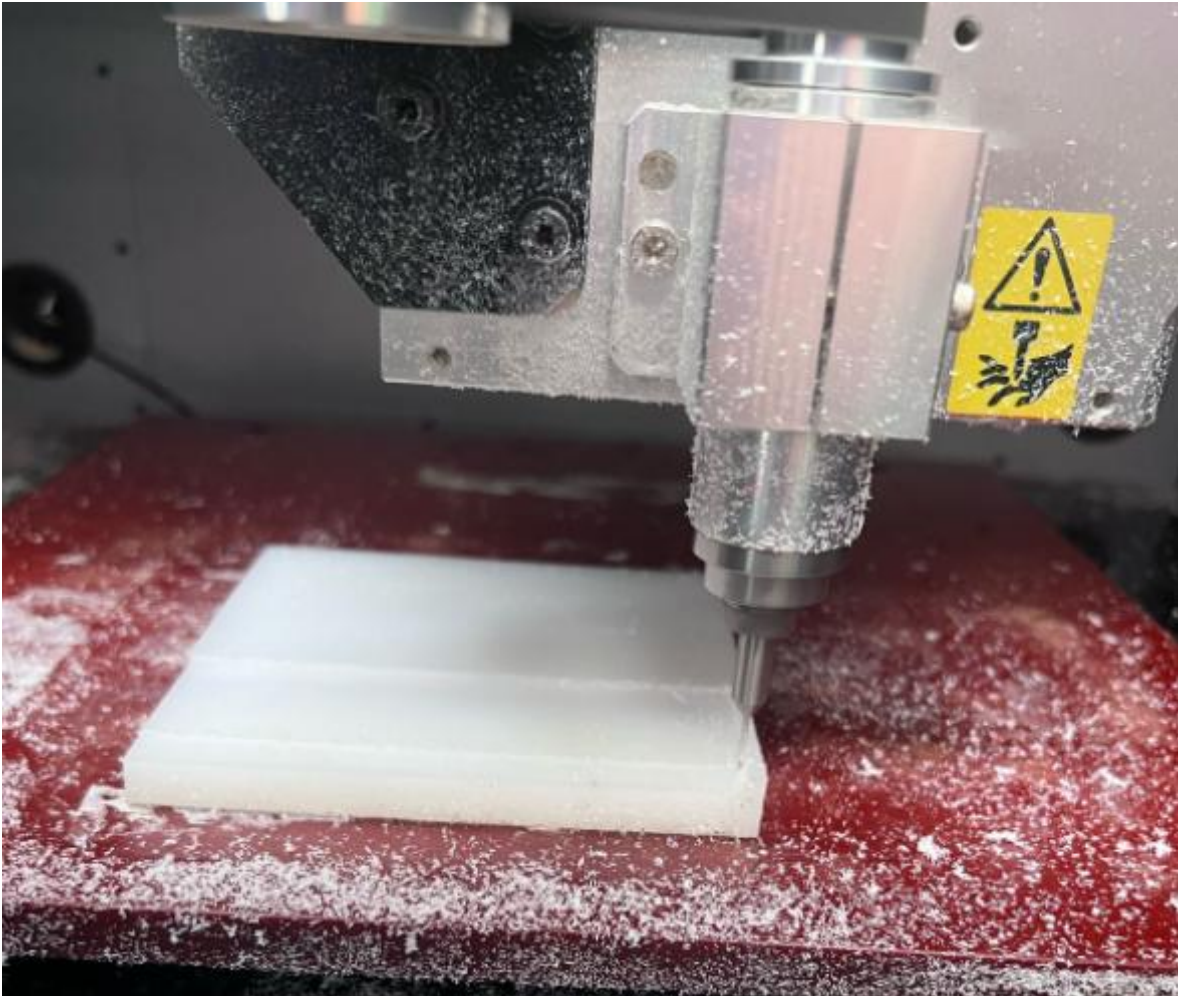


v m/min	Feed column no.
30	F
24	E
33	F
33	E
28	E
28	E
25	D
22	D
33	F
20	D
14	D
18	D
33	F
33	F
28	F
22	F
80	F
65	E
75	E
45	E
33	D
27	D
16	D
15	D
22	D
36	E

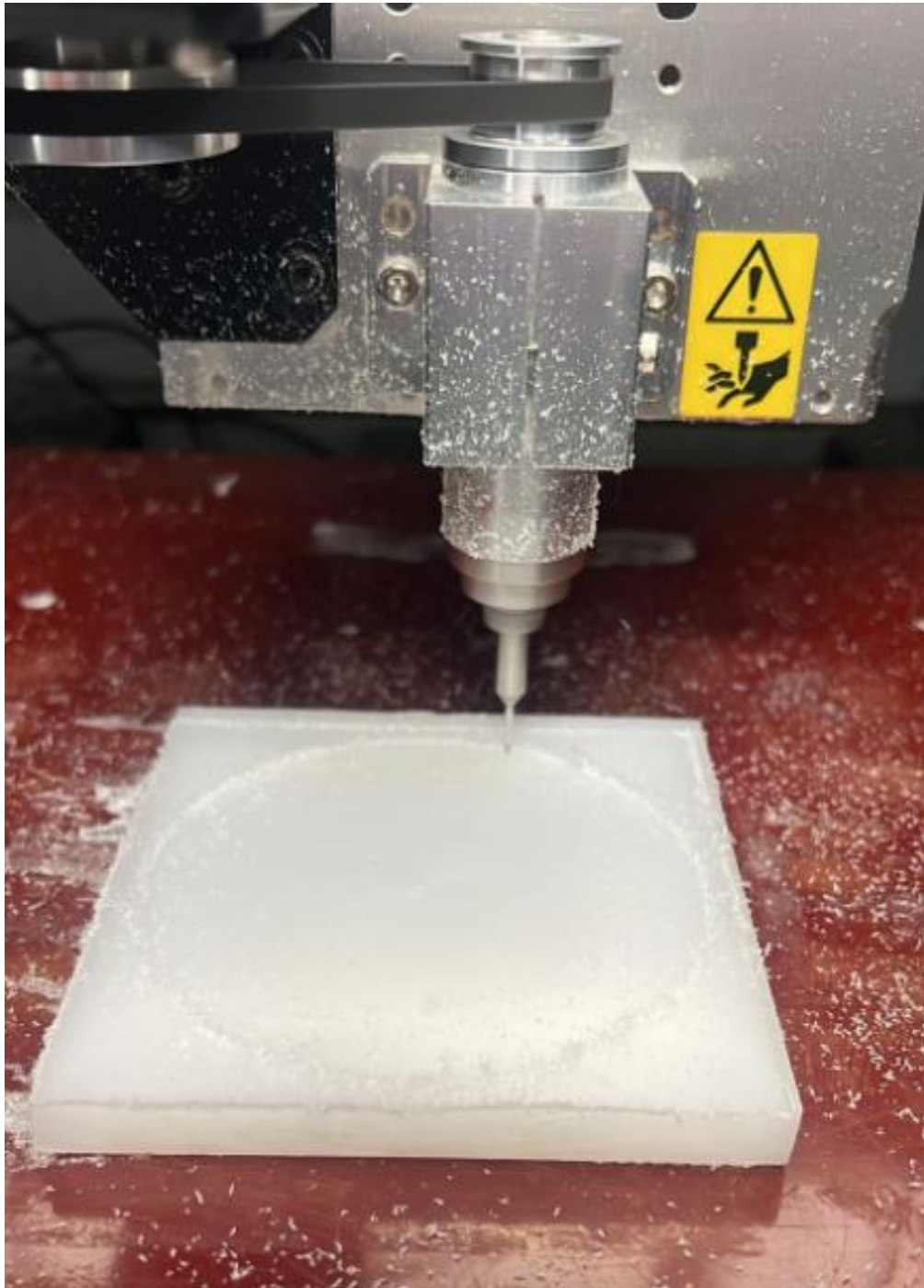


v m/min	Feed column no.			
35	E			E
30	E			E
40	E			E
40	E	E	E	E
40	E			E
40	E			E
35	D	D	D	D
20	D	D	D	D
16	C	C	C	C
36	F			F
20	D	D	D	C
15	C	C	C	C
16	D	D	D	C
12	C	C	C	C
15	D	D	D	C
12	C	C	C	C
15	C	C	C	C
8	B	B	B	B
4	A			A
18	D	D	D	C
14	C	C	C	C
16	C	C	C	C
35	F			E
30	F			E
30	F			E
25	F			E
10	C		C	C
8	A	A	A	A
10	B			B
6	B			B
90				G
90				G
80				G
70				F
70				F
40				E
60				E
40				E
35	D			D
30	D			D
20	D			D
15	D			D
20	D	D	D	
30				D

ANEXO E



MECANIZADO CON ESTRATEGIA EN RAMPA LINEAL



MECANIZADO CON ESTRATEGIA EN RAMPA HELICOIDAL