



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR  
COMPUTADOR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE MAGISTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR  
COMPUTADOR.**

**TEMA: OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MECANIZADO DE  
ALTA VELOCIDAD (HSM) EN LA MANUFACTURA DE SUPERFICIES  
3D EN ALEACIÓN DE ALUMINIO PRODAX.**

**AUTOR: VACA MICHILENA, EDUARDO XAVIER**

**DIRECTOR: ING. CULQUI CULQUI, BORYS HERNÁN MSC.**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE  
TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADO**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, **“OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD (HSM) EN LA MANUFACTURA DE SUPERFICIES 3D EN ALEACIÓN DE ALUMINIO PRODAX.”** Fue realizado por el señor **VACA MICHILENA EDUARDO XAVIER**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de mayo del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Borys Culqui". Debajo de la firma hay una línea horizontal punteada.

ING. BORYS CULQUI MSc.

C.C. 1710436427



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE  
TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADO**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **VACA MICHILENA EDUARDO XAVIER**, con cédula de identidad N° 1721078424, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD (HSM) EN LA MANUFACTURA DE SUPERFICIES 3D EN ALEACIÓN DE ALUMINIO PRODAX.”** Es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece ser la del Sr. Vaca Michilena Eduardo Xavier, sobre una línea de puntos.

Sangolquí, 23 de mayo del 2018

**VACA MICHILENA EDUARDO XAVIER**

C.C. 1721078424



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE  
TECNOLOGÍA**

**CENTRO DE POSGRADO**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **VACA MICHILENA EDUARDO XAVIER**, con C.C. 1721078424 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD (HSM) EN LA MANUFACTURA DE SUPERFICIES 3D EN ALEACIÓN DE ALUMINIO PRODAX.”** En el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 23 de mayo del 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Eduardo Xavier Vaca Michilena', escrita sobre una línea horizontal punteada.

VACA MICHILENA EDUARDO XAVIER

C.C. 1721078424



## DEDICATORIA

A Dios, que me ha permitido vivir momentos felices en cada etapa de mi vida entre ellos el estudiar y compartir conocimientos con las personas que ha puesto a mi lado.

A mis padres, que con su paciencia y enseñanza han estado a lado mío para apoyarme en cada momento y sobre todo en la parte académica.

A mi hijo, que ha llegado a este mundo para ser la dicha y la razón para salir adelante en mi vida.

A mi compañera y madre de mi hijo que con su optimismo y seguridad me ha dado tranquilidad en momentos difíciles.

A mi hermano que siempre ha estado a lado mío para apoyarme cuando lo he necesitado.

EDUARDO XAVIER VACA MICHILENA



## AGRADECIMIENTO

Agradezco al Rector de la UPS, Rvdo. Padre Xavier Herrán por el apoyo económico y facilidades para poder realizar los estudios de postgrado y de investigación.

También agradezco a mi tutor de tesis Ing. Borys Culqui por compartir conmigo sus conocimientos en el área de manufactura y poder desarrollar el presente proyecto de investigación.

A mi familia que siempre estuvo apoyándome y con su paciencia aportando tranquilidad y confianza para lograr mis metas.

EDUARDO XAVIER VACA MICHILENA

## ÍNDICE DE CONTENIDO

### CARÁTULA

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1 ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Desarrollo del problema.....	1
1.3 Formulación del problema a resolver .....	1
1.4 Hipótesis o interrogante .....	2
1.5 Antecedentes .....	2
1.6 Justificación .....	4
1.7 Objetivos.....	5
1.7.1 Objetivo general .....	5
1.7.2 Objetivos específicos.....	5
1.8 Alcance .....	6
2 MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Mecanizado en aleaciones de aluminio.....	7
2.1.1 Aleaciones maleables o de forja.....	7

2.1.2	Factores en el mecanizado de las aleaciones maleables.....	9
2.2	Parámetros de corte en el fresado .....	14
2.2.1	Velocidad de corte [ $V_c$ ] .....	15
2.2.2	Avance por diente [ $f_z$ ].....	15
2.2.3	Velocidad de avance [ $V_f$ ].....	16
2.2.4	Profundidad de pasada axial [ $ap$ ] y radial [ $ae$ ].....	16
2.2.5	Velocidad de remoción del material [MRR].....	17
2.2.6	Diámetro efectivo [ $Def$ ].....	17
2.3	Mecanizado de alta velocidad.....	19
2.4	Mecanizado de alto rendimiento.....	22
2.5	El CAM en el mecanizado de alto rendimiento .....	23
2.5.1	Programación CAM .....	24
2.6	Estrategias de mecanizado .....	29
2.6.1	Estrategias de desbaste .....	29
2.6.2	Estrategias de acabado .....	30
2.7	Calidad del producto mecanizado.....	33
2.7.1	Rugosidad.....	34
2.7.2	Precisión .....	38
3	DESARROLLO CAD – CAM.....	39
3.1	Máquina .....	39
3.2	Equipo de medición .....	40
3.3	Herramientas .....	41
3.4	Selección de parámetros de corte.....	44
3.4.1	Herramienta de desbaste.....	44
3.4.2	Herramienta de acabado .....	45
3.5	Selección de estrategias de mecanizado .....	46
3.6	Metodología del experimento .....	48



3.6.1	Modelo CAD .....	48
3.6.2	Detalle del experimento .....	49
3.7	Programación CAM .....	51
3.8	Resultados de la medición de rugosidad superficial .....	53
CAPÍTULO IV .....		56
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	56
4.1	Rugosidad por pendiente de cada estrategia .....	56
4.2	Comparación de estrategias .....	60
4.3	Rugosidad promedio por estrategias .....	61
4.4	Rugosidad promedio por pendientes .....	62
4.5	Rugosidad promedio por estrategia en pendientes .....	63
4.6	Análisis de rugosidad por velocidad de corte efectiva .....	64
4.6.1	Estrategias con trayectoria en ascenso .....	64
4.6.2	Estrategias con trayectoria en descenso .....	65
4.7	Rugosidad promedio Ra, Rq, Rz, Rth .....	66
4.8	Análisis superficial .....	67
4.9	Desgaste de la herramienta .....	70
4.10	Tiempos de mecanizado .....	73
4.11	Condiciones de corte óptimas en el mecanizado .....	73
4.11.1	Pendiente óptima .....	74
4.11.2	Velocidad de corte efectiva óptima .....	75
4.11.3	Trayectoria óptima .....	76
4.11.4	Estrategia óptima .....	77
4.12	Velocidad de corte crítica .....	78
4.13	Resultados del análisis .....	80
CAPÍTULO V .....		82

5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	82
5.1	Conclusiones .....	82
5.2	Recomendaciones .....	83
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Familias de aleaciones maleables.</i> .....	7
Tabla 2	<i>Propiedades de la aleación 7075T6.</i> .....	8
Tabla 3	<i>Áreas de aplicación del Prodax.</i> .....	9
Tabla 4	<i>Resultados de varias herramientas en fresado en seco tras 143 metros mecanizados.</i> ....	14
Tabla 5	<i>Datos técnicos de la Maquina.</i> .....	39
Tabla 6	<i>Especificaciones del rugosímetro.</i> .....	40
Tabla 7	<i>Especificaciones de la herramienta de acabado.</i> .....	41
Tabla 8	<i>Referencias técnicas del catálogo IzarTool.</i> .....	42
Tabla 9	<i>Especificaciones de la herramienta de desbaste.</i> .....	43
Tabla 10	<i>Referencias técnicas del catálogo ToolMex.</i> .....	43
Tabla 11	<i>Parámetros de corte sugeridos por el catálogo ToolMex.</i> .....	44
Tabla 12	<i>Parámetros de corte para el desbaste.</i> .....	45
Tabla 13	<i>Parámetros de corte sugeridos por el catálogo IzarTool.</i> .....	45
Tabla 14	<i>Parámetros de corte para el acabado.</i> .....	46
Tabla 15	<i>Estrategias de acabado para el ensayo.</i> .....	47
Tabla 16	<i>Detalle de experimentos.</i> .....	50
Tabla 17	<i>Datos y resultados del experimento.</i> .....	55

Tabla 18 <i>Rugosidad superficial promedio</i> .....	67
Tabla 19 <i>Parámetros de la herramienta de acabado</i> .....	71
Tabla 20 <i>Resultados para una estrategia óptima</i> .....	78
Tabla 21 <i>Rugosidad Ra promedio en cada velocidad de corte</i> .....	79
Tabla 22 <i>Resultados óptimos de cada estrategia</i> .....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Esquema de la herramienta de corte con BUE y BUL.....	10
<i>Figura 2.</i> Esquema del corte con herramienta esférica.....	16
<i>Figura 3.</i> Relación de la pendiente y profundidad axial para el diámetro efectivo con a) trayectoria en ascenso, b) trayectoria en descenso.....	18
<i>Figura 4.</i> Relación entre Diámetro efectivo y pendiente.....	19
<i>Figura 5.</i> Curvas de Salomon.....	20
<i>Figura 6.</i> Fuerzas de corte a diferentes velocidades de corte en aleaciones de Al.....	21
<i>Figura 7.</i> Concentración de polvo en función de la velocidad de corte en aceros y aleación de Al.....	22
<i>Figura 8.</i> Medición de la rugosidad Ra en diversas zonas mecanizadas.....	23
<i>Figura 9.</i> Trayectoria generada por el CAM.....	24
<i>Figura 10.</i> Compensación de la punta de la herramienta a partir del punto de contacto.....	25
<i>Figura 11.</i> Relación entre Velocidad de corte y pendiente con trayectoria en ascenso.....	27
<i>Figura 12.</i> Relación entre velocidad de corte y pendiente con trayectoria en descenso.....	27
<i>Figura 13.</i> a) Estrategia contorno en descenso (z constante). b) Estrategia radial en ascenso y descenso (z no constante).....	28

<i>Figura 14.</i> Estrategia Adaptive Clearing. ....	29
<i>Figura 15.</i> Estrategia Pocket. ....	30
<i>Figura 16.</i> Estrategia Contour. ....	31
<i>Figura 17.</i> Estrategia Parallel. ....	31
<i>Figura 18.</i> Estrategia Scallop. ....	32
<i>Figura 19.</i> Estrategia Spiral. ....	33
<i>Figura 20.</i> Estrategia Radial. ....	33
<i>Figura 21.</i> Altura de la cresta en el caso de fresado en z constante. ....	34
<i>Figura 22.</i> Altura de la cúspide en el caso de fresado en z no constante. ....	35
<i>Figura 23.</i> Valor de rugosidad media Ra. ....	36
<i>Figura 24.</i> Altura media de rugosidad Rz. ....	37
<i>Figura 25.</i> Precisión dimensional en un ejemplo de aplicación. ....	38
<i>Figura 26.</i> Centro de Mecanizado Concept Mill 260. ....	40
<i>Figura 27.</i> Rugosímetro SJ210. ....	41
<i>Figura 28.</i> Fresa de acabado. ....	42
<i>Figura 29.</i> Fresa de desbaste. ....	43
<i>Figura 30.</i> Modelo CAD de la probeta para el experimento. ....	48
<i>Figura 31.</i> Estrategias a) Contorno en ascenso CA, b) Contorno de descenso CD, c) Paralelo en ascenso PA, d) Paralelo en descenso PD. ....	49
<i>Figura 32.</i> Configuración herramienta de acabado. ....	51
<i>Figura 33.</i> Configuraciones de avance y velocidad. ....	52
<i>Figura 34.</i> Configuración de estrategia. ....	52
<i>Figura 35.</i> Simulación de la estrategia de paralelo en ascenso. ....	53

<i>Figura 36.</i> Procesamiento posterior Códigos G.....	53
<i>Figura 37.</i> Medición de la rugosidad.....	54
<i>Figura 38.</i> Rugosidad Ra vs Pendiente con estrategia contorno en ascenso. ....	56
<i>Figura 39.</i> Rugosidad Ra vs Pendiente con estrategia contorno en descenso. ....	57
<i>Figura 40.</i> Rugosidad Ra vs Pendiente con estrategia paralelo en ascenso.....	58
<i>Figura 41.</i> Rugosidad Ra vs Pendiente con estrategia paralelo en descenso.....	59
<i>Figura 42.</i> Comparación de la rugosidad Ra obtenida con las diferentes estrategias.....	60
<i>Figura 43.</i> Rugosidad Ra promedio vs Estrategia. ....	61
<i>Figura 44.</i> Rugosidad Ra promedio vs Pendiente.....	62
<i>Figura 45.</i> Efectos de las estrategias con la rugosidad superficial en pendientes de 35° a 87, 5°.....	63
<i>Figura 46.</i> Rugosidad Ra vs velocidad de corte efectiva en pendientes con trayectoria en ascenso.....	64
<i>Figura 47.</i> Rugosidad Ra vs velocidad de corte efectiva en pendientes con trayectoria en descenso.....	65
<i>Figura 48.</i> Captura ampliada a 5X de superficies con pendiente 87,5° mecanizadas con: a) Contorno en ascenso CA b) Contorno en descenso CD c) Paralelo en ascenso PA d) Paralelo en descenso PD.....	68
<i>Figura 49.</i> Perfil de medición en una superficie muestra de 87,5° con velocidad de corte efectiva de 440 m/min mecanizada con: a) CA , b) PA. ....	69
<i>Figura 50.</i> Perfil de medición en una superficie muestra de 87,5° con velocidad de corte de 422 m/min mecanizada con: a) CD, b) PD.....	70
<i>Figura 51.</i> Desgaste de la herramienta de acabado tras 420 metros mecanizados. ....	71

<i>Figura 52.</i> Captura ampliada 20 X del desgaste tipo BUE a) deposición de aluminio en el filo	
b) filo sin mecanizar.....	72
<i>Figura 53.</i> Captura ampliada 10X a) adherencia de aluminio en la punta	
b) punta sin mecanizar.....	72
<i>Figura 54.</i> Tiempos de mecanizado vs estrategia y trayectoria.....	73
<i>Figura 55.</i> Pendiente óptima.....	74
<i>Figura 56.</i> Velocidad de corte efectiva óptima con trayectoria en ascenso.....	75
<i>Figura 57.</i> Velocidad de corte efectiva óptima con trayectoria en descenso.....	76
<i>Figura 58.</i> Óptima trayectoria.....	76
<i>Figura 59.</i> Estrategia óptima.....	77
<i>Figura 60.</i> Rugosidad Ra vs Velocidad de corte efectiva.....	80
<i>Figura 61.</i> Rango de velocidad de corte óptimo para cada estrategia. ....	81

## RESUMEN

El mecanizado de alta velocidad (HSM, *High Speed Machining*), es una de las tecnologías modernas que, en comparación con el corte convencional, permite aumentar la eficiencia, la precisión y la calidad de las piezas, al mismo tiempo, reducir los costos y el tiempo de mecanizado. El éxito del mecanizado depende de seleccionar una estrategia óptima, la misma depende de tres factores como: herramientas, parámetros de corte y trayectorias en los sistemas CAM. La dirección de la trayectoria es un aspecto fundamental, ya que dos trayectorias con las mismas condiciones de corte, pero con diferente dirección pueden dar resultados diferentes. En el presente proyecto de investigación, se ha seleccionado cuatro tipos de estrategias que combinan trayectoria y dirección de mecanizado para operaciones de acabado en superficies 3D de aleación de aluminio Prodx 7075 T6. En los ensayos se varía la velocidad de corte y se mantiene constante los parámetros de velocidad de avance, profundidad de corte, paso y velocidad del husillo, conforme al recomendado por el fabricante de la fresa. La velocidad de corte varía a lo largo del filo de la herramienta esférica. Se realizó un diseño CAD con ocho pendientes, de 35° a 87, 5° en intervalos de 7, 5°. Se utilizó una metodología experimental, donde se combinó todas las variables, por lo tanto, las ocho superficies fueron mecanizadas en seco y evaluadas por cada estrategia. Se realizó un análisis de resultados y se encontraron estrategias óptimas de mecanizado a alta velocidad, en condiciones que permitan obtener una mejor rugosidad superficial.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ESTRATEGIAS DE MECANIZADO.**
- **MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD (HSM).**
- **MECANIZADO EN SECO.**

## ABSTRACT

High Speed Machining (HSM) is a new manufacturing technology. HSM increases efficiency, accuracy and quality of the product. Furthermore, it reduces costs and manufacturing time process. The quality of the machining depends on the selected strategy. The strategy is base in three factors: tools, cutting parameters and trajectory of the CAM systems. The direction of the tool path is a fundamental aspect in the machining. Two different tool paths with the same cutting conditions but different direction can obtain different results. This research project establishes four different strategies of machining that combine trajectory and direction for finishing operation on 3D surfaces. The workpiece material used in the project was aluminum alloy Produx 7075 T6. The aim of the project analyzes the surface quality of the product in each strategy. The process has fixed four parameters: feed speed, depth of cut, width of cut and spindle speed according to the tool manufacturer. A ball nose end mills was use in the process. The cutting speed varies along the edge of the spherical tool. The CAD design has eight steps between  $35^{\circ}$  to  $87,5^{\circ}$  in gaps of  $7,5^{\circ}$ . The experimental methodology was applied. Eight different type of machined dry surfaces were analyzed. The research gets the optimal machining strategies at high speed in order to improve the roughness.

### KEYWORDS:

- **STRATEGIES OF MACHINING**
- **HIGH SPEED MACHINING (HSM)**
- **SURFACE ROUGHNESS**
- **DRY MACHINING**



## CAPÍTULO I

### 1 ASPECTOS GENERALES

#### 1.1 Planteamiento del problema

Las diversas estrategias de mecanizado y trayectorias de corte que un software CAM posee, permite planificar los procesos y ciclos de fresado sin embargo no permite evaluar la calidad superficial del producto resultante ni comparar cual es la estrategia con mayor rendimiento para operaciones de desbaste y acabado de superficies 3D en el aluminio Prodax.

#### 1.2 Desarrollo del problema

El mecanizado en seco en piezas con superficies 3D en un material que tiene aplicación para moldes de inyección como en aleaciones de aluminio Prodax, presenta irregularidades de acabado superficial dependiendo de la estrategia utilizada. Esto alarga el tiempo de pulido y entrega del producto, aumentando considerablemente los costos de producción. El acabado superficial y tiempo de mecanizado son variables que pueden ser maximizadas o minimizadas para la fabricación de un producto. Los diseñadores tienen una gran responsabilidad al seleccionar una estrategia de mecanizado óptima que tenga una mayor eficiencia y ofrezca utilidad a la empresa.

#### 1.3 Formulación del problema a resolver

Los parámetros de corte que los fabricantes recomiendan, son valores que permiten que la herramienta no sufra desgaste excesivo y a la vez suministren buena calidad superficial, pero la trayectoria que realiza la herramienta es un aspecto que los fabricantes dejan a libre elección y esta

condición influye mucho en la rugosidad superficial, ya que dos trayectorias con las mismas condiciones de corte, pero con diferente dirección pueden dar resultados completamente diferentes.

#### **1.4 Hipótesis o interrogante**

De acuerdo a la aplicación con superficies 3D en aleación de aluminio Prodax, encontrar la mejor estrategia de mecanizado y trayectoria de la herramienta en operaciones de acabado para un mecanizado eficiente de alto rendimiento que permita aumentar la calidad superficial de la pieza resultante. De esta manera presentar una propuesta de información técnica que pueda incrementar la eficiencia en la elaboración de procesos de mecanizado en el material, con valores de rugosidad, tiempos de mecanizado y trayectorias realizadas en el experimento.

#### **1.5 Antecedentes**

El desarrollo de investigaciones y experimentos en operaciones de mecanizado en aleaciones de aluminio 7075 T6 o Prodax cuyo principal elemento de aleación es el zinc, tiene un gran interés debido al aumento en el uso del material por sus características y cualidades en aplicaciones de ingeniería. En algunos artículos concernientes con el mecanizado, realizan ensayos con variaciones en los parámetros de corte como velocidad, avance y profundidad de corte y mencionan algunos criterios como el tipo de desgaste que sufren las herramientas, las fuerzas de corte producidas, el acabado superficial, entre otros. El factor más influyente en el mecanizado es la velocidad de corte y manifiestan varias ventajas al incrementar dicho factor.

La primera definición de altas velocidades de corte HSM fue propuesta por el Dr. Ing. Carl Salomon en 1931, su argumento se basaba en que la temperatura de corte alcanzaba un pico a una

velocidad de corte determinada. Sin embargo si se seguía aumentando esta velocidad, la temperatura disminuía. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

Según (V. Songmene, 2011), determina que las fuerzas de corte en el maquinado disminuyen con el aumento de la velocidad de corte, por lo tanto el consumo de energía es menor y se mejoran los tiempos de mecanizado.

Otro estudio indica que el mecanizado en aleaciones de aluminio produce partículas metálicas de diferente tamaño que pueden ser perjudiciales para el operador de la máquina. Las enfermedades causadas por la exposición al polvo van desde la simple irritación respiratoria hasta la bronquitis, el asma y el cáncer.

En un artículo de (V. Songmene, 2011), muestra la concentración de masa de polvo durante el mecanizado en donde se determina que el factor más influyente es la velocidad de corte. A altas velocidades de corte la concentración de masa de polvo es menor.

El mecanizado a alta velocidad no sólo es bueno para mejorar la reducción de las fuerzas de corte y el consumo de energía, sino también proteger el medio ambiente y la salud de los trabajadores. (V. Songmene, 2011)

En el caso de mecanizado en seco en aleaciones de aluminio, el mayor problema encontrado es el filo recrecido (BUE, built up edge) en bajas velocidades de corte y capa adherida (BUL, built up layer) a altas velocidades de corte (HSM, *High Speed Machining*). (Jomaa, 2014)

Las formaciones BUE-BUL en la superficie de la herramienta de carburo a velocidades de corte de 200 y 300 m / min resultan ser mayores que las de 400 y 500 m / min. La formación máxima de BUE-BUL se observa a una velocidad de corte de 200 m / min. (Gokkaya, 2008)

En (Jomaa, 2014), reporta que la velocidad de corte tiene un efecto dominante en la rugosidad superficial, y que esta disminuye cuando la velocidad de corte aumenta.

El desarrollo en materiales de herramientas permite la aplicación de paradigmas de HSM y al mismo tiempo aumenta las posibilidades y el alcance de las aplicaciones de mecanizado de precisión. Los revestimientos duros son indispensables y ampliamente utilizados para aumentar la vida útil y la productividad de las herramientas y, por lo tanto, reducir los costos de fabricación. (Kopac, 2003)

Los revestimientos CrN, TiAlN y CVD-diamond se han utilizado predominantemente desde los años 90. Los recubrimientos duros son un requisito previo para HSM y el mecanizado en seco. (Kopac, 2003)

En relación a lo mencionado, en este proyecto se desea apreciar el comportamiento de la rugosidad superficial en superficies 3D mecanizadas con altas velocidades de corte, con cuatro diferentes estrategias de mecanizado y determinar las condiciones óptimas para obtener una mejor calidad superficial en el aluminio 7075 T6 Prodax.

## **1.6 Justificación**

El proyecto tiene el propósito de determinar estrategias óptimas de mecanizado en aleación de aluminio PRODAX, que es un material ampliamente utilizado en moldes de inyección de plástico, matrices, estructuras y superficies 3D con aplicaciones en el sector aeronáutico. La optimización en el uso de estrategias de trayectorias de la herramienta en el mecanizado de alta velocidad brinda una mejora en el proceso de manufactura de alto rendimiento en cuanto a la calidad de productos con mayor precisión dimensional, menor rugosidad y una productividad que

mejore sustancialmente los tiempos de material removido a diferencia del mecanizado convencional.

La alta velocidad de corte también es una propuesta para la manufactura sostenible, siendo técnicamente eficaz, económicamente viable y ambientalmente correcto.

## **1.7 Objetivos**

### **1.7.1 Objetivo general**

Optimizar estrategias de mecanizado CAM de alta velocidad HSM en la manufactura de superficies 3D en aleación de aluminio PRODAX y proporcionar datos técnicos a la industria metalmecánica.

### **1.7.2 Objetivos específicos**

- Analizar las estrategias de mecanizado para superficies 3D en aleaciones de aluminio y definir las variables a optimizar.
- Escoger una aplicación con superficies 3D y realizar el diseño CAD.
- Generar diferentes estrategias para las operaciones de desbaste y acabado.
- Mecanizar la aplicación según las estrategias elegidas.
- Medir el acabado superficial y las dimensiones críticas de la aplicación.
- Evaluación de resultados y propuesta de una estrategia de mecanizado.

## 1.8 Alcance

El proyecto de optimización de estrategias de mecanizado a alta velocidad en superficies 3D en aleación de aluminio 7075 T6 (PRODAX) se desarrollará utilizando un centro de mecanizado CNC marca EMCO, control HMI OPERATE MILL SINUMERIK, de tres ejes con un área de trabajo de 350 mm en X, 250 mm en Y, 300 mm en Z, con velocidad máxima del husillo de 10 000 RPM y un torque de 23/34 N.m al 100/40 % respectivamente.

Los softwares CAD y CAM serán utilizados para realizar el diseño y la programación de las aplicaciones 3D a mecanizar, con estrategias y trayectorias a altas velocidades de corte.

Para el mecanizado, los parámetros de corte, velocidad, avance y profundidad, se seleccionarán según los recomendados por el fabricante de las herramientas de metal duro con tecnología HSC (High Speed Cutting).

Las mediciones a realizar son, la rugosidad Ra en diversas superficies mecanizadas, utilizando un rugosímetro marca Mitutoyo modelo SJ-210. Para el análisis en superficies maquinadas, se realizará capturas con aumentos de hasta 100 veces utilizando un microscopio invertido VIEWMET BUEHLER.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Mecanizado en aleaciones de aluminio.

##### 2.1.1 Aleaciones maleables o de forja.

Se denominan aleaciones maleables si se obtienen mediante un proceso de laminación, es además un material que podría ser forjado si fuera necesario.

Las aleaciones de aluminio de este grupo se designan mediante un sistema numérico de cuatro dígitos. El primero de ellos indica el grupo de aleación, determinado por la presencia de un componente principal que se indica en la **tabla 1**. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

**Tabla 1**

*Familias de aleaciones maleables.*

Aluminio $\geq$	99%	1XX.X
Aleaciones según el principal elemento de aleación:		
Cobre		2XX.X
Silicio, con adiciones de cobre y/o magnesio		3XX.X
Silicio		4XX.X
Magnesio		5XX.X
Estaño		6XX.X
Zinc		7XX.X
Otros elementos		8.XX.X
Series inusuales		9XX.X

**Fuente:** (López de Lacalle Marcaide, 2004)

##### 2.1.1.1 Aleación de aluminio 7075

Denominado PRODAX por la mayoría de fabricantes, es un material cuyo principal elemento de aleación de aluminio es el Zinc, las características principales que este compuesto

aporta a la aleación es aumentar la dureza, resistencia y mejora la estabilización de tensiones internas.

El material también tiene un tratamiento térmico denominado T6, el cual es solubilizado y después envejecido, con lo que aumenta su resistencia mecánica, la información de la aleación de aluminio 7075 T6 se detalla en la **tabla 2**.

**Tabla 2**

*Propiedades de la aleación 7075T6.*

Aluminum 7075-T6; 7075-T651		
<b>Categories:</b>	Metal; Nonferrous Metal; Aluminum Alloy; 7000 Series Aluminum	
<b>Physical Properties</b>	<b>Metric</b>	<b>Comments</b>
Density	<u>2.81 g/cc</u>	AA; Typical
<b>Mechanical Properties</b>		
Hardness, Brinell	150	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Tensile Strength, Ultimate	<u>572 MPa</u>	AA; Typical
Tensile Strength, Yield	<u>503 MPa</u>	AA; Typical
Elongation at Break	11%	Temperature 24C
Modulus of Elasticity	<u>71.7 GPa</u>	AA; Typical; Average of tension and compression.
Poissons Ratio	0.33	
<i>Machinability</i>	<b>70%</b>	0-100 Scale of Aluminum Alloys
<b>Component Elements</b>		
Aluminum, Al	87.1 - 91.4 %	As remainder
Chromium, Cr	0.18 - 0.28 %	
Copper, Cu	1.2 - 2.0 %	
Iron, Fe	<= 0.50 %	
Magnesium, Mg	2.1 - 2.9 %	
Manganese, Mn	<= 0.30 %	
Other, total	<= 0.15 %	
Silicon, Si	<= 0.40 %	
Titanium, Ti	<= 0.20 %	
Zinc, Zn	5.1 - 6.1 %	

**Fuente:** (Bohman, 2016)



### 2.1.1.2 Aplicación del Produx.

Es un material ideal para prototipos y para el moldeo de series cortas o medianas que estén expuestas a presiones altas o plásticos abrasivos ver detalle en **tabla 3**

La considerable reducción en los tiempos de preparación de un molde, el menor costo de herramental y ciclos más cortos, significan valiosos ahorros tanto para el fabricante del molde, como para el usuario final. (Bohman, 2016)

**Tabla 3**

*Áreas de aplicación del Produx.*

Áreas de aplicación	Prototipos	Series cortas	Series medianas	Series largas
Moldes de soplado	x	x	x	x
Formado al vacío	x	x	x	x
Moldeado de espuma	x	x	x	x
Moldes	x	x	x	x
Moldes de inyección de termoplásticos	x	x	x	
Moldeo de goma	x	x		

Fuente: (Bohman, 2016)

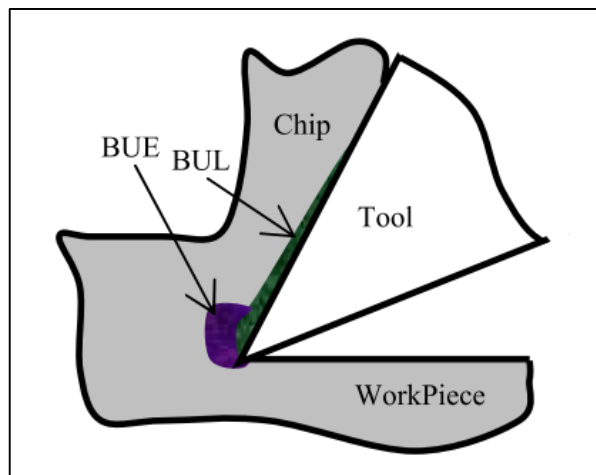
### 2.1.2 Factores en el mecanizado de las aleaciones maleables.

Según (López de Lacalle Marcaide, 2004), menciona cinco factores principales para el mecanizado en aleaciones maleables en condiciones de desgaste de la herramienta, los cuales son:

- Adhesión del aluminio a la herramienta
- Calentamiento de la pieza
- Herramientas
- Técnica MQL
- Mecanizado en seco

### 2.1.2.1 Adhesión del aluminio a la herramienta.

Éste es un fenómeno usual en el mecanizado de aluminio cuando se elimina o reduce la aportación de lubricante. En estas condiciones se activan los mecanismos de difusión y adhesión que conducen a dos tipos de problemas, la aparición del filo recrecido (BUE, Built Up Edge) y/o la capa recrecida (BUL, Built Up Layer) como se muestra en la **figura 1** (López de Lacalle Marcaide, 2004)



**Figura 1.** Esquema de la herramienta de corte con BUE y BUL.

**Fuente:** (Gokkaya, 2008)

Según (López de Lacalle Marcaide, 2004) menciona que el desgaste tipo BUE, se observa en mecanizado a baja velocidad siendo poco importante si se tiene en cuenta que el objetivo actual es aumentar las velocidades al máximo. El segundo fenómeno BUL se produce a altas velocidades de corte.

### 2.1.2.2 Calentamiento de la pieza

Otro problema más inusual es la posibilidad de cambios metalúrgicos en el material de la pieza, si la herramienta está mucho tiempo parada rozando en un punto. Esto puede ocurrir si el

programa de control numérico incluye una parada innecesaria, o si en una zona concreta el utillaje cede ante las fuerzas de corte. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

Para evitar el cambio metalúrgico en el material se debe simular la programación CAM y comprobar que la estrategia no adquiera parámetros innecesarios en el mecanizado.

### **2.1.2.3 Herramientas**

En cuanto a herramientas de corte, la solución para mecanizar aleaciones de aluminio de tipo maleable son: (López de Lacalle Marcaide, 2004)

- Acero rápido, la opción más barata, con bastante buen rendimiento.
- Metal duro sin recubrir, una solución de mayor costo, pero con un mayor rendimiento que el caso anterior.
- Metal duro recubierto de TiAlN, pero el recubrimiento puede ser innecesario si se mecaniza con refrigerante.

Las herramientas de metal duro son conocidas como carburos. Entre los dos grupos principales de carburos son el *carburo de tungsteno* y el *carburo de titanio*, estas pueden ser recubiertas con el fin de mejorar su rendimiento. (S Kalpakjian S R, 2016)

#### **2.1.2.3.1 Carburo recubierto**

Los recubrimientos tienen propiedades ventajosas como las siguientes:

- Menos fricción.
- Mayor resistencia al desgaste y a las fracturas.

- Mayor dureza en caliente y resistencia al impacto.
- Actúan como una barrera para la difusión entre la herramienta y las virutas.

Las herramientas recubiertas pueden durar 10 veces más que las no recubiertas, esto permite mayores velocidades de corte y reducción tanto del tiempo de maquinado como de los costos de producción. (S Kalpakjian S R, 2016)

Los materiales comunes usados para los recubrimientos son, carburo de titanio (TiC), nitruro de titanio (TiN), óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), Nitruro de titanio y aluminio (TiAlN). Estos recubrimientos, cuyo espesor está en el rango de 2 a 15  $\mu m$  se aplican en herramientas de corte e insertos por medio de dos técnicas principales, Deposición química por vapor CVD o, Deposición física por vapor (PVD). (S Kalpakjian S R, 2016)

#### **2.1.2.4 Técnica mínima cantidad de lubricante (mql, minimum quantity of lubricant)**

El sistema MQL, funciona con aire a presión, inyectando la mezcla de aire y aceite pulverizado en la zona de corte. Su finalidad es minimizar el consumo de refrigerante en el mecanizado. El interés por reducir los consumos de refrigerante se refleja en algunas referencias, donde se indica que el coste de la adquisición, sistema de filtrado y eliminación de los refrigerantes tras su uso puede llegar a ser el 10% de los costes de producción. A esto se añade que los refrigerantes pueden provocar un elevado impacto ambiental. Por ambas razones se está tendiendo a mecanizar en seco, y si no es posible, a utilizar técnicas de mínimo consumo de refrigerante. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

Cuando se trabaja a alta velocidad, la refrigeración convencional no actúa adecuadamente debido a la fuerza centrífuga originada por el giro de la herramienta, incluso aunque se viertan grandes caudales, el refrigerante nunca llega al núcleo. (López de Lacalle Marcaide, 2004)


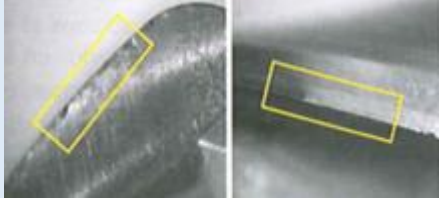

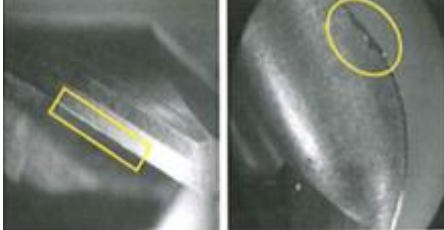


#### **2.1.2.5 Mecanizado en seco**

El MQL minimiza el consumo de aceite o lubricante pero no impide que la viruta quede impregnada del fluido. Las grandes cantidades de viruta se venden para su reciclado, y su precio depende de la cantidad de lubricante que haya quedado atrapado en su masa. Si es menor del 2% aproximadamente su precio es cero, si supera esta cantidad hay que pagar para que se lleven la viruta siendo por tanto otro costo a añadir al ciclo de vida del refrigerante. Si es viruta seca es máximo su valor. Pero la eliminación total del lubricante puede conducir a fenómenos de adhesión y capa adherida tipo BUL en la herramienta. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

En la Universidad del País Vasco, se han desarrollado ensayos de fresado en seco en aleaciones de aluminio y evidencian que las herramientas de carburo recubiertas dan buenos resultados, en la **tabla 4** se representa el rendimiento de varias herramientas tras un volumen de 5,72 dm<sup>3</sup> de material removido.

**Tabla 4**

*Resultados de varias herramientas en fresado en seco tras 143 metros mecanizados.*

<b>Descripción Herramienta</b>	<b>Imagen</b>	<b>Filo tras 143 m mecanizados</b>	<b>Observaciones</b>
Metal duro sin recubrimiento (de KENDU™) CW: 90% Co: 10%			Alguna deposición de aluminio en el filo
Metal duro con recubrimiento TiAlN (de KENDU™) CW: 90% Co: 10%			Desgaste del flanco muy pequeño
Metal duro con recubrimiento XCEED PLUS (de KENDU™) CW: 90% Co: 10%			Desgaste inapreciable

**Fuente:** (López de Lacalle Marcaide, 2004)

Tras la investigación mencionada en (López de Lacalle Marcaide, 2004), se tomará para este proyecto las recomendaciones en cuanto a la herramienta a utilizar que será de carburo con revestimiento de TiAlN para el mecanizado en aleación de aluminio Prodax en seco y a altas velocidades.

## 2.2 Parámetros de corte en el fresado

En operaciones de fresado los principales parámetros de corte son los siguientes:

- Velocidad de corte  $\left[\frac{m}{min}\right]$

- Avance por diente [ $\frac{mm}{z}$ ]
- Velocidad de avance [ $\frac{mm}{min}$ ]
- Profundidad de pasada axial y radial [ $mm$ ]
- Velocidad de remoción del material [ $\frac{mm^3}{min}$ ]
- Diámetro efectivo [ $mm$ ]

### 2.2.1 Velocidad de corte [ $V_c$ ]

Se define como la velocidad periférica tangencial de los filos de corte de la fresa. El valor se suele dar en m/min. Depende directamente del diámetro de la fresa y de la velocidad del husillo de la máquina. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad [1] \text{ (Kendu., 2014)}$$

Donde:

$N$ : Indica las revoluciones del cabezal en, denotado también como  $S$  [rpm].

$D$ : Representa el diámetro nominal de la fresa en [mm].

$V_c$ : Es el valor de la velocidad de corte [ $\frac{m}{min}$ ].

### 2.2.2 Avance por diente [ $f_z$ ]

Se denomina avance por diente a la distancia que recorre un diente al entrar en contacto con el material. Este valor de avance es recomendado por el fabricante de la herramienta en [ $\frac{mm}{z}$ ].

### 2.2.3 Velocidad de avance [ $V_f$ ]

La velocidad de avance lineal de una fresa se puede calcular como:

$$V_f = fz \cdot z \cdot N \quad [2] \text{ (Kendu., 2014)}$$

Donde:

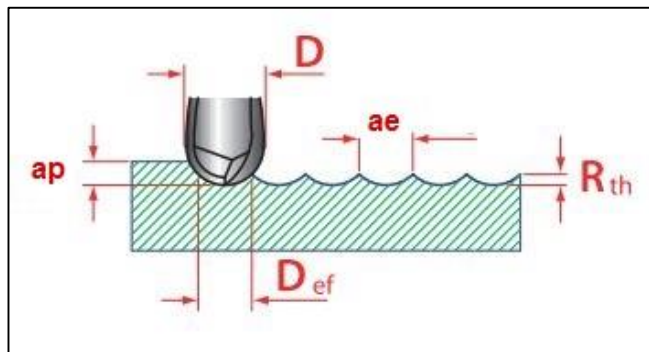
$V_f$ : Velocidad de avance,  $[\frac{mm}{min}]$ .

$fz$ : Avance por diente  $[\frac{mm}{z}]$ .

$z$ : Número de dientes.

### 2.2.4 Profundidad de pasada axial [ $a_p$ ] y radial [ $a_e$ ].

La penetración axial y radial que la herramienta realiza se denomina  $a_p$  y  $a_e$  respectivamente. Se mide en mm y se representa en la **figura 2**.



**Figura 2.** Esquema del corte con herramienta esférica.

**Fuente:** (Kendu., 2014)

Los fabricantes de las herramientas establecen parámetros de corte óptimos para operaciones de desbaste y acabado, sin embargo para obtener una rugosidad definida en una superficie plana se establece la expresión de penetración radial  $a_e$  como:

$$a_e = 2\sqrt{R_{th}(D - R_{th})} \quad [3] \text{ (Kendu., 2014)}$$



Donde:

$a_e$ : Profundidad radial o Paso [mm]

$R_{th}$ : Altura de la cresta, rugosidad máxima [mm]

### 2.2.5 Velocidad de remoción del material [MRR]

La velocidad de remoción del material se mide como el cociente del material arrancado en una operación entre el tiempo total que ha tardado dicha operación. Este parámetro permite la evaluación de la productividad. Así, el caudal de viruta medio se define como: (López de Lacalle Marcaide, 2004)

$$MRR = \frac{Vol_{viruta}}{T_{total}} = a_p \cdot a_e \cdot V_f \quad [4] \quad (\text{Kendu., 2014})$$

Donde:

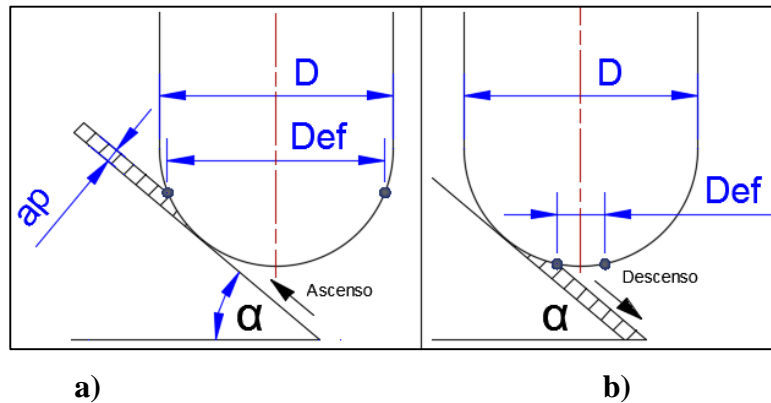
$MRR$ : Velocidad de remoción de material [ $\frac{mm^3}{min}$ ]

$Vol_{viruta}$ : Volumen de viruta [ $mm^3$ ]

$T_{total}$ : Tiempo total de la operación [min]

### 2.2.6 Diámetro efectivo [ $D_{ef}$ ]

Para obtener el diámetro efectivo en superficies con pendiente se debe tomar en cuenta los parámetros que se detallan en la **figura 3**.



**Figura 3.** Relación de la pendiente y profundidad axial para el diámetro efectivo con a) trayectoria en ascenso, b) trayectoria en descenso.

El diámetro efectivo varía a lo largo del filo de la herramienta, este depende del diámetro de la herramienta, la pendiente, la profundidad de pasada axial y la trayectoria de la herramienta.

El diámetro efectivo en ascenso se obtiene con la expresión:

$$D_{efa} = D \cdot \text{sen} \left[ \alpha + \arccos \left( \frac{D - 2ap}{D} \right) \right] \quad [5] \text{ (Wang, 2017)}$$

Donde:

$D_{efa}$ : Diámetro efectivo en ascenso [mm]

$\alpha$ : Pendiente de la superficie [°]

$ap$ : Profundidad de corte axial [mm]

Mientras que para el diámetro efectivo en descenso tiene la expresión:

$$D_{efd} = D \cdot \text{sen} \left[ \alpha - \arccos \left( \frac{D - 2ap}{D} \right) \right] \quad [6] \text{ (Wang, 2017)}$$

Donde:

$D_{efd}$ : Diámetro efectivo en descenso [mm]

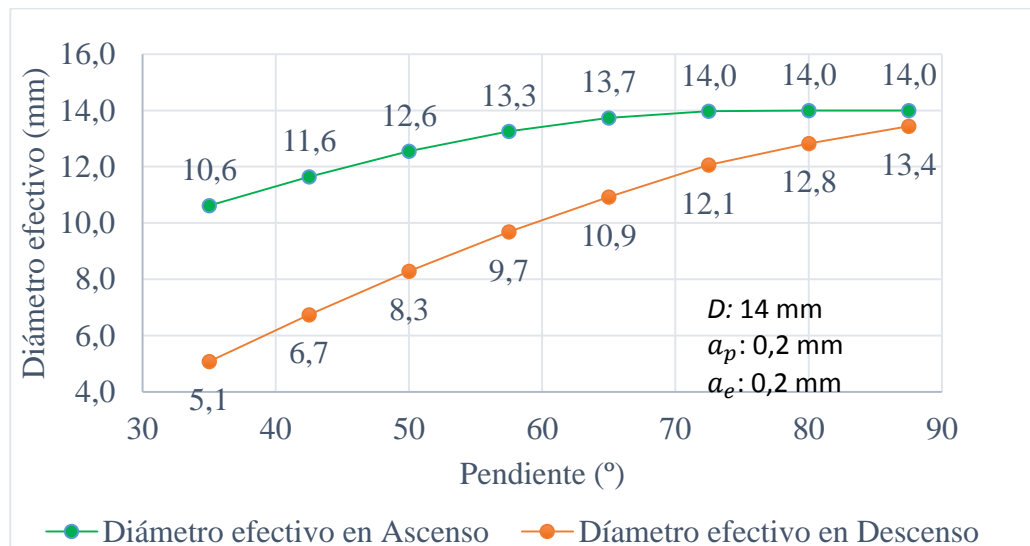
Esto exige a calcular los parámetros de corte en función del diámetro efectivo.

La expresión de velocidad de corte efectiva entonces se define como:

$$V_{Cef} = \frac{\pi \cdot N \cdot D_{ef}}{1000} \quad [7] \text{ (Kendu., 2014)}$$

Entonces si el mecanizado es con trayectoria en ascenso, la velocidad de corte es mayor, mientras que, con trayectoria en descenso, la velocidad de corte será menor.

En la gráfica de la **figura 4** se observa la variación del diámetro efectivo para una fresa de bola de diámetro 14 mm en pendientes de 35° a 87,5°, una profundidad de corte axial  $a_p$  0,2 mm, que es la que se utilizará para el experimento de este proyecto.



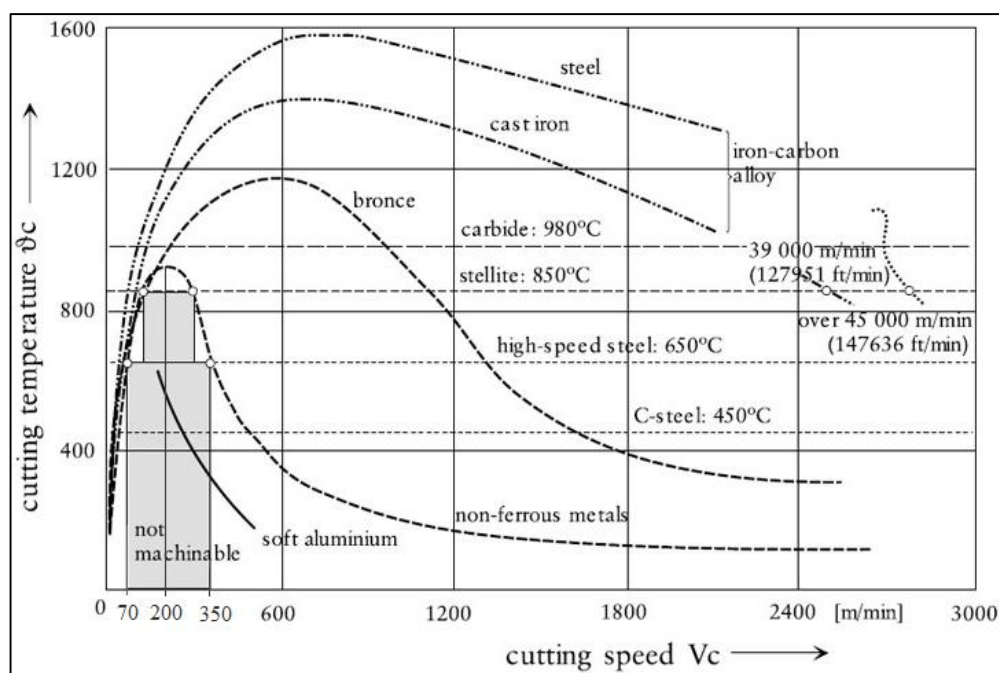
**Figura 4.** Relación entre Diámetro efectivo y pendiente.

### 2.3 Mecanizado de alta velocidad

High Speed Machining (HSM), se denomina así al proceso de mecanizado a alta velocidad o también denominado (HSC) High Speed Cutting.

El (HSM) es una de las tecnologías modernas que, en comparación con el corte convencional, permite aumentar la eficiencia, la precisión y la calidad de las piezas de trabajo, al mismo tiempo, reducir los costos y el tiempo de mecanizado. (Aneiro, 2007)

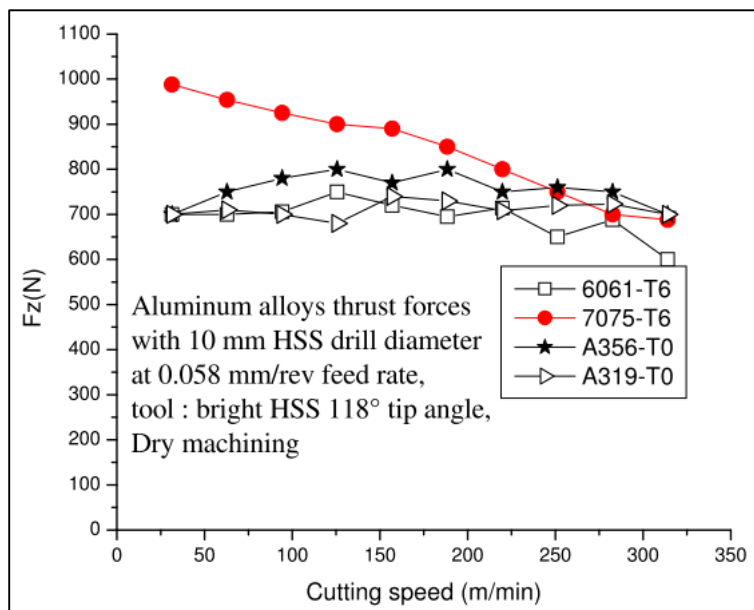
La primera definición del HSM fue propuesta por el Dr. Carl Salomon en 1931, en donde afirmó que la temperatura y desgaste de la herramienta de corte para un material en particular alcanza su punto máximo a una velocidad de corte específica, que denominó velocidad crítica, además, cuando la velocidad de corte se incrementa, la temperatura disminuye, como se ve en la **figura 5**. En materiales no ferrosos como aleaciones de aluminio, se puede apreciar que la velocidad convencional esta entre 70 a 100 m/min, mientras que pasando la velocidad crítica de 200 m/min, empieza el descenso de la temperatura en donde el mecanizado a altas velocidades de corte HSM va desde 300 m/min en adelante.



**Figura 5.** Curvas de Salomon.

**Fuente:** (López de Lacalle Marcaide, 2004)

Se han realizado algunos estudios que permiten evaluar las mejoras del mecanizado a alta velocidad de corte en aleaciones de aluminio. Varios estudios involucran la fuerza de corte aumentando velocidades con el propósito de disminuir el consumo de energía en el proceso, dando buenos resultados en aleaciones de aluminio 7075 T6 como se puede ver en la **figura 6**.



**Figura 6.** Fuerzas de corte a diferentes velocidades de corte en aleaciones de Al.

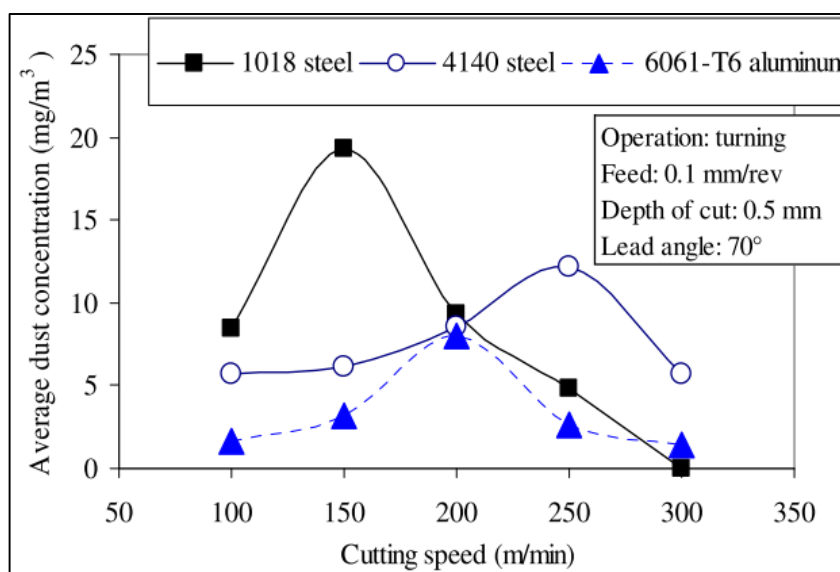
**Fuente:** (V. Songmene, 2011)

Otro estudio indica que el mecanizado en aleaciones de aluminio produce partículas metálicas de diferente tamaño que pueden ser perjudiciales para el operador de la máquina.

Las enfermedades causadas por la exposición al polvo van desde la simple irritación respiratoria hasta la bronquitis, el asma y el cáncer. Las agencias reguladoras de salud y seguridad que supervisan el mecanizado, requieren que más fabricantes reduzcan el polvo generado por los procesos de fabricación. (V. Songmene, 2011)

En un artículo de (V. Songmene, 2011), muestra la concentración de masa de polvo durante el mecanizado en donde se determina que el factor más influyente es la velocidad de corte. Como

se muestra en la gráfica de la **figura 7**, cuando se mecaniza aleaciones de aluminio, en este caso 6061 T6, se aprecia que la emisión de polvo es alta a velocidad de 200 m/min, que coincide con la velocidad crítica en materiales ferrosos de la curva de Salomon.



**Figura 7.** Concentración de polvo en función de la velocidad de corte en aceros y aleación de Al

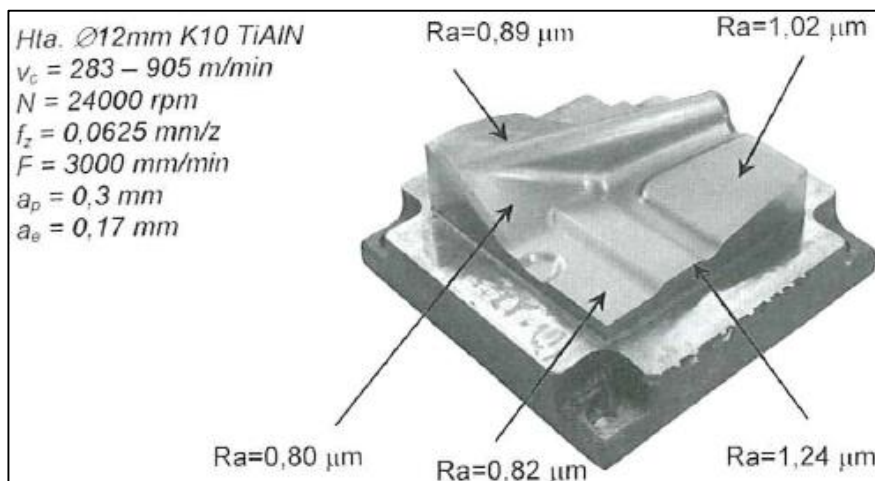
**Fuente:** (V. Songmene, 2011)

Por lo tanto, el mecanizado a alta velocidad no sólo es bueno para mejorar la reducción de las fuerzas de corte y el consumo de energía, sino también proteger el medio ambiente y la salud de los trabajadores. (V. Songmene, 2011)

## 2.4 Mecanizado de alto rendimiento

Hoy día y en nuestro contexto el concepto de mecanizado de alto rendimiento (MAR) es mucho más general refiriéndose a toda tecnología de arranque de viruta que mejore sustancialmente dos aspectos del proceso:

- La productividad, medida como tasa de arranque, es decir, cantidad de material eliminado en la unidad de tiempo. También debe procurarse mecanizar en condiciones que induzcan un desgaste no excesivo de las herramientas.
- La calidad, en cuanto a una mayor precisión dimensional y una menor rugosidad de las superficies. En la **figura 8** se muestra una pieza de ensayo, donde se observa las condiciones del proceso, se destaca la elevada velocidad de corte, llegando a 905 m/min en pendientes de 80°. Tras el mecanizado se mide la rugosidad Ra en diversas zonas de la pieza.



**Figura 8.** Medición de la rugosidad Ra en diversas zonas mecanizadas.

**Fuente:** (López de Lacalle Marcaide, 2004)

## 2.5 El CAM en el mecanizado de alto rendimiento

El éxito del mecanizado de una pieza depende de numerosos factores. Además de disponer de una buena máquina y emplear las herramientas más adecuadas, es necesario disponer de programas de control numérico (CN) que obtengan mejores resultados tanto en calidad como productividad. Estos programas se obtienen mediante sistemas de Manufactura Asistida por Computador (CAM, Computer Aided Manufacturing). (López de Lacalle Marcaide, 2004)

## 2.5.1 Programación CAM

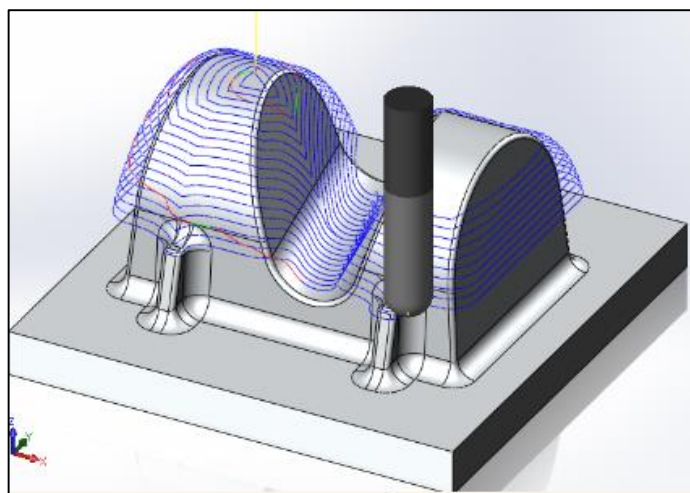
La programación CAM toma en cuenta los siguientes cuatro grupos de datos:

- Geometría de la pieza
- Geometría de la herramienta
- Parámetros de mecanizado (Velocidad de giro, avance y profundidad)
- Tipo de trayectoria

### 2.5.1.1 Geometría de la pieza

El software CAM utiliza la geometría de la pieza como una plantilla para calcular las trayectorias de mecanizado. Por lo que cualquier defecto que pueda tener el diseño de quedará reproducido en el programa CN generado. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

En la **figura 9** se muestra la trayectoria calculada que genera el software CAM utilizando la plantilla del diseño CAD.



**Figura 9.** Trayectoria generada por el CAM.

**Fuente:** (HSM Works, 2018)



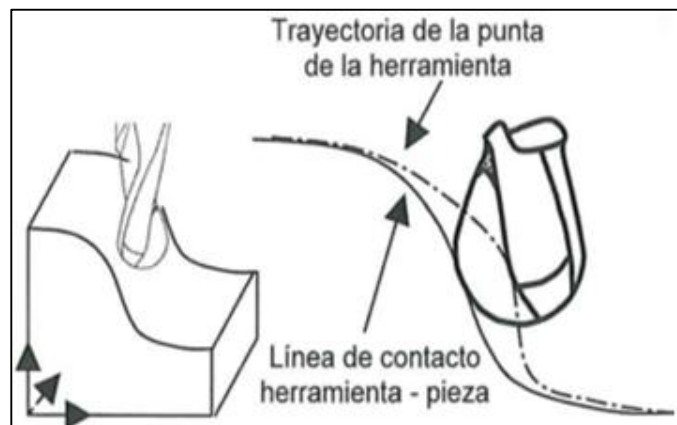
### 2.5.1.2 Geometría de las herramientas

Para el mecanizado de superficies 3D, es muy común utilizar fresas de punta redonda debido al buen acabado superficial y a la adaptación de la forma a la superficie.

Según (López de Lacalle Marcaide, 2004), en las operaciones de acabado de moldes y matrices empleando fresas esféricas la profundidad de pasada oscila entre 0,1 y 0,3 mm.

En el programa de CNC se almacenan las sucesivas posiciones de la punta de la herramienta. Para obtener estos puntos es necesario compensar la geometría de la herramienta respecto del punto de contacto. Así, el CAM calcula el punto de contacto basándose en la geometría CAD y utiliza el dato de la geometría de la herramienta para realizar la compensación. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

En la **figura 10** se puede apreciar la compensación de la geometría de la herramienta en las trayectorias creadas.



**Figura 10.** Compensación de la punta de la herramienta a partir del punto de contacto.

**Fuente:** (López de Lacalle Marcaide, 2004)

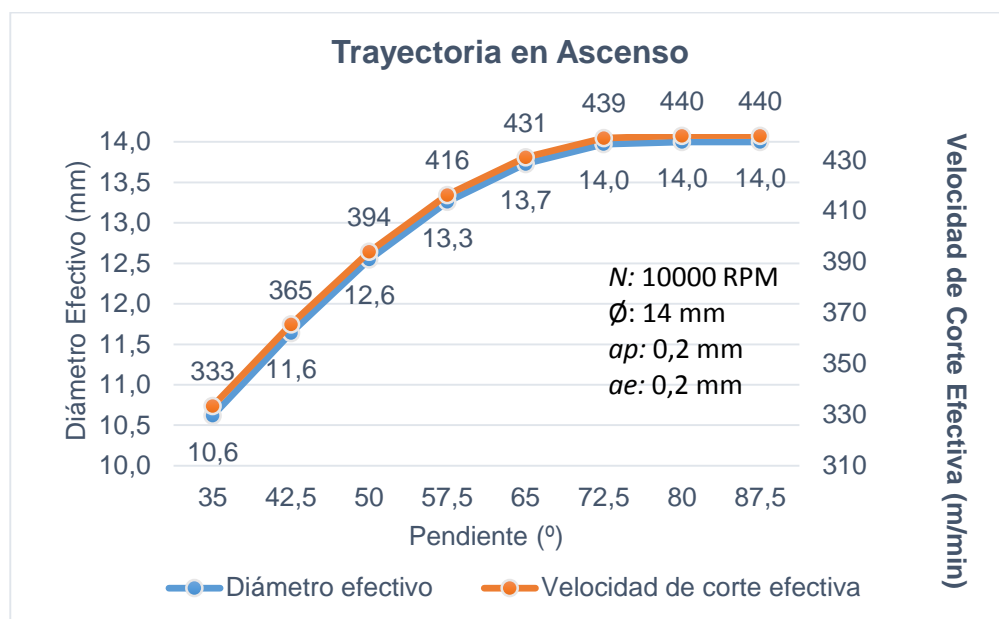
### 2.5.1.3 Parámetros de mecanizado y trayectoria

Como se mencionó en los parámetros de corte, la velocidad de corte varía alrededor del filo de la herramienta esférica en superficies con pendiente, además en la figura 4 se muestra esquemáticamente el punto de contacto del filo de la herramienta sobre el material dependiendo la trayectoria del fresado.

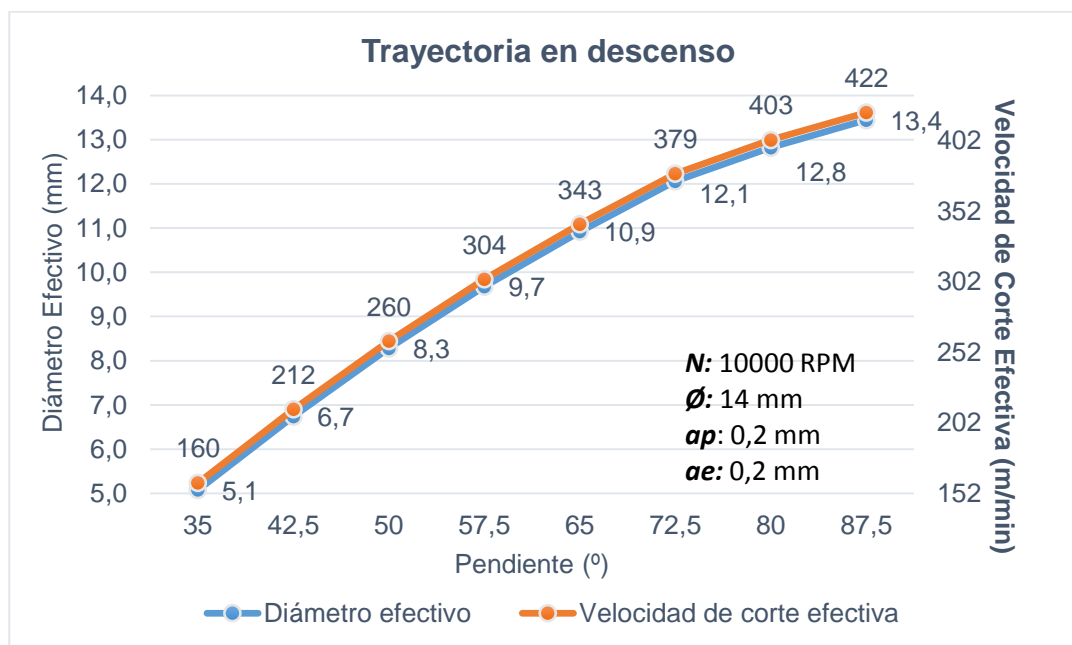
En trayectoria ascendente, el punto de contacto es más alto, donde el diámetro efectivo es mayor y por ello la velocidad de corte efectiva también será mayor.

En trayectoria descendente sucede lo contrario, el diámetro efectivo es el menor y la velocidad de corte también será menor.

En la **figura 11** y **figura 12** se observa la variación del diámetro efectivo y el correspondiente valor de velocidad de corte efectiva en trayectorias de ascenso y descenso respectivamente, para una herramienta de 14 mm de diámetro, giro del husillo N 10000 rpm, velocidad de avance  $V_f 2000 \frac{m}{min}$ , profundidad de corte  $a_p 0,2$  mm y el paso radial  $a_e 0,2$  mm, en superficies con pendientes de 35° a 87,5°.



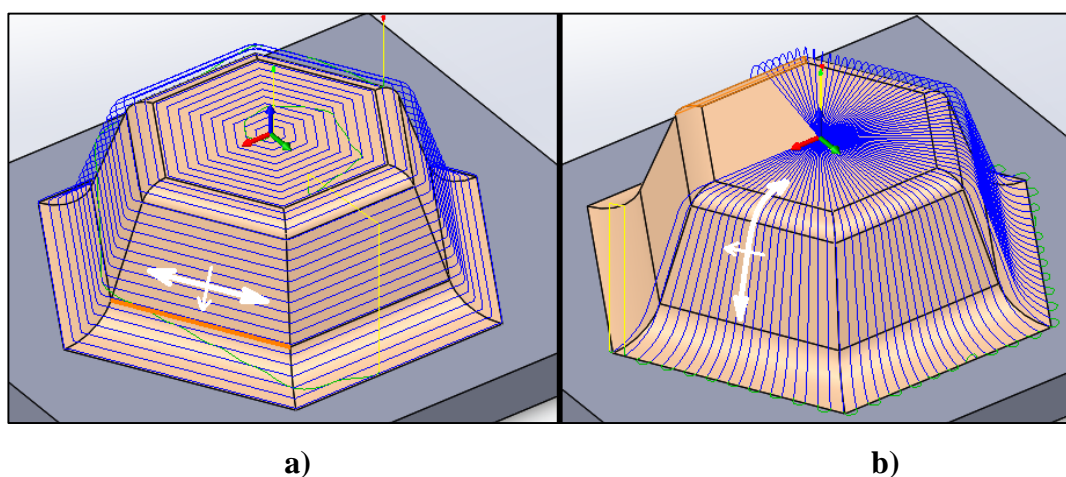
**Figura 11.** Relación entre Velocidad de corte y pendiente con trayectoria en ascenso.



**Figura 12.** Relación entre velocidad de corte y pendiente con trayectoria en descenso.

La dirección de la trayectoria es un aspecto fundamental, ya que dos trayectorias con las mismas condiciones de corte, pero con diferente dirección pueden dar resultados completamente diferentes. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

En la **figura 13**, se muestran dos tipos de estrategias en CAM para mecanizar una superficie 3D. En la parte izquierda una estrategia de contorno con trayectoria en descenso ( $z$  constante) y en la derecha una estrategia radial con trayectoria ascendente y descendente en forma intercalada ( $z$  no constante).



**Figura 13.** a) Estrategia contorno en descenso ( $z$  constante). b) Estrategia radial en ascenso y descenso ( $z$  no constante).

Al criterio que se desea seguir durante el mecanizado de una pieza se denomina comúnmente estrategia de mecanizado. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

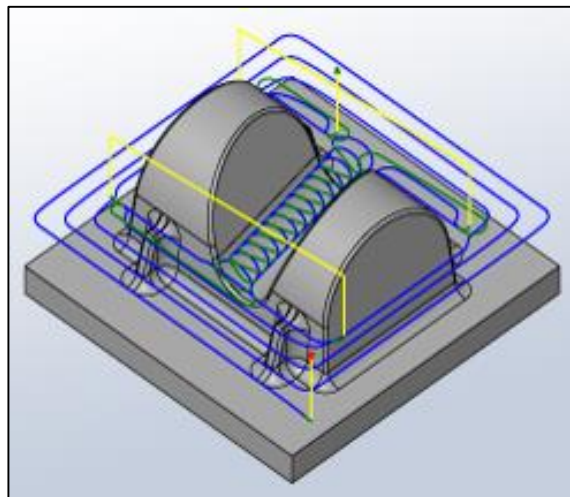
## 2.6 Estrategias de mecanizado

Las estrategias y trayectorias de mecanizado dependen del software CAM que se vaya a utilizar, para este proyecto se detallarán las siguientes estrategias que sirven para el desbaste y acabado de piezas para el maquinado en 3D.

### 2.6.1 Estrategias de desbaste

#### 2.6.1.1 Limpieza adaptativa (*Adaptive clearing*)

La estrategia crea primero una serie de capas Z constantes a través de la pieza y, a continuación, las limpia por fases de abajo arriba. Dado que puede realizar cortes de tanta profundidad, el primer paso descendente de cada fase debe tener la longitud de corte efectiva de la herramienta. A continuación, se realiza la limpieza de las capas intermedias en las partes más superficiales para maximizar la eficiencia de uso de la herramienta, ver **figura 14**. (HSMWorks, 2018)



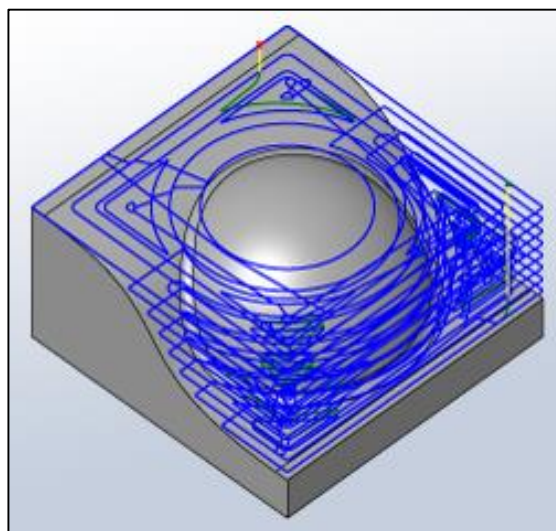
**Figura 14.** Estrategia Adaptive Clearing.

**Fuente:** (HSM Works, 2018)

### 2.6.1.2 Limpieza de cajera (*Pocket*)

Para limpiar grandes cantidades de material de manera eficaz. La pieza se limpia capa por capa con contornos de desfase suave y se mantiene el fresado concurrente durante toda la operación.

Para evitar la penetración brusca, la herramienta desciende por una ruta helicoidal entre niveles. Para mantener una alta velocidad de avance y reducir el tiempo de mecanizado, los cambios de dirección bruscos se evitan mediante el suavizado del movimiento de la herramienta, ver **figura 15**. (HSM Works, 2018)



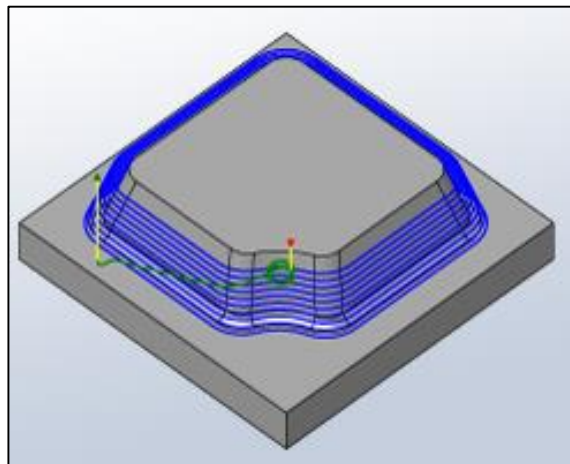
**Figura 15.** Estrategia Pocket.

Fuente: (HSM Works, 2018)

## 2.6.2 Estrategias de acabado

### 2.6.2.1 Contorno (*Contour*)

Si se ha especificado un Angulo de inclinación, por ejemplo, de 30 a 90 grados, se mecanizarán las áreas más empinadas, dejando las áreas superficiales hasta 30 grados para estrategias más adecuadas, ver **figura 16**. (HSM Works, 2018)

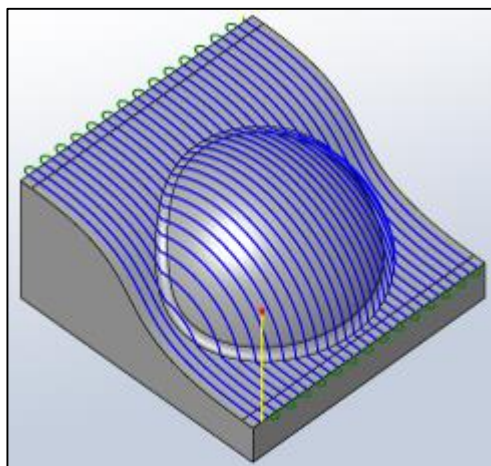


**Figura 16.** Estrategia Contour.

Fuente: (HSM Works, 2018)

### 2.6.2.2 Paralelo (*Parallel*)

Las pasadas son paralelas en el plano XY y siguen la superficie en la dirección Z. se puede elegir el ángulo, así como las sobrepasada en la dirección horizontal. Las pasadas pueden enlazarse en un patrón en zigzag, unidireccional o dividirse en secciones de fresado descendente o ascendente, ver **figura 17**. (HSM Works, 2018)

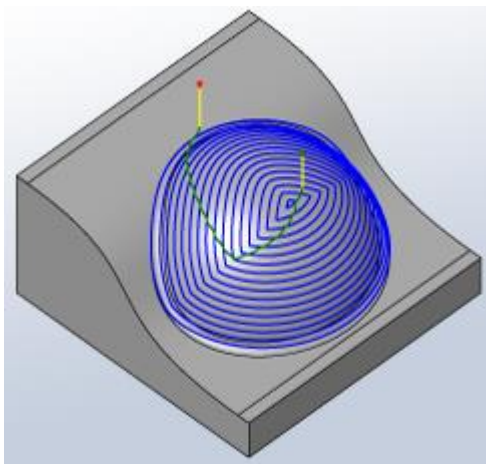


**Figura 17.** Estrategia Parallel.

Fuente: (HSM Works, 2018)

### 2.6.2.3 Festonear (Scallop)

Crea pasadas a una distancia constante de otra mediante el desfase hacia dentro por la superficie. Las pasadas se siguen inclinando y las paredes verticales mantienen la sobrepasada, ver **figura 18**. (HSM Works, 2018)



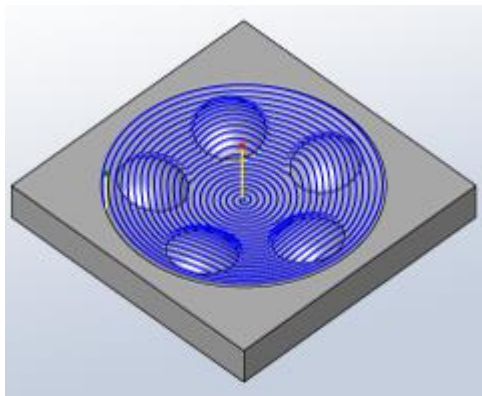
**Figura 18.** Estrategia Scallop.

**Fuente:** (HSM Works, 2018)

### 2.6.2.4 Espiral (Spiral)

Crea una ruta de herramienta de espiral a partir de un centro determinado. Esta operación genera un contacto constante, ya que el mecanizado se realiza en un contorno específico. Resulta adecuada para su uso en piezas redondas superficiales que utilizan ángulos de contacto de herramienta de hasta 40 grados, junto con pasadas de contorno para las caras más verticales, ver **figura 19**. (HSM Works, 2018)



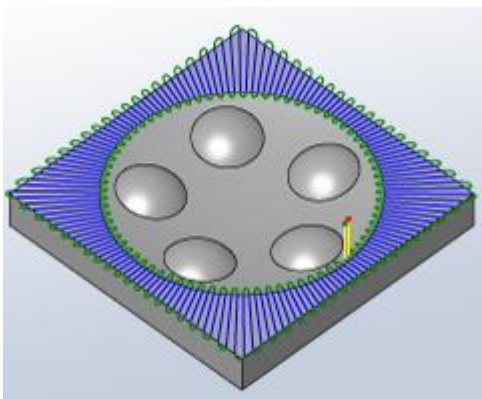


**Figura 19.** Estrategia Espiral.

**Fuente:** (HSM Works, 2018)

#### 2.6.2.5 Radial

Al igual que el mecanizado de espiral, esta operación también se inicia en un punto central, lo que permite mecanizar piezas radiales. También proporciona la opción de detenerse cerca del centro de las pasadas radiales, donde pasan a ser muy densas, ver **figura 20**. (HSM Works, 2018)



**Figura 20.** Estrategia Radial.

**Fuente:** (HSM Works, 2018)

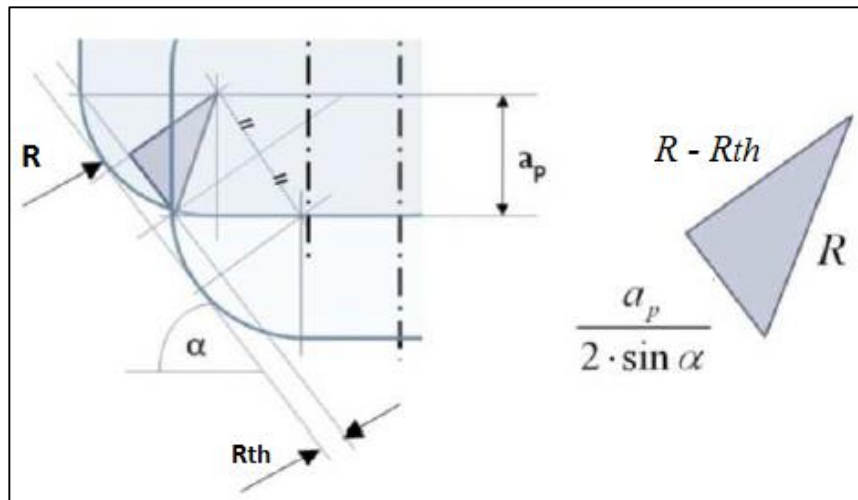
### 2.7 Calidad del producto mecanizado

En operaciones de acabado a alta velocidad dos son los objetivos a alcanzar: La rugosidad y la precisión de forma. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

### 2.7.1 Rugosidad

En mecanizado en superficies 3d, la rugosidad es originada por el paso de la fresa esférica, que produce surcos sobre la misma. Si el corte es transversal existe una relación directa entre la trayectoria de la herramienta y el perfil generado.

Si el fresado es en dirección z constante como en operaciones de contorno, la altura de la cresta  $R_{th}$  es determinada por el radio de la fresa  $R$ , la profundidad de corte axial  $a_p$ , y el ángulo de la pared  $\alpha$ , como se muestra en la **figura 21**.



**Figura 21.** Altura de la cresta en el caso de fresado en z constante.

**Fuente:** (Egyetem, 2014)

Entonces la expresión para la altura de la cresta con fresado en dirección z constante en pendientes es:

$$R_{th} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_p}{2 \cdot \sin \alpha}\right)^2} \quad [8] \text{ (Egyetem, 2014)}$$

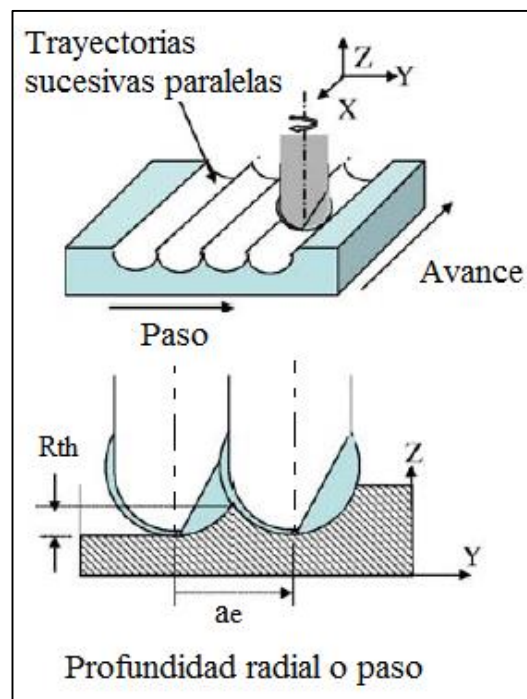
Donde:

$R$ : Radio de la herramienta esférica.

$\alpha$ : Ángulo de la pared.

En la mayoría de los casos, la rugosidad real es distinta a la teórica, por distintos aspectos: la flexión originada por la esbeltez de la herramienta, las vibraciones inducidas, el efecto de bruñido que se deriva del desgaste del filo, entre otros. (López de Lacalle Marcaide, 2004)

En casos donde el fresado en dirección  $z$  no constante como en operaciones de paralelo, la expresión de la altura de la cúspide obedece a un mecanizado longitudinal como se ve en la **figura 22**, donde la altura de la cresta es determinada por el radio de la fresa  $R$  y la profundidad radial o el paso  $a_e$ .



**Figura 22.** Altura de la cúspide en el caso de fresado en  $z$  no constante.

**Fuente:** (Chen, 2005)

La expresión de la altura de la cresta con fresado en  $z$  no constante en superficies con pendientes es:

$$R_{th} = \frac{a_e^2}{8.R} \quad [9] \text{ (Chen, 2005)}$$

### 2.7.1.1 Parámetros de rugosidad

#### 2.7.1.1.1 Rugosidad media aritmética (Ra)

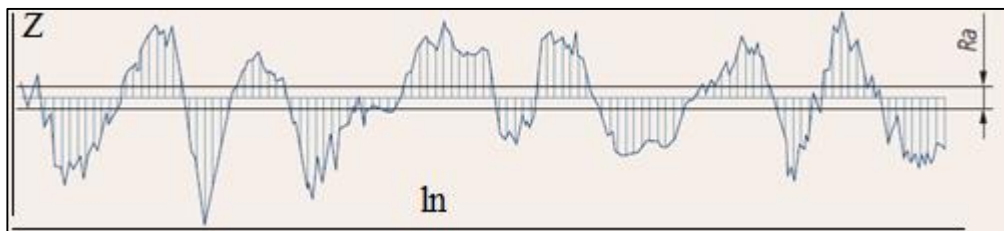
Es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil ( $Z_i$ ) de la línea media del perfil de rugosidad, ver **figura 23**. (MITUTOYO., 2016)

La expresión de la rugosidad media es:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad [10] \text{ (MITUTOYO., 2016)}$$

Donde:

$Z_i$ : Desviaciones del perfil en Z.



**Figura 23.** Valor de rugosidad media Ra.

**Fuente:** (MITUTOYO., 2016)

Con el valor de Ra que se obtienen con el rugosímetro, se compara los valores de rugosidad teórica.

### 2.7.1.1.2 Profundidad media de rugosidad (Rz)

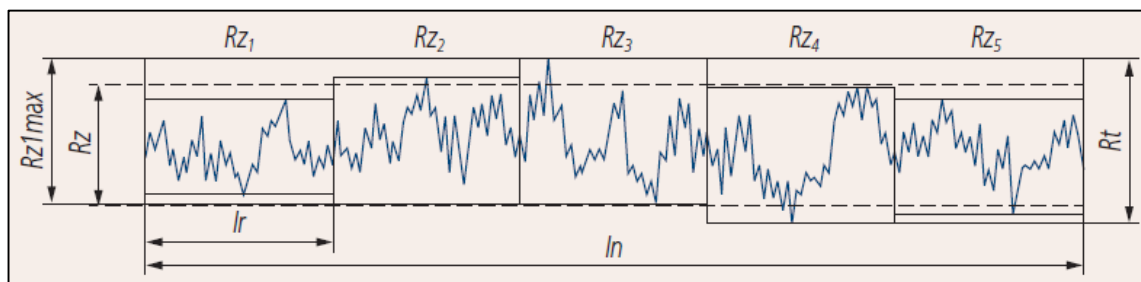
Valor medio de los cinco valores Rzi de las cinco longitudes de muestreo lri dentro de la longitud de evaluación ln, ver **figura 24**.

La expresión de la profundidad media de rugosidad es:

$$R_z = \frac{Rz_1 + Rz_2 + Rz_3 + Rz_4 + Rz_5}{5} \quad [11] \text{ (MITUTOYO., 2016)}$$

Donde:

Rzi: Altura media en la longitud de muestreo.



**Figura 24.** Altura media de rugosidad Rz.

Fuente: (MITUTOYO., 2016)

### 2.7.1.1.3 Rugosidad media cuadrática (Rq)

Definido como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las desviaciones Zi desde la línea media del perfil de evaluación.

La expresión de la media cuadrática es:

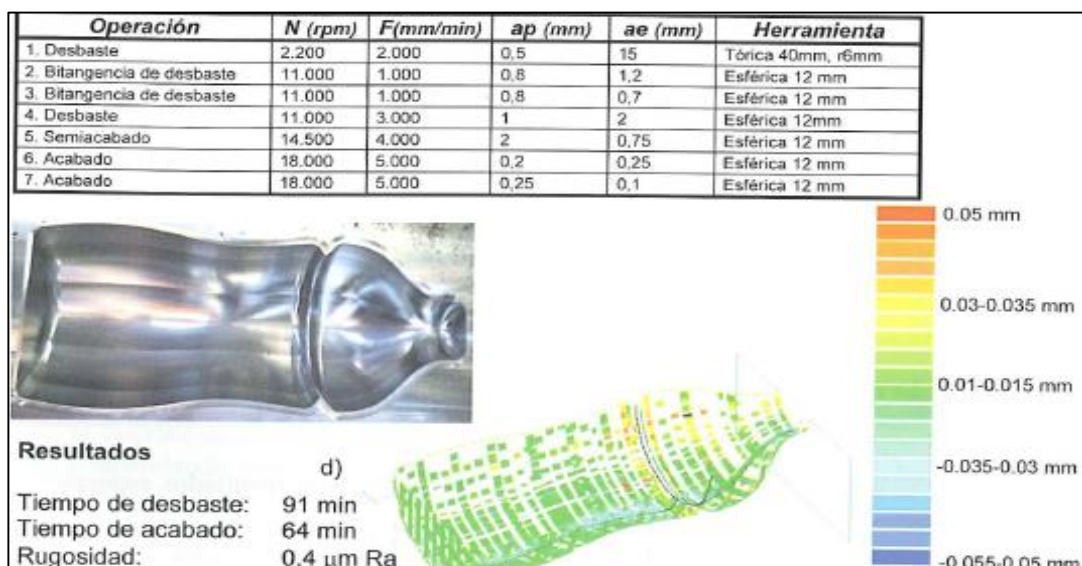
$$R_q = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad [12] \text{ (MITUTOYO., 2016)}$$

## 2.7.2 Precisión

La precisión de una superficie tras su mecanizado se mide respecto a la superficie de diseño CAD desde la cual se originó el proceso, mediante una máquina de medir por coordenadas. Existen varios factores que influyen en la no coincidencia de las cotas de la superficie teórica con la real (López de Lacalle Marcaide, 2004):

- La propia precisión de la máquina.
- La propia precisión de la geometría de la herramienta, que puede no ser perfectamente esférica.
- El montaje de la fresa en su cono, y de éste en el husillo, también induce unos errores, que implican el descentramiento de los dientes de la herramienta.
- Influencia de las fuerzas de corte durante el proceso.

En la **figura 25** se muestran una pieza utilizada para ensayar tipos de mecanizado.



**Figura 25.** Precisión dimensional en un ejemplo de aplicación.

**Fuente:** (López de Lacalle Marcaide, 2004)

## CAPÍTULO III

### 3 DESARROLLO CAD – CAM

#### 3.1 Máquina

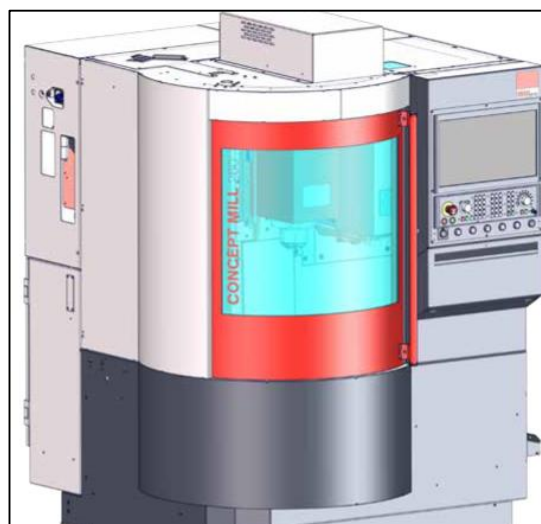
El mecanizado se llevará a cabo por un centro de mecanizado vertical marca EMCO Concept Mill 260 con control CNC Siemens. En la **tabla 5** se describe las características principales de la máquina y la imagen de muestra en la **figura 26**.

**Tabla 5**

*Datos técnicos de la Máquina.*

<b>Centro de Mecanizado:</b>	<b>EMCO CONCEPT MILL 260</b>
Control:	Sinumerik Operate
Rango de velocidad (motor asíncrono trifásico):	150 - 10000 [RPM]
Torque (100 / 40%):	23 / 34 [N.m]
Potencia (100 / 40%):	4,9 / 6,8 [kW]
Porta herramientas:	SK 30
Fuerza de avance máx. en X/Y/Z:	3000 [N]
Velocidad de avance de trabajo máx. en X/Y/Z:	10 m/min
Recorrido en X:	350 [mm]
Recorrido en Y:	250 [mm]
Recorrido en Z:	300 [mm]

**Fuente:** (Emco, 2015)



**Figura 26.** Centro de Mecanizado Concept Mill 260.

**Fuente:** (Emco, 2015)

### 3.2 Equipo de medición

La medición de la rugosidad superficial se realizará con un equipo Mitutoyo medidor de rugosidad superficial. En la **tabla 6** se describe las características del equipo y la imagen en la **figura 27**.

**Tabla 6**

*Especificaciones del rugosímetro.*

<b>Rugosímetro</b>	<b>Mitutoyo SJ 210</b>
Pantalla	Digital
Rango de medición en x	17,5 mm
Rango de medición en z	360 $\mu\text{m}$ (-200 $\mu\text{m}$ - +160 $\mu\text{m}$ )
Velocidad de seguimiento en medición	(0,25 - 0,5 - 0,75) mm/s
Radio de la punta aguja	5 $\mu\text{m}$
Rango mínimo / resolución	(25 $\mu\text{m}$ / 0,002 $\mu\text{m}$ )

**Fuente:** (MITUTOYO., 2016)





**Figura 27.** Rugosímetro SJ210.

**Fuente:** (MITUTOYO., 2016)

### 3.3 Herramientas

La herramienta para el mecanizado de acabado se realizará con una fresa de carburo con revestimiento TiAlN para tecnología HSM de diámetro 14 mm, de la marca Izartool. En la **tabla 7** se describe las características de la herramienta, y la imagen en la **figura 28**.

**Tabla 7**

*Especificaciones de la herramienta de acabado.*

<b>Marca:</b>	<b>IzarTool</b>
Tipo de Fresa:	Punta Bola
Filos:	4
Código:	9412
Material:	Carburo CW
Revestimiento:	TiAlN
Diámetro	14 mm

**Fuente:** (Izartool., 2017)



**Figura 28.** Fresa de acabado.

**Fuente:** (Izartool., 2017)

En la **tabla 8**, se muestra una imagen con los parámetros de corte óptimos recomendados por el fabricante para el mecanizado en aleaciones de aluminio.

**Tabla 8**

*Referencias técnicas del catálogo IzarTool.*

Material	VC [m/min]	Fz [mm/z]
Aleaciones de Aluminio	140 - 420	0,05 - 0,15

**Fuente:** (Izartool., 2017)

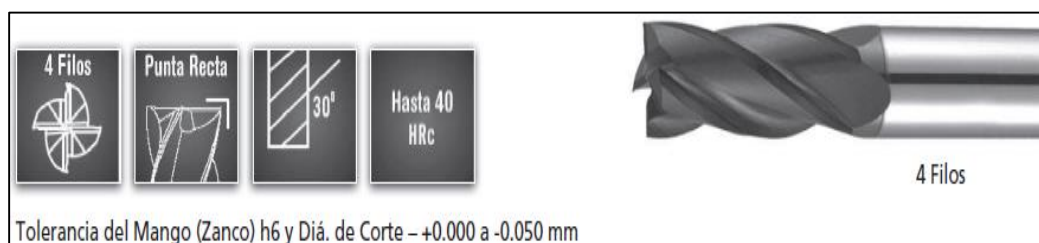
Para el mecanizado de desbaste, se utiliza una fresa de carburo con revestimiento TiAlN de diámetro 13/32” para tecnología HSM. En la **tabla 9**, se muestra las especificaciones de la herramienta y la imagen en la **figura 29**.

**Tabla 9**

*Especificaciones de la herramienta de desbaste.*

<b>Marca:</b>	<b>ToolMex</b>
Tipo de Fresa:	Punta Recta
Filos:	4
Código:	1-102-4041
Material:	Carburo CW
Revestimiento:	TiAlN
Diámetro:	13/32" - 10,32 mm

**Fuente:** (Izartool., 2017)



**Figura 29.** Fresa de desbaste.

**Fuente:** (TOOLMEX., 2015)

En la **tabla 10**, se muestra los parámetros de corte recomendados por el fabricante para el mecanizado de varios materiales no ferrosos.

**Tabla 10**

*Referencias técnicas del catálogo ToolMex.*

<b>Material</b>	<b>VC [m/min]</b>	<b>Fz [mm/z]</b>
Aleaciones de Aluminio	340	0,1 - 0,15

**Fuente:** (TOOLMEX., 2015)

### 3.4 Selección de parámetros de corte

Para el experimento se deberá seleccionar los parámetros de corte que el fabricante recomiende. El catálogo de IzarTool 2017 para la herramienta de acabado de diámetro 14 mm y el catálogo ToolMex 2013 para la herramienta de desbaste de diámetro 10,32 mm.

#### 3.4.1 Herramienta de desbaste

El catálogo recomienda los siguientes valores para todas las herramientas de corte según el material a mecanizar, como se muestra en la **tabla 11**.

**Tabla 11**

*Parámetros de corte sugeridos por el catálogo ToolMex.*

<b>Herramienta de desbaste</b>		
<b>Material:</b>	Aleaciones de Aluminio	
<b>Diámetro</b>	13/32"	10,32 mm
<b>Vc</b>	1120 SFM	340 m/min
<b>Fz</b>	0,002" - 0,004"	0,05 - 0,1 mm

**Fuente:** (TOOLMEX. , 2015)

El fabricante menciona que dichos valores sugeridos pueden aumentarse o disminuirse según las condiciones de la máquina, profundidad de corte, refrigerante, entre otros.

Debido a las condiciones de la máquina se establece que el 80 % de RPM máximas son para el proceso de desbaste con un avance por diente de 0,05 mm.

De esta manera se calculan los parámetros de corte según las ecuaciones que se mencionaron en el capítulo II y quedan los siguientes resultados de la **tabla 12**.

**Tabla 12***Parámetros de corte para el desbaste.*

<b>N [RPM]</b>	8000
<b>D [mm]</b>	10,32
<b>VC [m/min]</b>	260
<b>Fz [mm]</b>	0,05
<b>Vf [mm/min]</b>	1600
<b>ap [mm]</b>	4
<b>ae [mm]</b>	4

### 3.4.2 Herramienta de acabado

El catálogo sugiere los parámetros de corte de fresado que se muestran en la **tabla 13**.

**Tabla 13***Parámetros de corte sugeridos por el catálogo IzarTool.*

<b>Herramienta de acabado</b>	
<b>Material:</b>	Aleaciones de Aluminio
<b>Diámetro</b>	14 mm
<b>Vc</b>	100 - 420 m/min
<b>Fz</b>	0,05 - 0,1 mm

**Fuente:** (IzarTool., 2017)

Se selecciona una velocidad constante de 10000 RPM debido a la capacidad máxima de la máquina. La velocidad de corte efectiva varía en función del diámetro efectivo en cada superficie con diferente pendiente mecanizada.

El avance por diente se selecciona el mínimo recomendado de 0,05 mm debido a que el trabajo será sin refrigerante. La profundidad axial y radial se selecciona de modo que se requiera obtener una rugosidad superficial igual o inferior a 1  $\mu\text{m}$ .

De esta manera se calculan los parámetros con las ecuaciones ya mencionadas en el capítulo

II y se obtiene la **tabla 14** con los resultados.

**Tabla 14**

*Parámetros de corte para el acabado.*

<b>N [RPM]</b>	<b>10000</b>
<b>D nominal [mm]</b>	14
<b>Vc [m/min]</b>	440
<b>Fz [mm]</b>	0,05
<b>Vf [mm/min]</b>	2000
<b>ap [mm]</b>	0,2
<b>ae [mm]</b>	0,2

La velocidad de corte efectiva para el experimento a realizar será entre 160 m/min y 440 m/min de acuerdo a la variación del diámetro efectivo en las superficies a mecanizar, como se detalló en el capítulo II.

### 3.5 Selección de estrategias de mecanizado

En el capítulo II se explicó las estrategias principales de desbaste y acabado para el mecanizado en superficies 3D, las mismas se vuelven a resumir:

Estrategias de desbaste:

- Adaptativo
- Cajera

Se realizó la simulación de las dos estrategias en las mismas condiciones y parámetros de corte y se obtuvieron tiempos de simulación iguales. De esta manera se selecciona sin influir en los resultados la estrategia Adaptativo.

Estrategias de acabado:

- Contorno (Z constante)
- Paralelo (Z no constante)
- Festonear (Combina Z constante y Z no constante)
- Espiral (Z constante)
- Radial (Z no constante)

Para el experimento se establece que la rugosidad superficial mecanizada influirá si la estrategia es Z constante o Z no constante y si la trayectoria del mecanizado es en ascenso o descenso.

De esta manera las estrategias a ser analizadas son las que se muestran en la **tabla 15**.

**Tabla 15**

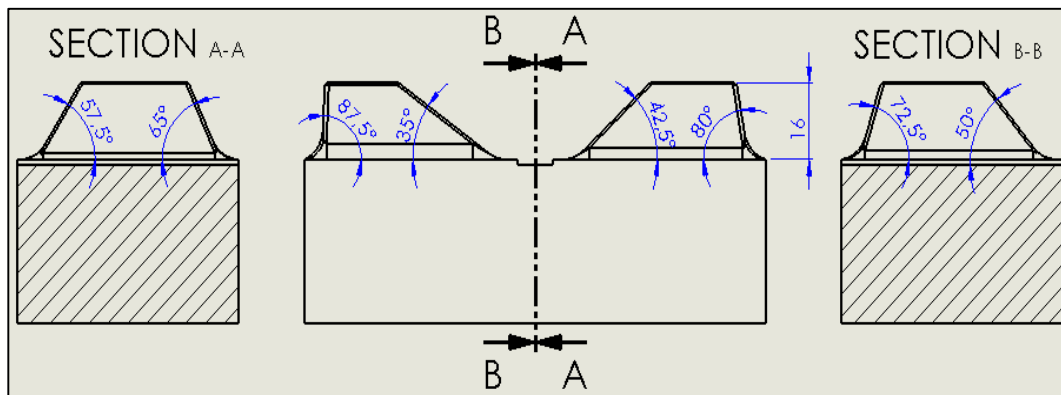
*Estrategias de acabado para el ensayo.*

No	Estrategia	Trayectoria	Observaciones
<b>1</b>	Contorno	Ascenso (CA)	Z constante
<b>2</b>	Contorno	Descenso (CD)	Z constante
<b>3</b>	Paralelo	Ascenso (PA)	Z no constante
<b>4</b>	Paralelo	Descenso (PD)	Z no constante

### 3.6 Metodología del experimento

#### 3.6.1 Modelo CAD

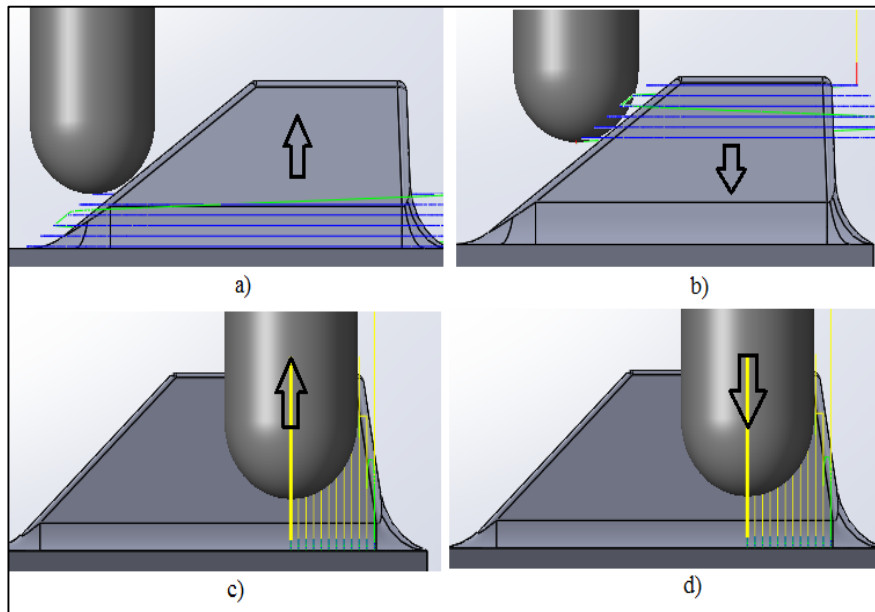
El diseño a mecanizar en aleación de aluminio Prodx contiene superficies con diferentes pendientes, en total ocho, el valor de las pendientes se definieron en intervalos de  $7,5^\circ$  y son:  $35^\circ / 42,5^\circ / 50^\circ / 57,5^\circ / 65^\circ / 72,5^\circ / 80^\circ / 87,5^\circ$ , como se ve en la **figura 30**.



**Figura 30.** Modelo CAD de la probeta para el experimento.

El diseño CAD de la probeta y la programación CAM fueron realizadas en un software de gama alta, las estrategias que se definieron para el proceso de acabado son: z-constante (Contorno) y z no constante (Paralelo) con trayectoria en ascenso, en descenso y dirección concurrente como se ve en la **figura 31**.





**Figura 31.** Estrategias a) Contorno en ascenso CA, b) Contorno de descenso CD, c) Paralelo en ascenso PA, d) Paralelo en descenso PD.

### 3.6.2 Detalle del experimento

El experimento tiene un diseño que garantiza la combinación total de variables, en la **tabla 16**, se muestra el conjunto de pruebas que se realizarán en el experimento, las ocho superficies serán evaluadas por cada estrategia y trayectoria.

La velocidad del husillo de  $N = 10000$  RPM, velocidad de avance de  $V_f = 2000$  mm/min, profundidad de  $a_p$  y  $a_e = 0,2$  mm serán constantes para todos los ensayos en dirección concurrente, número de muestras es 3.

El diámetro efectivo y velocidad de corte efectiva depende de la trayectoria.

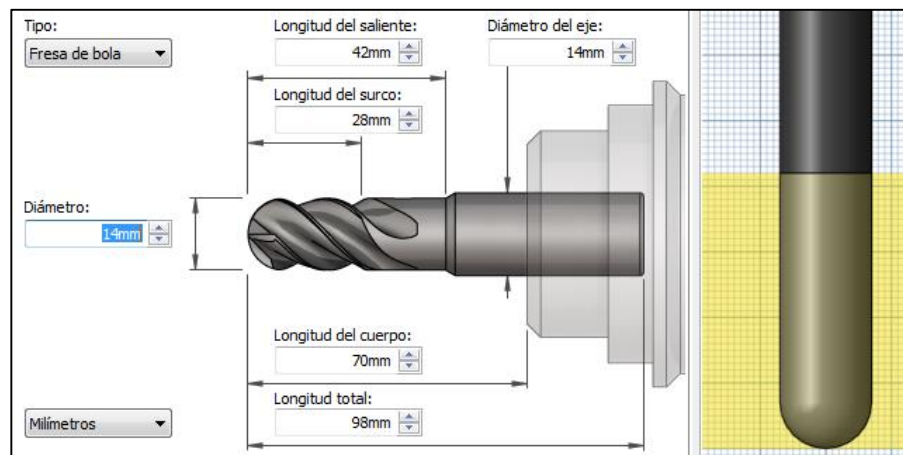
**Tabla 16***Detalle de experimentos.*

<i>Velocidad husillo: 10 000 RPM</i>		<i>D: 14 mm</i>		<i>Dirección: Concurrente</i>		
<i>ae: 0,2 mm</i>		<i>Vf: 2000 mm/min</i>				
<i>ap: 0,2 mm</i>		<i>F: 0,05 mm/z</i>				
Nº	Experimento	Estrategia / Trayectoria	Pendiente [°]	Diámetro efectivo [mm]	Velocidad de Corte Efectiva [m/min]	Número de muestras:
1	CA1	Contorno / Ascenso (CA)	35	10,6	333	3
2	CA2		42,5	11,6	365	3
3	CA3		50	12,6	394	3
4	CA4		57,5	13,3	416	3
5	CA5		65	13,7	431	3
6	CA6		72,5	14,0	439	3
7	CA7		80	14,0	440	3
8	CA8		87,5	14,0	440	3
9	PA1	Paralelo / Ascenso (PA)	35	10,6	333	3
10	PA2		42,5	11,6	365	3
11	PA3		50	12,6	394	3
12	PA4		57,5	13,3	416	3
13	PA5		65	13,7	431	3
14	PA6		72,5	14	439	3
15	PA7		80	14	440	3
16	PA8		87,5	14	440	3
17	CD1	Contorno / Descenso (CD)	35	5,1	160	3
18	CD2		42,5	6,7	212	3
19	CD3		50	8,3	260	3
20	CD4		57,5	9,7	304	3
21	CD5		65	10,9	343	3
22	CD6		72,5	12,1	379	3
23	CD7		80	12,8	403	3
24	CD8		87,5	13,4	422	3
25	PD1	Paralelo / Descenso (PD)	35	5,1	160	3
26	PD2		42,5	6,7	212	3
27	PD3		50	8,3	260	3
28	PD4		57,5	9,7	304	3
29	PD5		65	10,9	343	3
30	PD6		72,5	12,1	379	3
31	PD7		80	12,8	403	3
32	PD8		87,5	13,4	422	3

### 3.7 Programación CAM

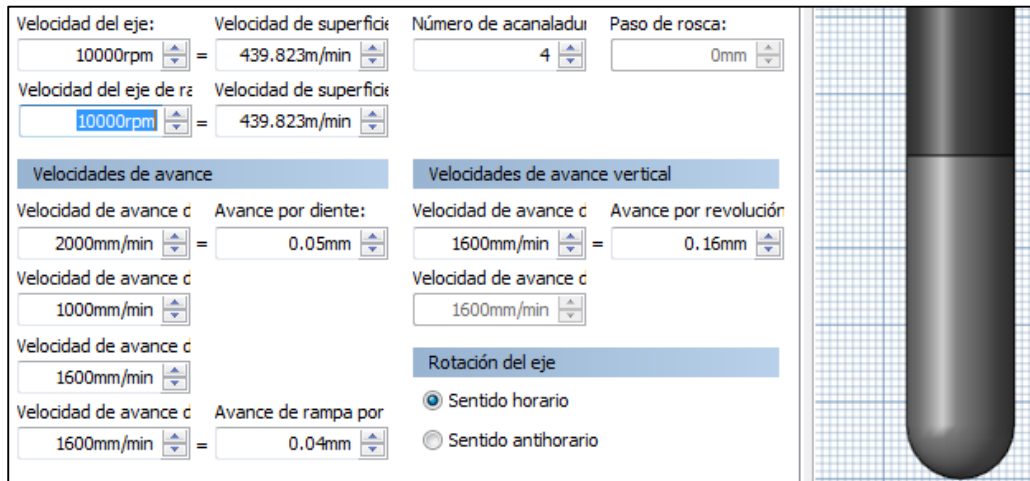
Para ejecutar el método experimental se debe analizar las diferentes estrategias de mecanizado seleccionadas en varias pendientes, para ello se realiza la programación CAM estableciendo los parámetros de corte constantes. Se describe los principales pasos para la configuración del software.

- a) En el diseño CAD realizado, se configura las condiciones iniciales.
- b) Se selecciona las herramientas y se configura las dimensiones reales como se precia en la **figura 32**.



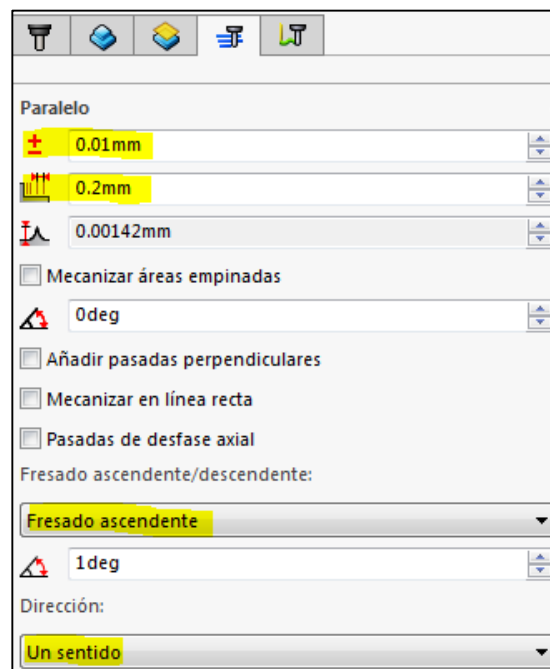
**Figura 32.** Configuración herramienta de acabado.

- c) Se configura el avance y velocidad constante para todos los ensayos como se indica en la **figura 33**.



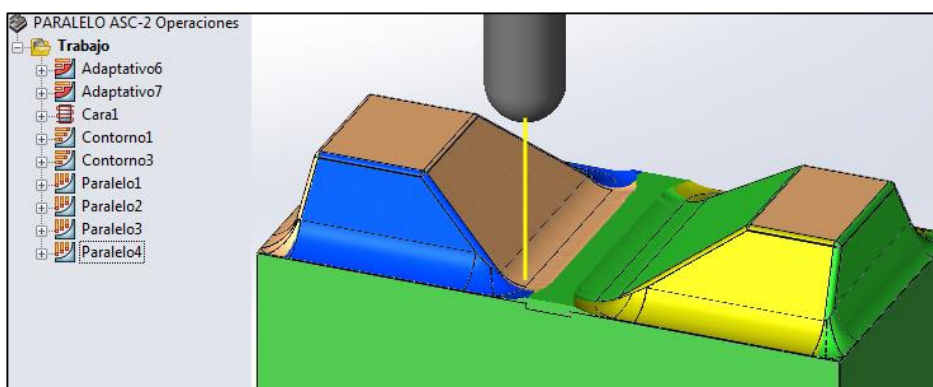
**Figura 33.** Configuraciones de avance y velocidad.

- d) Se selecciona la geometría a mecanizar y se establece los parámetros de profundidad de corte, trayectoria, dirección concurrente y la tolerancia para la interpolación lineal, como se aprecia en la **figura 34**.



**Figura 34.** Configuración de estrategia.

- e) Se ejecuta la simulación del proceso a realizar, entre ellos el desbaste (*Adaptativo*), semiacabado (*Contorno*) y acabado (*Paralelo*), como se muestra en la **figura 35**.



**Figura 35.** Simulación de la estrategia de paralelo en ascenso.

- f) Postprocesar para obtener los códigos G que se ingresan al software de la máquina EMCO control Sinumerik HMI Operate Mill, ver **figura 36**.

```

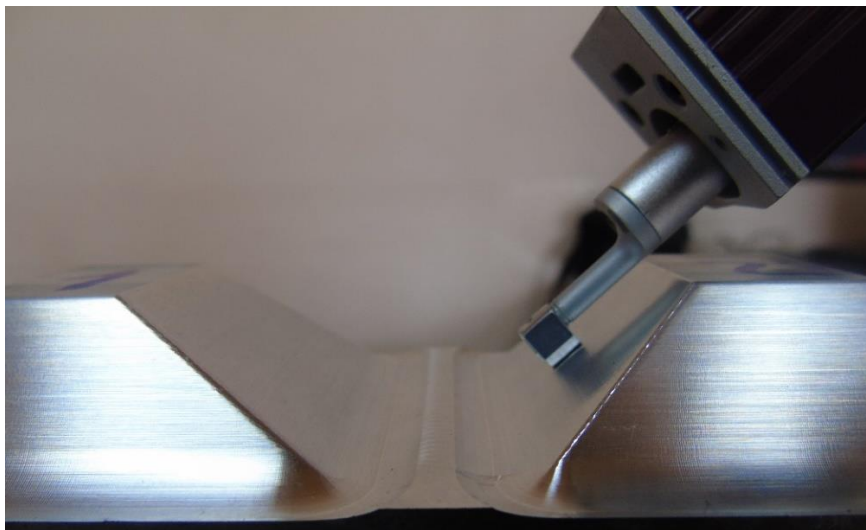
O0001.mpf
1 ; N O0001 MPF
2 N10 ; disenol
3 N11 ; T1 D=10.318 CR=0 - ZMIN=-16.49 - fresa con punta plana
4 N12 ; T2 D=14 CR=7 - ZMIN=-17.88 - fresa con punta de bola
5 N13 G90 G94
6 N14 G71
7 N15 G64
8 N16 G17
9 N17 G53 G0 Z0
10 N18 ; Adaptativo6
11 N19 M9
12 N20 T1
13 N21 M6
14 N22 T2
15 N23 S8000 M3
16 N24 G54
17 N25 M8
18 N26 X30.863 Y-5.323
19 N27 D1
20 N28 Z15
21 N29 Z5
22 N30 Z2.5
23 N31 G1 Z-4 F1500
24 N32 X20.827 Y 4.892
  
```

**Figura 36.** Procesamiento posterior Códigos G.

### 3.8 Resultados de la medición de rugosidad superficial

La medición de rugosidades en las superficies mecanizadas se realizó en el sentido paralelo y perpendicular al mecanizado en tres muestras por cada estrategia con el rugosímetro, como se ve

en la **figura 37** Sin embargo en la **tabla 17** se muestra, los resultados de la rugosidad medida perpendicular al sentido de mecanizado. Se realizan treinta y dos experimentos, con tres muestras de cada una, es decir se mecanizan y se miden en total noventa y seis superficies.



*Figura 37.* Medición de la rugosidad.

**Tabla 17***Datos y resultados del experimento.*

N° Exp	Estrategia / Trayectoria	Pendiente [°]	Def [mm]	Vcef [m/min]	Ra 1 [μm]	Ra 2 [μm]	Ra 3 [μm]	Ra Prom [μm]	Valor Prom [μm]
<b>1</b>	<b>Contorno / Ascenso (CA)</b>	35	10,6	333	0,764	0,87	0,887	0,840	0,805
		42,5	11,6	365	0,735	0,724	0,815	0,758	
		50	12,6	394	0,89	0,727	0,916	0,844	
		57,5	13,3	416	0,788	0,722	0,666	0,725	
		65	13,7	431	0,939	0,908	0,931	0,926	
		72,5	14,0	439	0,874	0,884	0,93	0,896	
		80	14,0	440	0,709	0,737	0,696	0,714	
		87,5	14,0	440	0,685	0,777	0,754	0,739	
<b>3</b>	<b>Paralelo / Ascenso (PA)</b>	35	10,6	333	0,233	0,371	0,281	0,295	0,346
		42,5	11,6	365	0,324	0,313	0,289	0,309	
		50	12,6	394	0,419	0,202	0,456	0,359	
		57,5	13,3	416	0,272	0,266	0,272	0,270	
		65	13,7	431	0,483	0,501	0,44	0,475	
		72,5	14,0	439	0,267	0,475	0,281	0,341	
		80	14,0	440	0,376	0,364	0,327	0,356	
		87,5	14,0	440	0,539	0,262	0,289	0,363	
<b>2</b>	<b>Contorno / Descenso (CD)</b>	35	5,1	160	1,103	1,057	1	1,053	0,723
		42,5	6,7	212	0,901	0,844	0,887	0,877	
		50	8,3	260	0,695	0,63	0,669	0,665	
		57,5	9,7	304	0,639	0,768	0,678	0,695	
		65	10,9	343	0,732	0,657	0,715	0,701	
		72,5	12,1	379	0,601	0,757	0,783	0,714	
		80	12,8	403	0,621	0,575	0,608	0,601	
		87,5	13,4	422	0,573	0,427	0,424	0,475	
<b>4</b>	<b>Paralelo / Descenso (PD)</b>	35	5,1	160	0,316	0,359	0,338	0,338	0,301
		42,5	6,7	212	0,3	0,275	0,318	0,298	
		50	8,3	260	0,358	0,187	0,266	0,270	
		57,5	9,7	304	0,245	0,336	0,315	0,299	
		65	10,9	343	0,277	0,323	0,287	0,296	
		72,5	12,1	379	0,439	0,277	0,247	0,321	
		80	12,8	403	0,294	0,328	0,355	0,326	
		87,5	13,4	422	0,265	0,27	0,248	0,261	

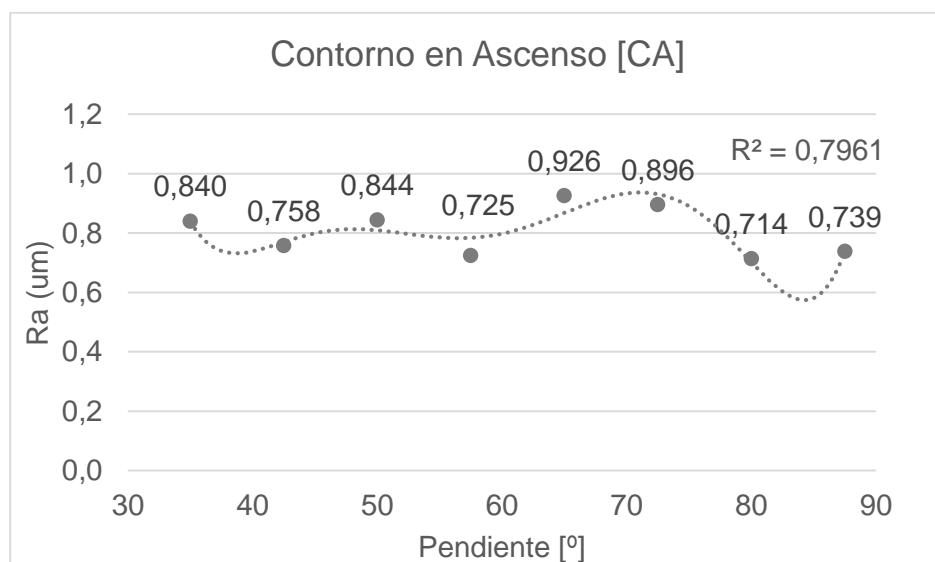
## CAPÍTULO IV

### 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Rugosidad por pendiente de cada estrategia

Para el análisis de cada estrategia se realizan gráficas de dispersión con los resultados de rugosidad Ra obtenidos en cada pendiente y se ejecuta una línea de tendencia polinómica. Se muestra el valor de  $R^2$ , si este valor se aproxima a 1 resulta un buen ajuste de la línea de tendencia en relación a los datos.

En la gráfica de la **figura 38** se muestra los resultados de la rugosidad Ra en cada superficie mecanizada con una estrategia de contorno en ascenso.



**Figura 38.** Rugosidad Ra vs Pendiente con estrategia contorno en ascenso.

Se puede apreciar que la rugosidad Ra no varía significativamente en las diferentes pendientes mecanizadas, es decir, con esta estrategia no influye la pendiente a mecanizar, sin embargo se aprecia una alteración entre la pendiente de 65° y 72,5°.



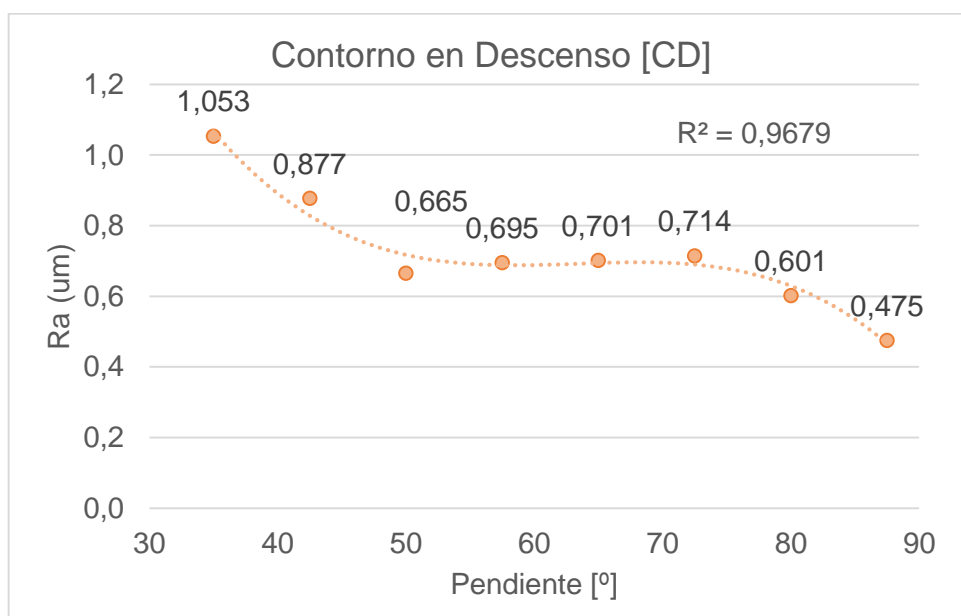
La línea de tendencia polinómica de orden 6 presenta la siguiente ecuación:

$$y = 6E-09x^6 - 2E-06x^5 + 0,0003x^4 - 0,0256x^3 + 1,0844x^2 - 24,042x + 218,7$$

El valor máximo de la rugosidad es de 0,926  $\mu\text{m}$  en superficies con pendiente de 65°, el valor de rugosidad mínima es de 0,714  $\mu\text{m}$  en superficies con pendiente de 80°.

El promedio de la rugosidad en superficies mecanizadas con esta estrategia es de 0,805  $\mu\text{m}$ .

En la gráfica de la **figura 39** se muestra los resultados de la rugosidad Ra en cada superficie mecanizada con una estrategia de contorno en descenso.



**Figura 39.** Rugosidad Ra vs Pendiente con estrategia contorno en descenso.

La rugosidad si disminuye con la pendiente mecanizada, es decir a mayor pendiente se tiene una menor rugosidad. Con esta estrategia si influye la pendiente a mecanizar.

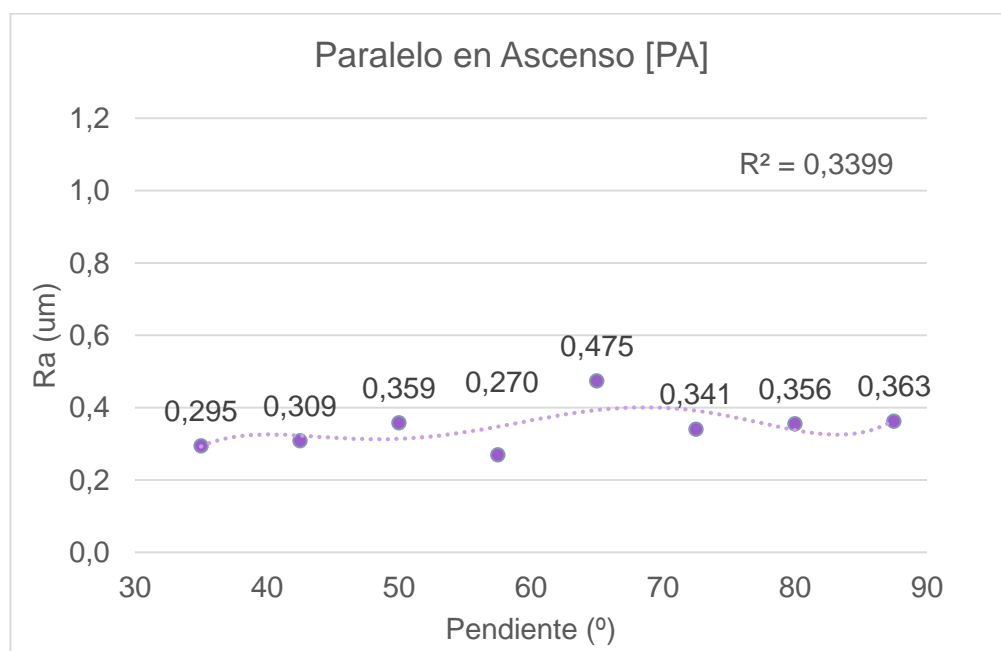
La línea de tendencia polinómica de orden 3 presenta la siguiente ecuación:

$$y = -2E-05x^3 + 0,0034x^2 - 0,217x + 5,2154$$

El valor máximo de la rugosidad es de 1,053  $\mu\text{m}$  en superficies con pendiente de 35°, el valor de la rugosidad mínima es de 0,475  $\mu\text{m}$  en superficies con pendiente de 87,5°.

El promedio de la rugosidad en superficies mecanizadas con esta estrategia es de 0,723  $\mu\text{m}$ .

En la gráfica de la **figura 40** se muestra los resultados de la rugosidad Ra en cada superficie mecanizada con una estrategia de paralelo en ascenso.



**Figura 40.** Rugosidad Ra vs Pendiente con estrategia paralelo en ascenso.

La rugosidad media Ra no varía significativamente en las diferentes pendientes mecanizadas. Sin embargo se aprecia una alteración entre la pendiente de 57,5° a 65°.

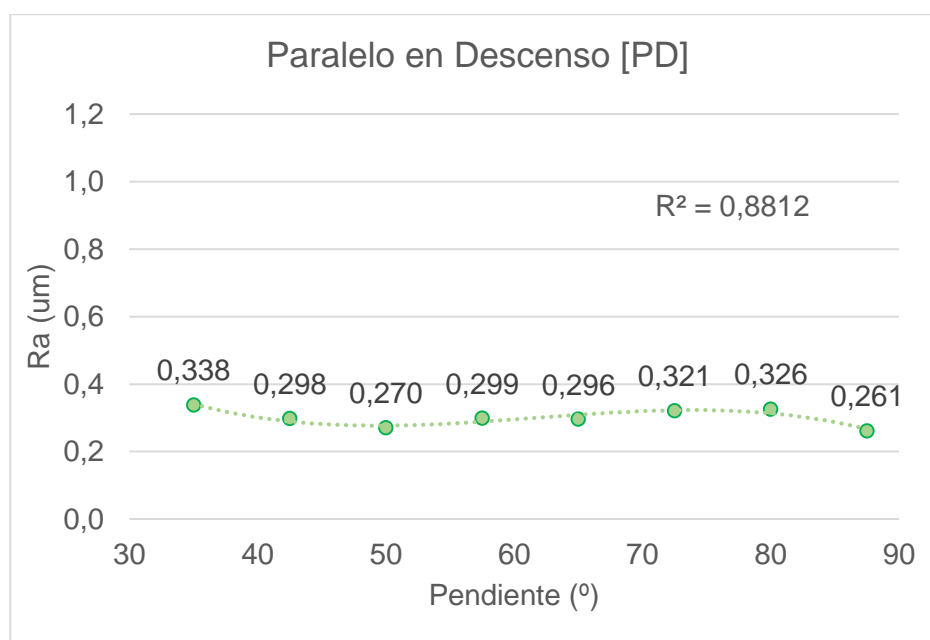
La línea de tendencia polinómica de orden 5 presenta la siguiente ecuación:

$$y = 3\text{E-}08x^5 - 9\text{E-}06x^4 + 0,001x^3 - 0,0583x^2 + 1,616x - 17,14$$

Se tiene en esta estrategia una mejoría en la rugosidad, el valor máximo de rugosidad es de 0,475  $\mu\text{m}$  en superficies con pendiente de 65°, el valor de rugosidad mínima es de 0,270  $\mu\text{m}$  en superficies con pendiente de 57,5°.

El promedio de la rugosidad en superficies mecanizadas con esta estrategia es de 0,346  $\mu\text{m}$ .

En la gráfica de la **figura 41** se muestra los resultados de la rugosidad Ra en cada superficie mecanizada con una estrategia de paralelo en descenso.



**Figura 41.** Rugosidad Ra vs Pendiente con estrategia paralelo en descenso.

El valor de la rugosidad Ra no varía significativamente en las diferentes pendientes mecanizadas. Con esta estrategia no influye la pendiente a mecanizar.

La línea de tendencia polinómica de orden 3 presenta la siguiente ecuación:

$$y = -6\text{E-}06x^3 + 0,0011x^2 - 0,067x + 1,5612$$

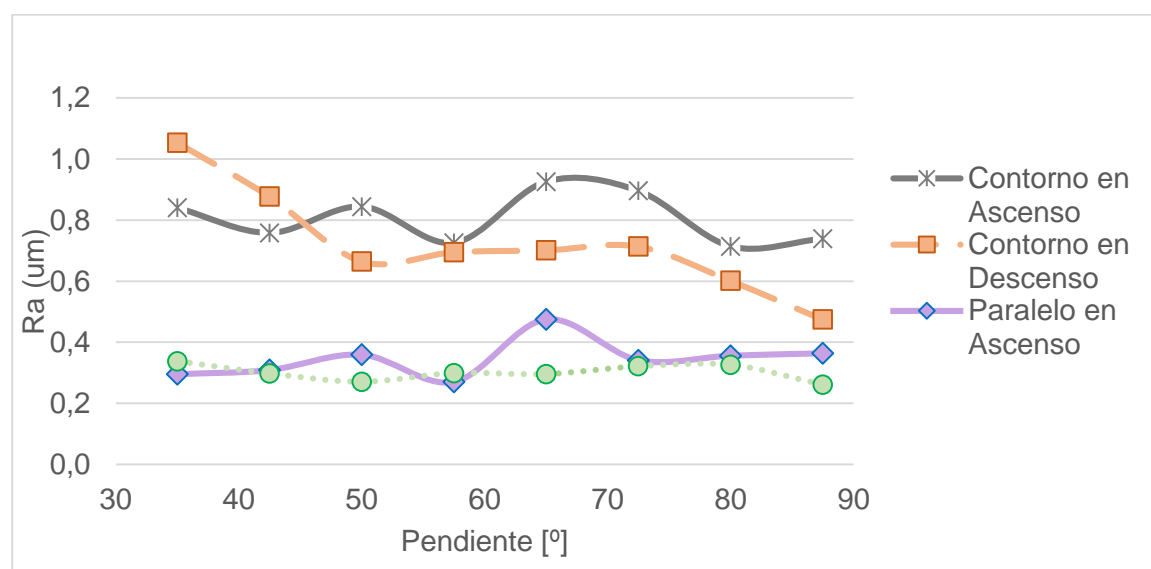
Con esta estrategia se tiene la mejor rugosidad superficial a comparación con las demás estrategias. El valor máximo de rugosidad es de 0,338  $\mu\text{m}$  en superficies con pendiente de 35°, el valor de rugosidad mínima es de 0,261  $\mu\text{m}$  en superficies con pendiente de 87,5°.

El promedio de la rugosidad en superficies mecanizadas con esta estrategia es de 0,301  $\mu\text{m}$ .

De esta manera se puede hacer una comparación de la rugosidad superficial obtenida con las diferentes estrategias de mecanizado y trayectorias en las diferentes pendientes mecanizadas.

## 4.2 Comparación de estrategias

En la **figura 42** se muestra un diagrama de dispersión con líneas suavizadas de los valores de la rugosidad superficial Ra obtenidos con cada estrategia.



**Figura 42.** Comparación de la rugosidad Ra obtenida con las diferentes estrategias.

Las estrategias de paralelo tienen menor rugosidad superficial que las estrategias de contorno. La mejor rugosidad promedio entre las cuatro estrategias mecanizadas es la que se obtiene con estrategia de paralelo en descenso (PD).

Para el mecanizado en ascenso CA y PA, el comportamiento de las curvas es parecido mostrando menor rugosidad en la pendiente de 57,5 $^{\circ}$ .

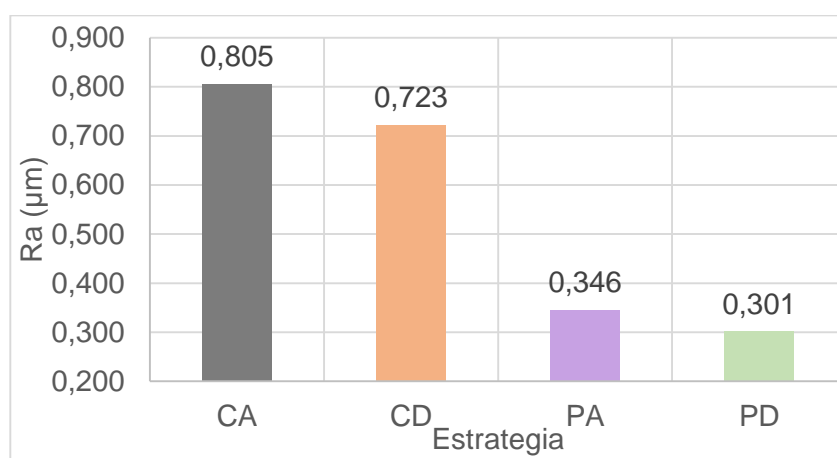
Cuando se trata de mecanizado en descenso, ambas curvas tienen un comportamiento totalmente diferente. En la estrategia de contorno en descenso (CD), la rugosidad disminuye

considerablemente a medida que la pendiente aumenta, mientras que con la estrategia de paralelo en descenso (PD) la rugosidad varía ligeramente con la variación de la pendiente.

### 4.3 Rugosidad promedio por estrategias

Para este análisis se realiza un diagrama de columna agrupada y se compara el valor de la rugosidad promedio obtenida con cada estrategia.

En la gráfica de la **figura 43** se muestra los resultados de la rugosidad Ra promedio de todas las superficies mecanizadas con las diferentes estrategias asignadas.



**Figura 43.** Rugosidad Ra promedio vs Estrategia.

Se obtiene una rugosidad menor en las superficies mecanizadas con la estrategia de paralelo en descenso (PD), con un promedio de mediciones en las superficies de 0,301 µm.

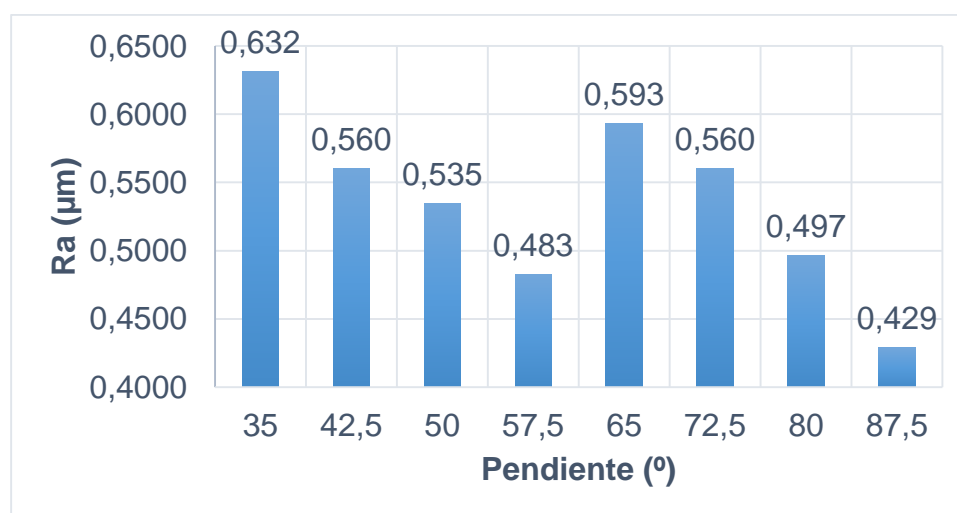
Las superficies con mayor rugosidad son las mecanizadas con la estrategia de contorno en ascenso (CA) con un promedio de mediciones en las superficies de 0,805 µm.

Con la estrategia de paralelo en descenso (PD) se tiene una menor rugosidad con un porcentaje en comparación al promedio de las mediciones de cada estrategia del:

- 37,3 % de la que se obtiene con contorno en ascenso (CA).
- 41,6 % con contorno en descenso (CD).
- 86,9 % con paralelo en ascenso (PA).

#### 4.4 Rugosidad promedio por pendientes

En la gráfica de la **figura 44** se muestra los resultados de la rugosidad Ra promedio en cada pendiente mecanizada.



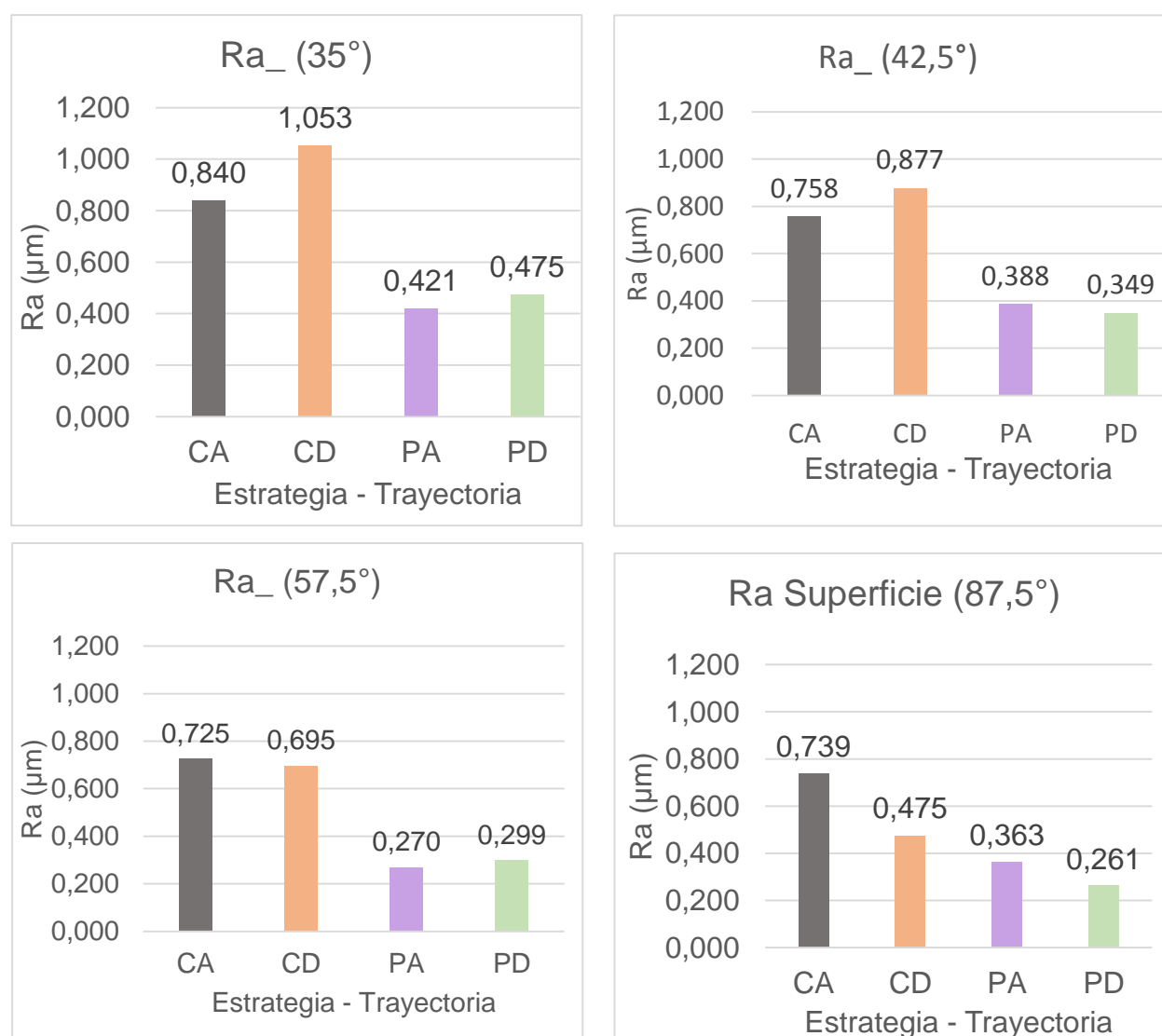
**Figura 44.** Rugosidad Ra promedio vs Pendiente.

Se tiene una menor rugosidad promedio en superficies mecanizadas con pendiente de 57,5° y 87,5°. Con valores de rugosidad promedio de 0,483 µm y 0,429 µm respectivamente.

Las superficies mecanizadas en pendiente de 35° tienen una rugosidad promedio mayor con un valor de 0,632 µm.

#### 4.5 Rugosidad promedio por estrategia en pendientes

En la gráfica de la **figura 45**, se muestra como la estrategia influye en la rugosidad superficial en pendientes de 35°, 42,5°, 57,5° y 87,5°. Se selecciona estas cuatro pendientes porque se aprecia que con pendientes de 35° a 42,5°, se tiene una menor rugosidad con trayectorias en ascenso. Mientras que con pendientes superiores de 42,5°, la rugosidad es menor con trayectorias en descenso.



**Figura 45.** Efectos de las estrategias con la rugosidad superficial en pendientes de 35° a 87, 5°.

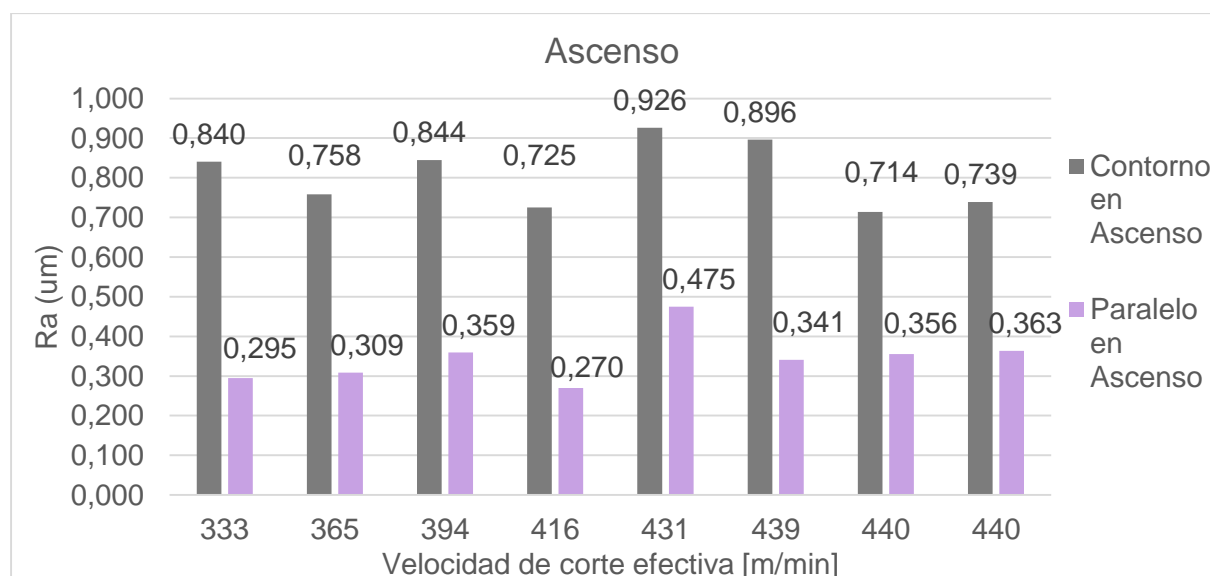
Esto se debe a que las pendientes mecanizadas tienen relación con la velocidad de corte efectiva. Se determinó que superficies con pendiente menor a  $42,5^\circ$  o velocidad de corte efectiva menor a 260 m/min, la trayectoria debe ser en ascenso.

#### 4.6 Análisis de rugosidad por velocidad de corte efectiva.

Para este análisis de rugosidad por velocidad de corte efectiva en cada pendiente se toma en cuenta la trayectoria realizada, ya que trayectorias en ascenso tienen diferente velocidad de corte que trayectorias en descenso. Se comparan los resultados obtenidos por trayectorias con un diagrama de columnas agrupadas.

##### 4.6.1 Estrategias con trayectoria en ascenso

En la gráfica de la **figura 46** se muestra el comportamiento de la rugosidad con respecto a la velocidad de corte efectiva en estrategias que tienen trayectoria en ascenso.



**Figura 46.** Rugosidad Ra vs velocidad de corte efectiva en pendientes con trayectoria en ascenso.



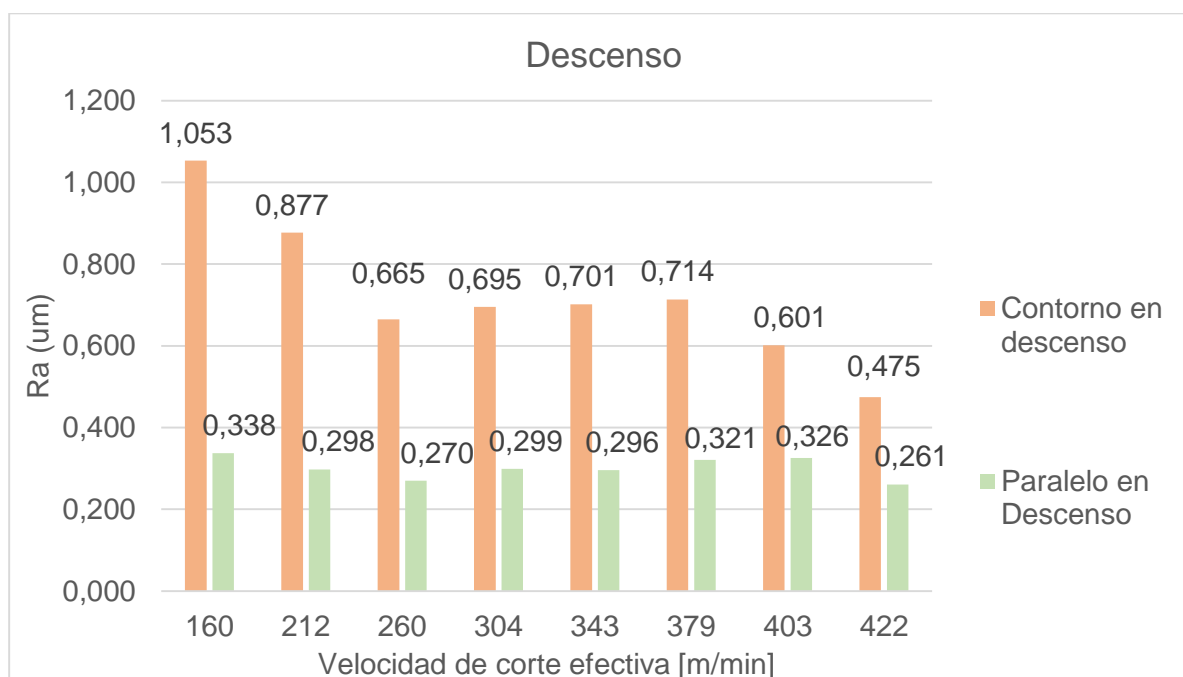
Con trayectoria en ascenso, la velocidad de corte efectiva aumenta de 333 m/min a 440 m/min, correspondientes a superficies con pendientes de 35° a 87,5°.

La rugosidad varía leve e irregularmente en cada pendiente mecanizada. Esto se debe a que la velocidad de corte efectiva apenas aumenta en cada pendiente. Sin embargo, la rugosidad promedio con estrategia de paralelo es menor que con la estrategia en contorno en un 42,9%.

Se obtiene mejores resultados de rugosidad con velocidad de corte de 416 m/min, que corresponden a una pendiente de 57,5°.

#### 4.6.2 Estrategias con trayectoria en descenso

En la gráfica de la **figura 47** se muestra el comportamiento de la rugosidad con respecto a la velocidad de corte efectiva en estrategias que tienen trayectoria en descenso.



**Figura 47.** Rugosidad Ra vs velocidad de corte efectiva en pendientes con trayectoria en descenso.

Con trayectoria en descenso, la velocidad de corte efectiva aumenta de 160 m/min a 422 m/min, correspondientes a superficies con pendientes de 35° a 87,5°.

En estrategia de contorno, la rugosidad disminuye cuando la velocidad de corte efectiva aumenta. Con velocidad de corte superior a 212 m/min los valores de rugosidad son menores.

En estrategia de paralelo, la rugosidad varía leve e irregularmente con cada velocidad de corte, se tiene menor rugosidad promedio con relación a la estrategia de contorno en un 41,6 %.

Se obtiene mejores resultados de rugosidad con velocidad de corte de 422 m/min, que corresponden a una pendiente de 87,5°.

La velocidad de corte efectiva debe ser superior a 212 m/min en estrategias de contorno para tener una rugosidad uniforme en las superficies.

#### **4.7 Rugosidad promedio Ra, Rq, Rz, Rth**

En el proceso de medición de rugosidad superficial, se obtuvo la rugosidad media aritmética Ra, rugosidad media cuadrática Rq y la profundidad media de rugosidad Rz.

La rugosidad teórica o altura de la cresta Rth, se obtuvo con la ecuación número [8] para estrategias de contorno con dirección z constante.

La ecuación número [9] para estrategias de paralelo con dirección z no constante.

En la **tabla 18** se muestra los resultados de la rugosidad superficial promedio Ra, Rq, Rz y Rth con cada estrategia mecanizada.

**Tabla 18**  
*Rugosidad superficial promedio*

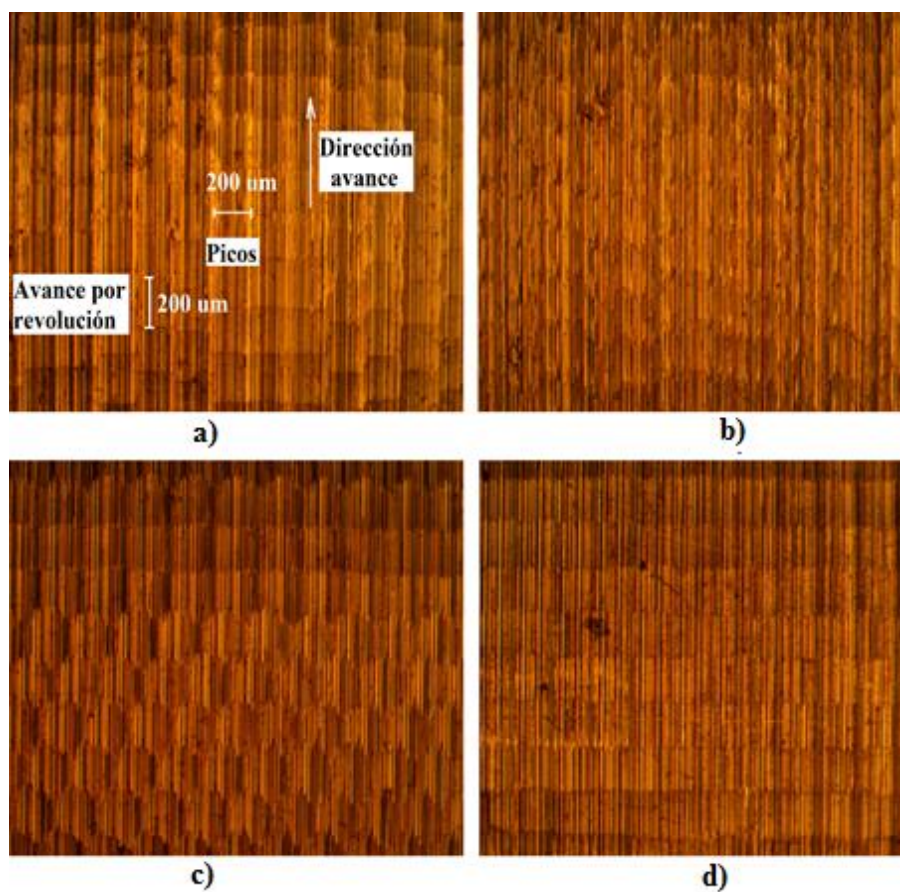
<b>Estrategia/Trayectoria</b>	<b>Promedio Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Promedio Rq [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Promedio Rz [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Promedio Rth [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
<b>Contorno en ascenso</b>	0,805	0,969	4,386	1,133
<b>Contorno en descenso</b>	0,723	0,875	3,956	1,133
<b>Paralelo en ascenso</b>	0,346	0,416	1,682	0,714
<b>Paralelo en descenso</b>	0,301	0,364	1,513	0,714

Los valores de rugosidad Ra promedio, son inferiores a la rugosidad teórica Rth. El porcentaje de la rugosidad promedio Ra con respecto a la rugosidad teórica Rth por cada estrategia es:

- Contorno en ascenso, Ra promedio es el 71 % de Rth
- Contorno en descenso, Ra promedio es el 63,8 % de Rth
- Paralelo en ascenso, Ra promedio es el 48,4 % de Rth
- Paralelo en descenso, Ra promedio es el 42 % de Rth

#### **4.8 Análisis superficial**

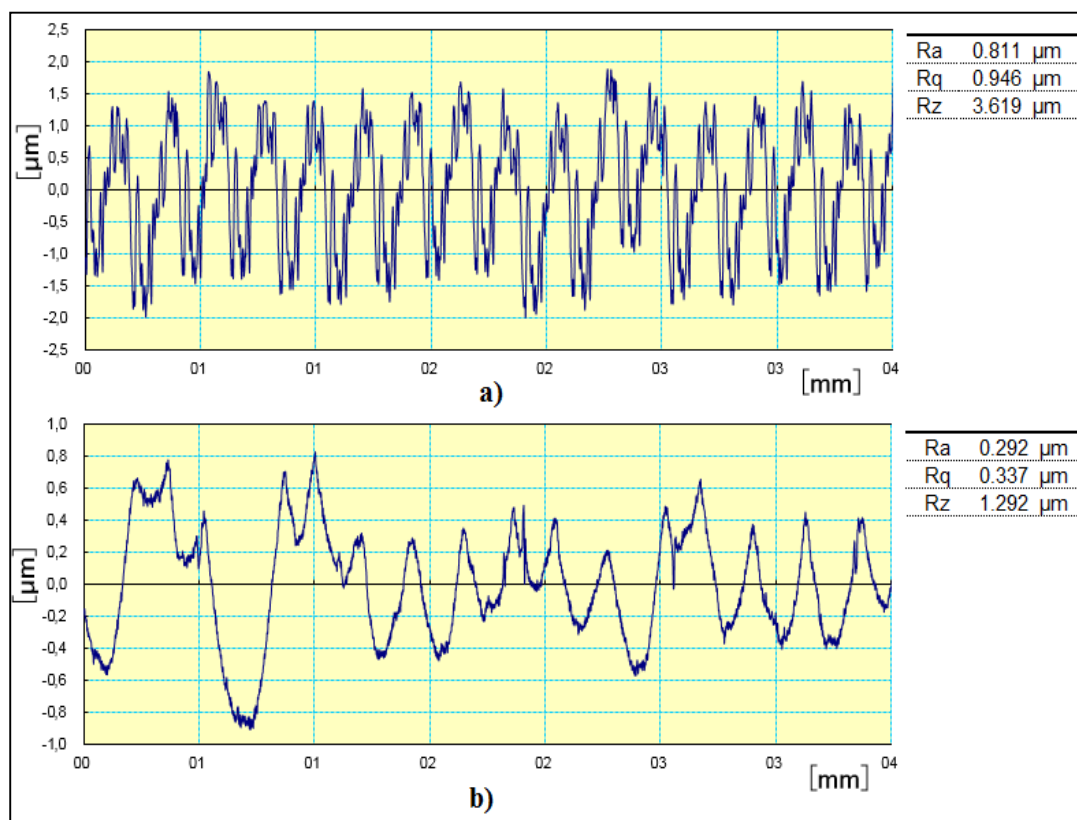
Se realizó el análisis en superficies con pendiente de  $87,5^\circ$  por cada estrategia, para la observación del perfil y picos en la superficie, se utilizó un microscopio óptico para capturar la imagen con un aumento de 5X, como se aprecia en la **figura 48**.



**Figura 48.** Captura ampliada a 5X de superficies con pendiente  $87,5^\circ$  mecanizadas con: a) Contorno en ascenso CA, b) Contorno en descenso CD, c) Paralelo en ascenso PA, d) Paralelo en descenso PD.

Las superficies mecanizadas con trayectorias en ascenso, presentan picos más marcados. También se puede apreciar las mediciones realizadas del paso y avance por revolución aproximadamente de 0,2 mm.

En la **figura 49**, se muestra el perfil de la medición de una muestra mecanizada con estrategia de contorno en ascenso y paralelo en ascenso respectivamente, para evaluar el error de forma en la superficie.



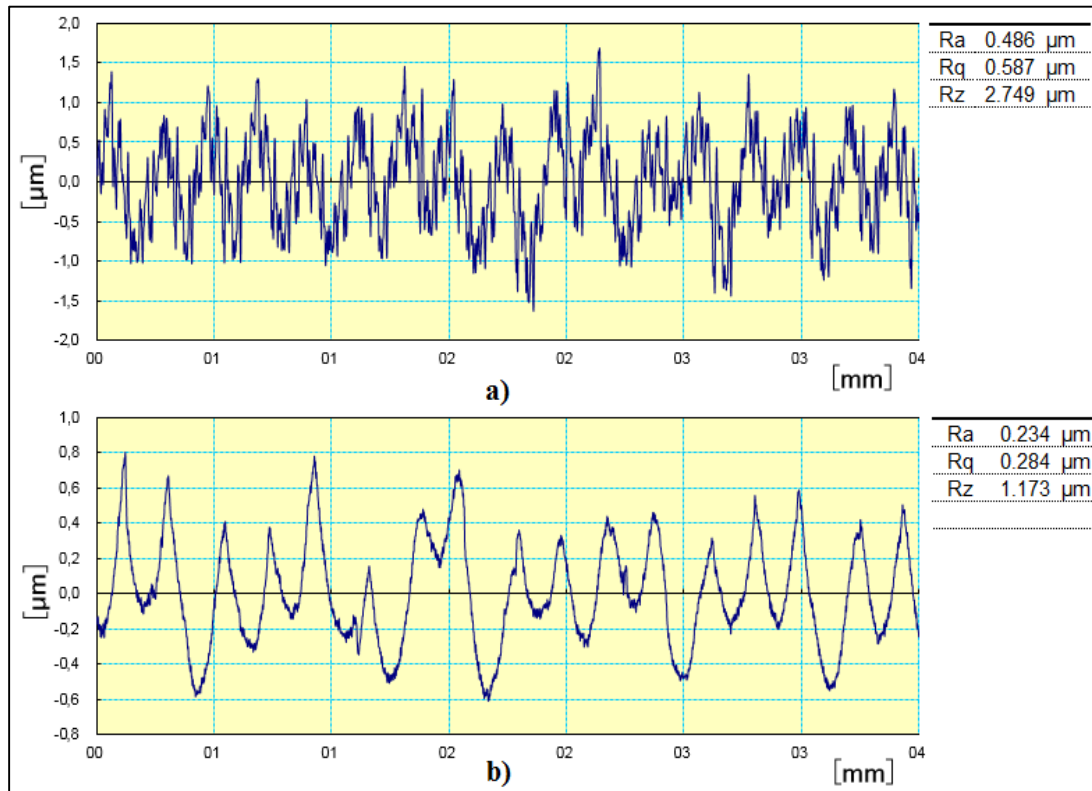
**Figura 49.** Perfil de medición en una superficie muestra de  $87,5^\circ$  con velocidad de corte efectiva de 440 m/min mecanizada con: a) CA , b) PA.

Con la estrategia de contorno en ascenso se obtiene una mayor altura de picos y valles con un valor de rugosidad  $Rz = 3,619 \mu\text{m}$ .

Mientras que con la estrategia de paralelo en ascenso se obtiene una menor altura de picos y valles con un valor de rugosidad  $Rz = 1,292 \mu\text{m}$ .

Para trayectorias en descenso, la superficie es menos marcada y la altura de los picos es menor con respecto a trayectorias en ascenso.

En la **figura 50**, se muestra el perfil de la medición de una muestra mecanizada con estrategia de contorno en descenso y paralelo en descenso respectivamente, para evaluar el error de forma en la superficie con pendiente de  $87,5^\circ$ .



**Figura 50.** Perfil de medición en una superficie muestra de  $87,5^\circ$  con velocidad de corte de 422 m/min mecanizada con: a) CD, b) PD.

Con la estrategia de contorno en descenso se obtiene una mayor altura de picos y valles con un valor de rugosidad  $Rz = 2,749 \mu\text{m}$ .

Con la estrategia de paralelo en descenso se obtiene una menor altura de picos y valles con un valor de rugosidad  $Rz = 1,173 \mu\text{m}$ .

#### 4.9 Desgaste de la herramienta

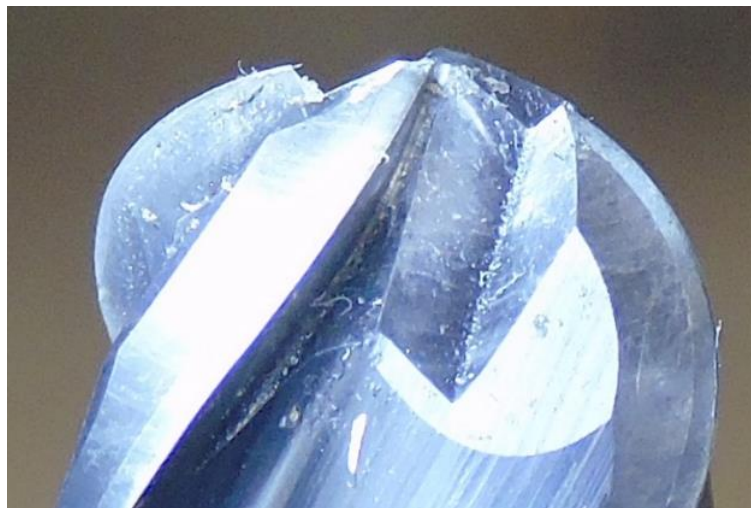
El resultado del desgaste de la herramienta de acabado tras 420 metros mecanizados se muestra en la **figura 51**.

Los parámetros de mecanizado de la herramienta en operaciones de semiacabado y acabado se muestra en la **tabla 19**.

**Tabla 19**

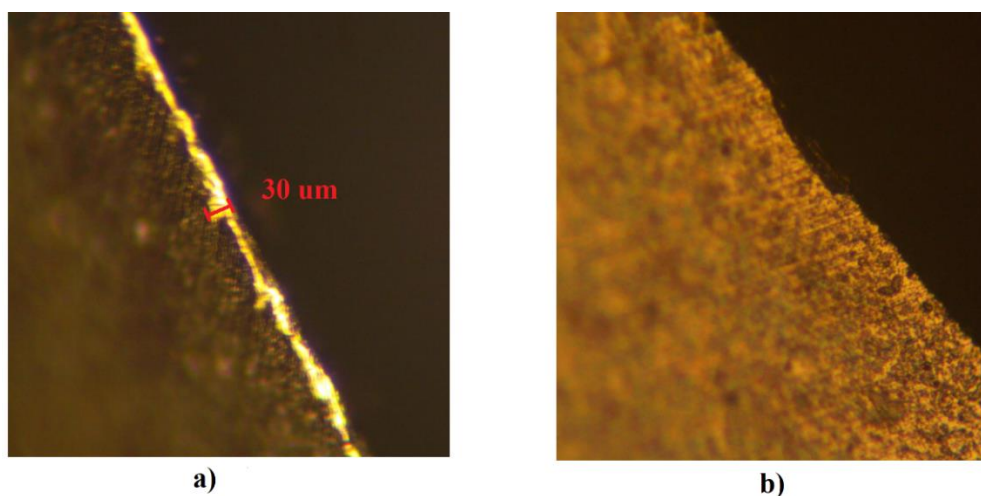
*Parámetros de la herramienta de acabado.*

Parámetro	Semiabado	Acabado
VC [m/min]	160 - 440	
N [RPM]	10000	
Vf [mm/min]	2000	
ap [mm]	1	0,2
ae [mm]	0,3	0,2
Tiempo total [h]	1	7
MRR [mm <sup>3</sup> /min]	600	80



**Figura 51.** Desgaste de la herramienta de acabado tras 420 metros mecanizados.

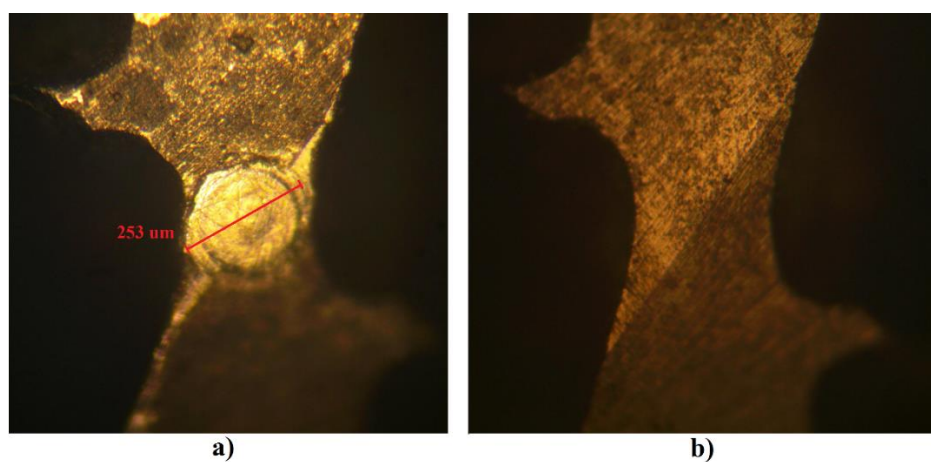
El tipo de desgaste que presenta la herramienta es el filo recrecido BUE (Built Up Edge) debido que muestra una pequeña adhesión de aluminio en los filos de desprendimiento. En la **figura 52** se compara el filo de la herramienta utilizada con una nueva.



**Figura 52.** Captura ampliada 20 X del desgaste tipo BUE a) deposición de aluminio en el filo b) filo sin mecanizar.

El filo recrecido tiene una adherencia mínima máxima de 0,03 mm, no se encuentra presencia de fractura ni descascaro alrededor de los filos de corte.

La punta de la fresa presenta una adherencia de aluminio con un diámetro de 0,253 mm, tal como se muestra en la **figura 53**.

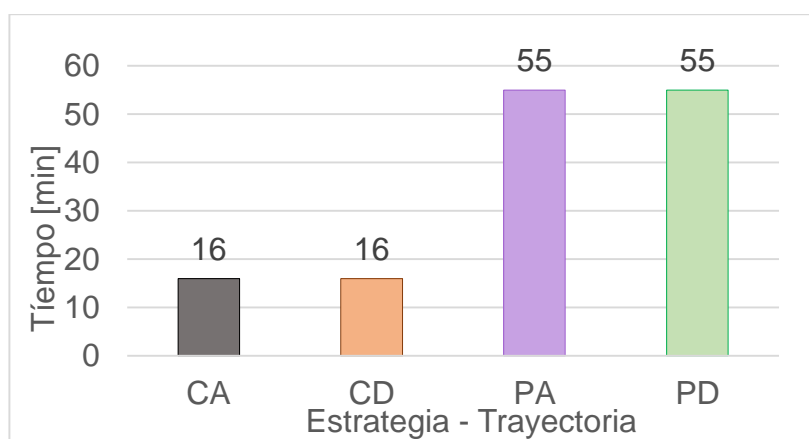


**Figura 53.** Captura ampliada 10X a) adherencia de aluminio en la punta b) punta sin mecanizar.



#### 4.10 Tiempos de mecanizado

En la figura 54, se muestra los tiempos de mecanizado que se obtuvieron con las diferentes estrategias.



**Figura 54.** Tiempos de mecanizado vs estrategia y trayectoria.

El tiempo de mecanizado con estrategias de paralelo en ascenso o descenso tienen un promedio de 55 min por probeta, mientras que con estrategias de contorno en ascenso o descenso tienen un promedio de 16 min por probeta.

El porcentaje del tiempo de mecanizado de estrategias de contorno con relación a estrategias de paralelo es del 30 %.

#### 4.11 Condiciones de corte óptimas en el mecanizado

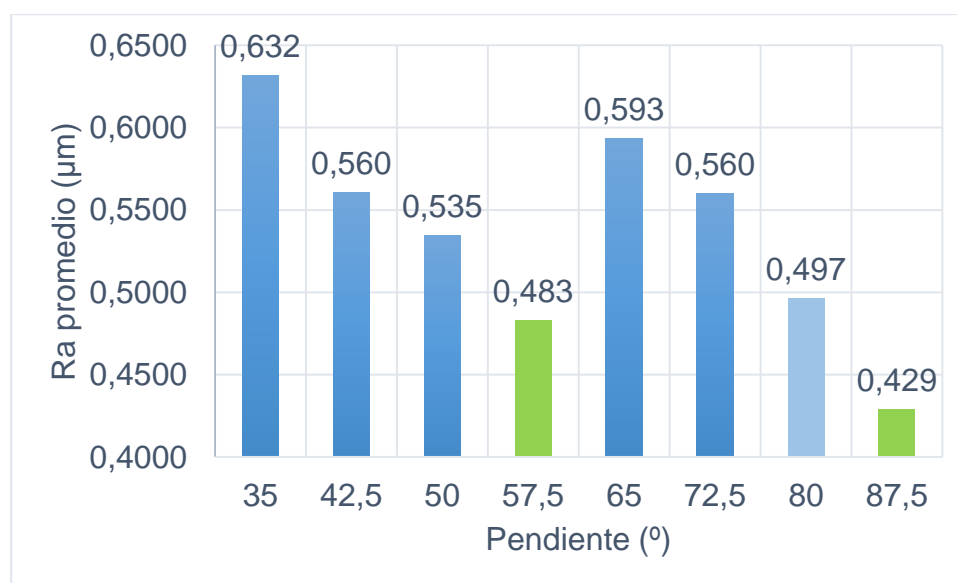
El objetivo del proyecto de investigación es encontrar de manera experimental, estrategias óptimas de mecanizado en seco a alta velocidad HSM, en condiciones que permitan obtener una mejor rugosidad superficial.

Las condiciones que permiten obtener una mejor rugosidad superficial en conjunto son:

- La pendiente
- La velocidad de corte efectiva
- La trayectoria
- La estrategia

#### 4.11.1 Pendiente óptima

Los mejores resultados de rugosidad Ra promedio se obtuvieron en superficies con pendiente de 87,5° y 57,5° como se ve en la **figura 55**.



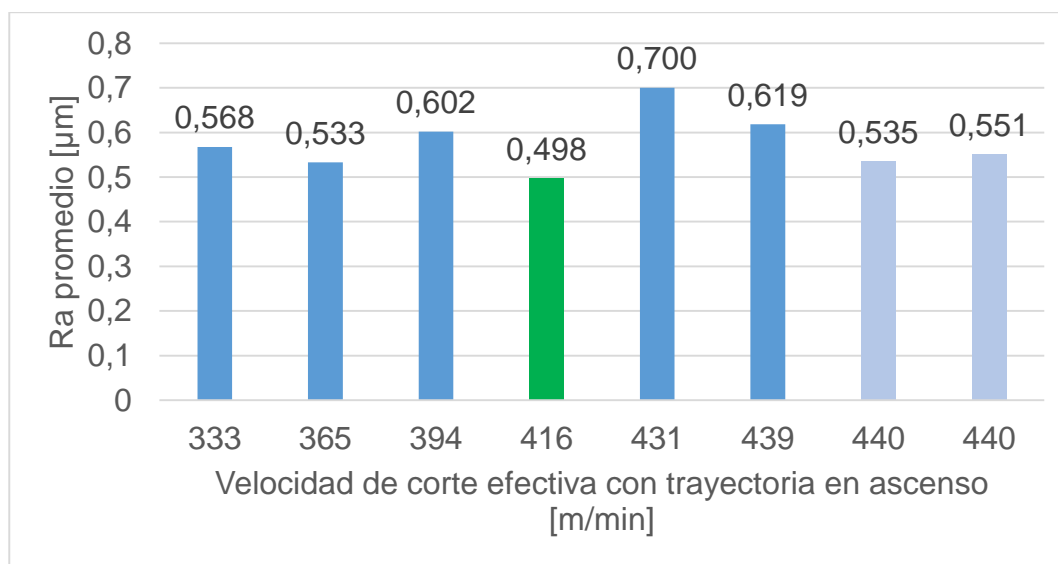
**Figura 55.** Pendiente óptima.

Si se dispone de una máquina de 5 ejes, y se está trabajando con una herramienta de punta esférica de diámetro 14 mm, se recomienda trabajar con un ángulo de inclinación de la herramienta de 57, 5° o 87, 5°.

Estas pendientes óptimas tienen relación con la velocidad de corte efectiva, la pendiente de 57,5° con trayectoria en ascenso tiene una velocidad de corte efectiva de 416 m/min, mientras que la pendiente de 87,5° con trayectoria en descenso tiene una velocidad de corte efectiva de 422 m/min.

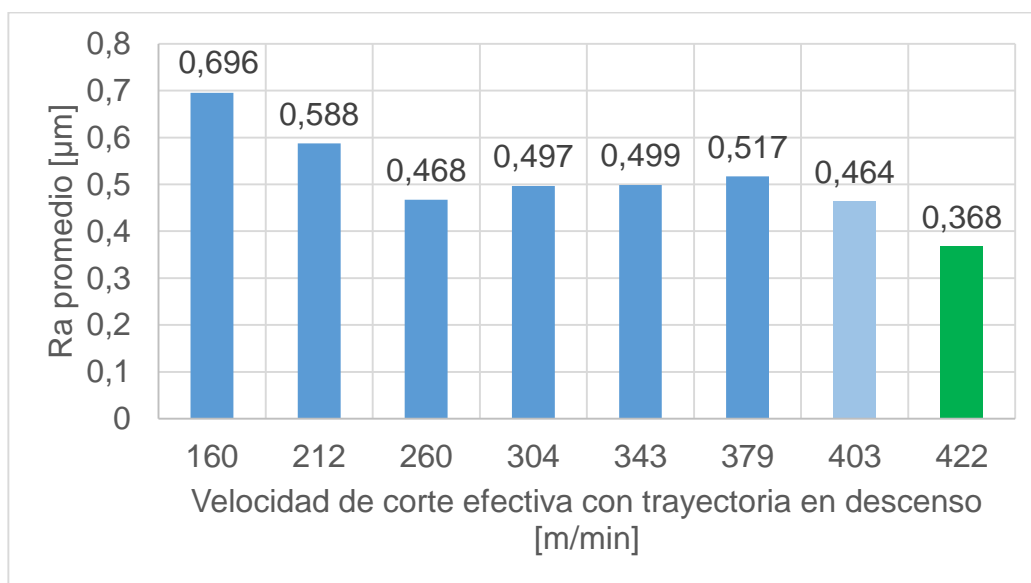
#### 4.11.2 Velocidad de corte efectiva óptima

Como ya se había mencionado, la velocidad de corte efectiva con trayectoria en ascenso es diferente que con trayectoria en descenso. La velocidad de corte óptima con trayectoria en ascenso es 416 m/min en la pendiente 57,5°, donde se consigue una rugosidad promedio menor como se ve en la **figura 56**.



**Figura 56.** Velocidad de corte efectiva óptima con trayectoria en ascenso.

La velocidad de corte óptima con trayectoria en descenso es 422 m/min en la pendiente de 87,5°, donde se consigue una rugosidad promedio menor como se ve en la **figura 57**.

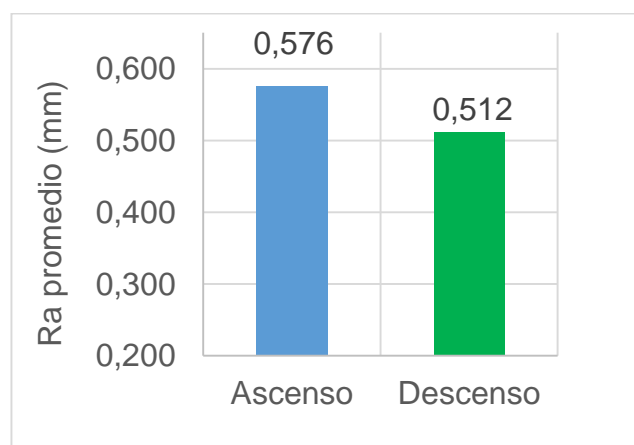


**Figura 57.** Velocidad de corte efectiva óptima con trayectoria en descenso.

Se determina que la velocidad de corte efectiva óptima promedio para trayectorias en ascenso o descenso es de 422 m/min.

#### 4.11.3 Trayectoria óptima

Para estrategias de contorno y paralelo se tiene una rugosidad promedio menor con trayectorias en descenso como se muestra en la **figura 58**.



**Figura 58.** Óptima trayectoria.

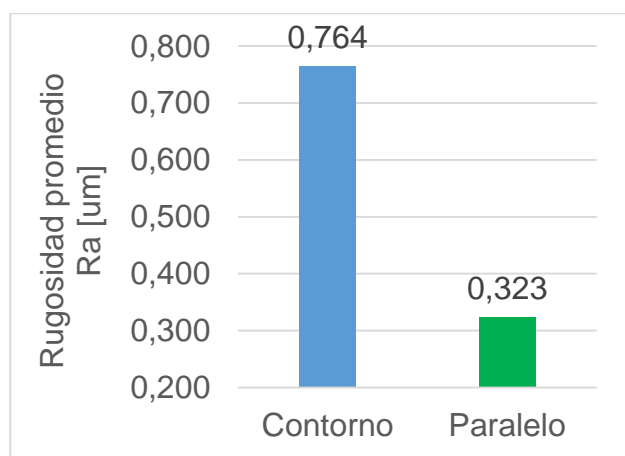
Se determina que la trayectoria en descenso es óptima en estrategias de contorno y paralelo, el porcentaje de la rugosidad promedio obtenida con trayectorias en descenso disminuye un 11,1 % con relación a trayectorias en ascenso.

Sin embargo con estrategias de contorno en descenso, si la velocidad de corte efectiva es menor a 260 m/min, la rugosidad aumenta significativamente.

#### 4.11.4 Estrategia óptima

La estrategia que obtiene una menor rugosidad es la de paralelo, la rugosidad obtenida disminuye en un 57,8 % con relación a la estrategia de contorno, como se ve en la **figura 59**.

En la **tabla 20**, se muestra los resultados de cada análisis que permiten proponer una estrategia de mecanizado óptima.



**Figura 59.** Estrategia óptima.

**Tabla 20***Resultados para una estrategia óptima.*

Condiciones	Resultado óptimo
<b>Velocidad de corte efectiva</b>	422 [m/min]
<b>Trayectoria</b>	Descenso
<b>Estrategia</b>	Paralelo

La velocidad de corte varía con las pendientes, de modo que, no es posible fijar una velocidad de corte para toda una superficie 3D, debido a esto es importante establecer un rango de velocidad de corte efectiva que obtenga una menor rugosidad y también determinar la velocidad crítica que perjudique el acabado superficial.

#### 4.12 Velocidad de corte crítica

Como se describe en la **figura 5** del capítulo II, la velocidad de corte crítica en función de la temperatura para el mecanizado de aleaciones de aluminio es de 200 m/min, bajo este valor se considera velocidades convencionales, y superando este valor, se trabaja con altas velocidades de corte (HSM).

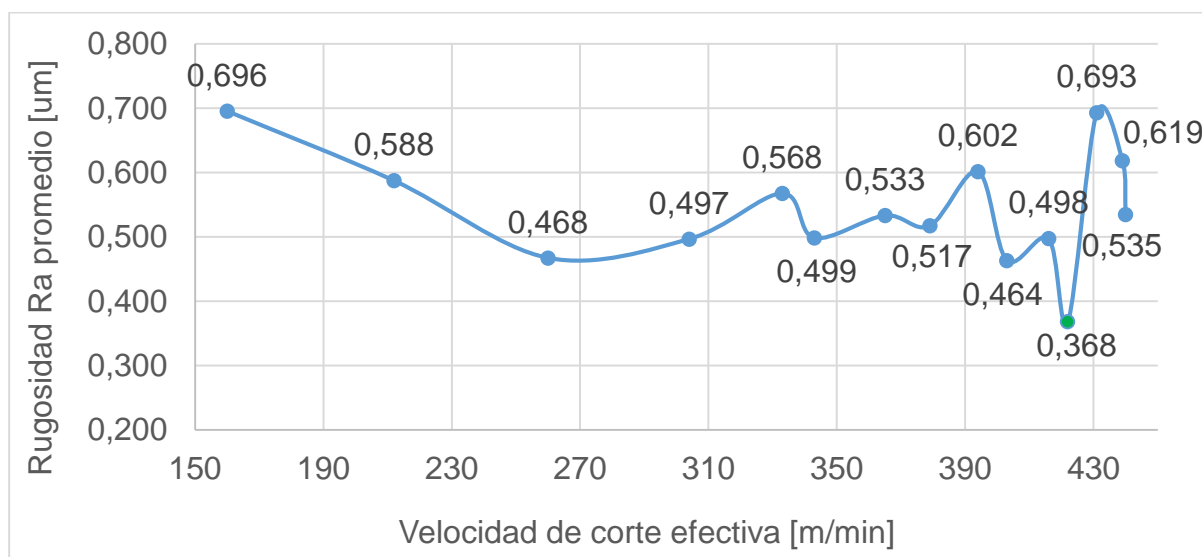
Para determinar la velocidad de corte crítica en función de la rugosidad, se calcula el promedio de la rugosidad en cada velocidad de corte efectiva como se indica en la **tabla 21**.

**Tabla 21**

*Rugosidad Ra promedio en cada velocidad de corte.*

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 150px;"> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; margin-bottom: 5px;"></div> Trayectoria en Ascenso         </div> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 10px; background-color: #ADD8E6; margin-bottom: 5px;"></div> Trayectoria en Descenso         </div>				
No	Vcef [m/min]	Ra Contorno [μm]	Ra Paralelo [μm]	Ra Promedio [μm]
1	160	1,053	0,338	0,696
2	212	0,877	0,298	0,588
3	260	0,665	0,270	0,468
4	304	0,695	0,299	0,497
5	333	0,840	0,295	0,568
6	343	0,701	0,296	0,499
7	365	0,758	0,309	0,533
8	379	0,714	0,321	0,517
9	394	0,844	0,359	0,602
10	403	0,601	0,326	0,464
11	416	0,725	0,270	0,498
12	422	0,475	0,261	0,368
13	431	0,912	0,474	0,693
14	439	0,896	0,341	0,619
15	440	0,714	0,356	0,535

En la **figura 60**, se muestra el comportamiento de la rugosidad con respecto a la velocidad de corte efectiva desde 160 a 440 m/min.



**Figura 60.** Rugosidad Ra vs Velocidad de corte efectiva.

La rugosidad disminuye a medida que la velocidad de corte aumenta hasta una velocidad de 260 m/min, posterior a ello la rugosidad tiene variaciones regulares casi uniformes, hasta que a 422 m/min se obtiene la menor rugosidad.

De forma análoga se considera que trabajar con HSM desde 260 a 422 m/min se mejora la calidad superficial a comparación de la que se obtiene con velocidad convencional.

Se determina que la velocidad de corte crítica es de 160 m/min, considerada dentro de la velocidad convencional, en donde se obtiene mayor rugosidad.

Trabajar con HSM no significa que siempre se conseguirá una mejor rugosidad, ya que se evidenció que cuando la velocidad llega a 431 m/min la rugosidad aumentó de manera contundente.

#### 4.13 Resultados del análisis

En la **tabla 22** se muestra los mejores resultados del análisis para cada estrategia, en condiciones que permitan una menor rugosidad superficial.

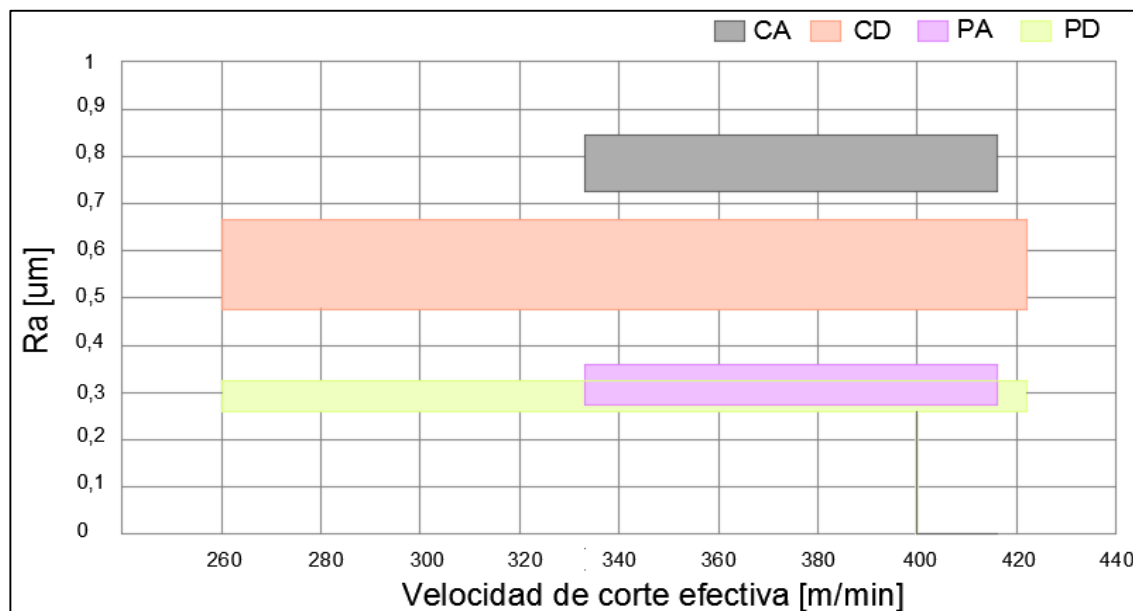


**Tabla 22**

Resultados óptimos de cada estrategia.

Diámetro herramienta = 14mm Fz = 0,05 mm Vf = 2000mm/min ap = 0,2 ae = 0,2 mm N= 10000 RPM				
No	Estrategia / Trayectoria	Pendiente [°]	Vcef [m/min]	Ra promedio [μm]
1	Contorno en ascenso (CA)	35° a 57,5°	333 a 416	0,791
2	Contorno en descenso (CD)	50° a 87,5°	260 a 422	0,641
3	Paralelo en ascenso (PA)	35° a 57,5°	333 a 416	0,308
4	Paralelo en descenso (PD)	50° a 87,5°	260 a 422	0,295

Con estas condiciones se han encontrado valores de rugosidad menores en cada estrategia y en la **figura 61**, se muestra el rango de velocidad de corte óptimo para cada estrategia.



**Figura 61.** Rango de velocidad de corte óptimo para cada estrategia.

En la práctica hay que tener en cuenta el diseño CAD a mecanizar, si se tiene un diseño con pendientes pequeñas, es recomendable realizar estrategias con trayectoria en ascenso siempre que la velocidad de corte efectiva sea igual o mayor a 260 m/min.

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

El estudio de mecanizado en el material 7075 T6 (Produx) se realizó en seco y a altas velocidades de corte (HSM), puesto que, es favorable con el medio ambiente al reducir insumos de refrigerante y tiempos de mecanizado sin perjudicar la calidad superficial. Los resultados del experimento permitieron encontrar las condiciones para seleccionar estrategias de mecanizado óptimas. Las condiciones más significantes que se encontraron en este proyecto son:

- La velocidad de corte efectiva es un parámetro que influye en el mecanizado para obtener menor rugosidad superficial, donde se determinó que la velocidad de corte óptima para todas las estrategias es de 422 m/min.
- Trayectorias en descenso reduce la rugosidad en un 11,1 % con respecto a la que se obtiene con trayectorias en ascenso, sin embargo hay que tener en cuenta que la velocidad de corte efectiva no sea menor de 260 m/min, caso contrario hay que seleccionar estrategias con trayectoria en ascenso.
- Estrategia de paralelo reduce la rugosidad en un 57,8% con respecto a la que se obtiene con estrategia de contorno.
- La estrategia de mecanizado que muestra una menor rugosidad es la de Paralelo con trayectoria en Descenso (PD), con un rango de velocidad de corte efectiva entre 260 m/min a 422 m/min, que presenta un valor de rugosidad promedio Ra de 0,295  $\mu\text{m}$  como se indica en la tabla 22.

- El tiempo de mecanizado que se obtiene con estrategias de contorno es menor con relación a estrategias de paralelo en un 30 %.
- El tipo de desgaste que sufrió el filo de la herramienta tras 420 metros mecanizados es el filo recrecido BUE, con un valor máximo del filo recrecido de 0,03 mm.
- El fabricante de la herramienta de carburo con revestimiento TiAlN, recomienda trabajar con velocidad de corte de 100 a 420 m/min, sin embargo, en este estudio se encontró que la velocidad de corte óptima está entre 260 m/min a 422 m/min, donde se encuentra menor rugosidad tal como se indicó en la figura 60.
- Trabajar con HSM no significa que siempre se conseguirá una mejor rugosidad, ya que se evidenció que cuando la velocidad llega a 431 m/min, la rugosidad aumentó de manera contundente.

## 5.2 Recomendaciones

- El mecanizado en seco es favorable para el medio ambiente, sin embargo en el momento de mecanizado se aprecia acumulación de partículas de viruta sobre las superficies del material y la herramienta que puede afectar la calidad superficial, entonces se recomienda realizar experimentos utilizando la técnica MQL en el proceso de mecanizado.
- Como la velocidad de corte óptima es de 422 m/min, se recomienda realizar ensayos con velocidad de avance superior a 2000 mm/min que se utilizó como constante en este experimento para de esta manera mejorar los tiempos en el mecanizado.

- Debido al comportamiento que tiene la rugosidad a medida que se aumenta la velocidad de corte, se recomienda efectuar experimentos con velocidad de corte superior a 440 m/min, ya que en la figura 5, se muestran estudios a velocidad de 2400 m/min como máximo.
- La herramienta que se utilizó en este proyecto es de carburo con revestimiento TiAlN, dando excelentes resultados con poco desgaste en los filos y en la punta de la fresa esférica, en la actualidad se desea aumentar las velocidades de corte al máximo, entonces se recomienda realizar una investigación que presente la influencia de la velocidad de corte en el desgaste de herramientas de este tipo.
- En el capítulo II de este proyecto se muestra la curva propuesta por el Dr. Salomon en donde se aprecia el comportamiento de la temperatura a medida que se aumenta la velocidad de corte en diferentes tipos de materiales, sin embargo, es una curva muy generalizada, entonces se recomienda realizar una investigación que presente la variación de la temperatura con respecto a la velocidad de corte en el material específico de aleación de aluminio 7075 T6.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aneiro, M. B. (2007). Conceptos del maquinado con altas velocidades de corte aplicado en moldes y matrices. *Ediciones Mecánicas*, 63–69.
- Bohman. (2016). *Duraluminio para moldes plásticos*. Guayaquil: Bohman.
- Chen, J. H. (2005). A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process. *Machine Tools & Manufacture*, 1077–1084.
- Egyetem, Ó. (2014). Study of z-level finishing milling strategy. *Development in Machining Technology*, 83–90.
- Emco. (2015). *Emco Concept Mill 260 Centro de mecanizado vertical controlado por PC Descripción de máquina*. Austria: Emco.
- Gokkaya, H. &. (2008). The effects of cutting speed and feed rate on Bue-Bul formation, cutting forces and surface roughness when machining Aa6351 (T6) alloy. *Journal of Mechanical Engineering*, 521–530.
- HSM Works. (2018). *Catálogo de software HSMWorks CAM*. California: Autodesk Inc.
- Izartool. (2017). *Catálogo de parámetros de corte de herramientas Izar Tool*. España: Izartool.
- Jomaa, W. S. (2014). Surface finish and residual stresses induced by orthogonal dry machining of AA7075-T651. *Materials*, 1603–1624.
- Kendu. (2014). *Catalogo de parámetros de corte katalog*. Vasco: Kendu.

- Kopac, J. (2003). Advanced tool materials for high-speed machining. In Achievements in mechanical and materials engineering. *In Achievements in mechanical and materials engineering*, 1120–1128.
- López de Lacalle Marcaide, L. M. (2004). *Mecanizado de Alto Rendimiento*. Bilbao: Izaro, Ed. (1st ed.).
- MITUTOYO. (2016). *QUICK GUIDE TO SURFACE*. Korea: MITUTOYO.
- S Kalpakjian S R, S. (2016). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México: Pearson.
- TOOLMEX. . (2015). *Catálogo de herramientas de corte ToolMex*. EEUU: ToolMex.
- V. Songmene, R. I. (2011). Dust Emission During Dry Machining of Aeronautic Aluminum Alloys. *Machining and Machinability of Aluminum Alloys.*, 378–400.
- Wang, J. Z. (2017). Residual Stresses Analysis in Ball end Milling of Nickel-Based Superalloy Inconel 718. *Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology.*, 1681–1689.