

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Tesis previa a la obtención del título de:**  
**INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:**  
**ESTUDIO DE LOS EFECTOS EN LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN**  
**ALEACIONES DE ALUMINIO 7075T6 AL APLICAR PARÁMETROS DE**  
**CORTE Y ESTRATEGIAS DE MECANIZADO EN FRESADO 3D**

**AUTORES:**  
**JORGE LUIS PINCHA ANDRANGO**  
**JUAN ALEXANDER PILLAJO ROJAS**

**TUTOR:**  
**RENÉ PATRICIO QUITIAQUEZ SARSOZA**

**Quito, julio del 2019**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Jorge Luis Pincha Andrango y Juan Alexander Pillajo Rojas, con documentos de identificación N° 1717583809 y N° 1723248272, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “ESTUDIO DE LOS EFECTOS EN LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN ALEACIONES DE ALUMINIO 7075T6 AL APLICAR PARÁMETROS DE CORTE Y ESTRATEGIAS DE MECANIZADO EN FRESADO 3D”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en forma impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Jorge Luis Pincha Andrango  
C.I. 1717583809



---

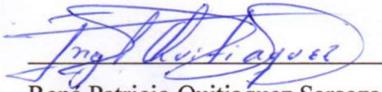
Juan Alexander Pillajo Rojas  
C.I. 1723248272

Quito, julio 2019

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo Proyecto Técnico, “ESTUDIO DE LOS EFECTOS EN LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN ALEACIONES DE ALUMINIO 7075T6 AL APLICAR PARÁMETROS DE CORTE Y ESTRATEGIAS DE MECANIZADO EN FRESADO 3D” realizado por Jorge Luis Pincha Andrango y Juan Alexander Pillajo Rojas, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio 2019



René Patricio Quitiaquez Sarsoza  
C.I. 1710597269

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A la memoria de mi madre Gloria María Rojas, que con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mis hermanos Alexandra, Daniel y Viviana por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias, de verdad mil gracias hermanitos.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a Paulina, por apoyarme cuando más lo necesite, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, siempre te llevo en mi corazón.

Juan Alexander Pillajo Rojas

Dedico esta tesis a Dios nuestro señor, pues ante todas las adversidades me dio la fuerza para seguir adelante y no desfallecer.

A mi hermosa madre Ruth Marina Andrango, quien siempre confió en mí y junto con su apoyo incondicional pude lograr este objetivo, quiero enfatizar que gracias a los valores que inculcó en mí he logrado convertirme en el hombre de ahora ¡gracias madre!

Finalmente quiero dedicar esta tesis a los amores de mi vida. Isabella Pincha mi hija y Jessica Vera mi esposa por acompañarme en este duro camino, siempre estaré agradecido, las amo.

Jorge Luis Pincha Andrango

## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia, amigos y en especial al área de Operaciones Terrestres de Avianca Ecuador, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De igual manera a mi tutor de tesis, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

Juan Alexander Pillajo Rojas

A mi familia, amigos, mi tutor de tesis, y profesores de la universidad por haberme guiado a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por ayudar a los jóvenes a desarrollarse laboralmente como profesionalmente.

Jorge Luis Pincha Andrango

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	v
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. Aluminio.....	1
1.1.1. Aleaciones del aluminio.....	2
1.1.2. Aleación de Aluminio AA 7075-T6 .....	3
1.2. Maquinado .....	5
1.2.1. Fresado .....	5
1.2.2. Fresadoras verticales.....	5
1.2.3. Centro de mecanizado CNC.....	6
1.2.4. Parámetros de Fresado .....	8
1.2.5. Velocidad de corte .....	8
1.2.6. Diámetro efectivo .....	9
1.2.7. Velocidad de corte efectiva.....	10
1.2.8. Avance por diente.....	10
1.2.9. Velocidad de avance .....	10
1.2.10. Profundidad de pasada axial y radial .....	10
1.3. Mecanizado de alta velocidad.....	11
1.3.1. Mecanizado en seco.....	14
1.4. Herramientas .....	14
1.4.1. Carburo de tungsteno .....	15
1.4.2. Herramienta de Carburo con revestimiento TiAlN .....	16
1.4.3. Parámetros de corte para aleaciones de aluminio.....	17
1.5. Trayectorias de mecanizado .....	17
1.6. Estrategias de mecanizado.....	18
Estrategias           Descripción .....	19
Esquema .....	19

1.7.	Rugosidad .....	20
1.7.1.	Rugosidad media aritmética ( $R_a$ ).....	22
1.7.2.	Rugosidad de la raíz media cuadrática ( $R_q$ ) .....	22
1.7.3.	Profundidad media de rugosidad ( $R_z$ ) .....	23
1.8.	Equipo de medición.....	23
1.9.	Taguchi .....	24
1.9.1.	Arreglo ortogonal (AO) .....	25
1.10.	Análisis de la varianza ANOVA .....	25
1.10.1.	Notaciones para el análisis ANOVA .....	26
1.10.2.	Varianza .....	26
1.10.3.	Prueba F de Fisher .....	26
1.10.4.	Porcentaje de influencia $P$ .....	27
1.10.5.	Grados de libertad.....	28
1.10.6.	Prueba de la hipótesis .....	28
1.10.7.	Hipótesis nula ( $H_0$ ) .....	28
1.10.8.	Hipótesis alternativa ( $H_1$ ).....	28
CAPÍTULO II.....		29
METODOLOGÍA.....		29
2.1.	Generalidades.....	29
2.2.	Selección de parámetros de corte.....	29
2.3.	Selección de la estrategia de mecanizado.....	29
2.4.	Definición de parámetros de maquinado y niveles .....	30
2.5.	Modelo CAD.....	30
2.6.	Modelo CAM.....	32
2.6.1.	Programación CAM.....	32
2.7.	Aplicación del método Taguchi .....	36
2.7.1.	Grados de libertad del estudio experimental.....	36
2.8.	Resultados de la medición de rugosidad $R_a$ .....	39
CAPÍTULO III .....		41
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		41
3.1.	Análisis de rugosidad $R_a$ media por ensayo .....	41
3.2.	Análisis de rugosidad $R_a$ media por Estrategia de mecanizado .....	42
3.3.	Análisis de rugosidad $R_a$ media por Velocidad de corte efectiva .....	44
3.4.	Análisis de rugosidad $R_a$ media por avance por diente .....	45
3.5.	Rugosidad por velocidad de corte efectiva en estrategias de mecanizado.	

3.5.1.	Comparación de estrategias de mecanizado por velocidad de corte ....	48
3.6.	Rugosidad por avance en estrategias de mecanizado.....	49
3.6.1.	Comparación de estrategias por avance.....	51
3.7.	Aplicación del método ANOVA.....	52
3.7.1.	Modelo de cálculo para el factor A .....	52
3.7.2.	Resultados del método ANOVA .....	55
3.7.3.	Prueba de hipótesis .....	56
3.8.	Análisis de la varianza.....	56
3.9.	Niveles óptimos de mecanizado.....	57
3.10.	Predicción de la rugosidad .....	58
3.11.	Validación de la rugosidad prevista.....	60
3.12.	Intervalo de confianza.....	61
3.13.	Análisis de costos .....	62
3.13.1.	Costos directos .....	62
3.13.2.	Costos indirectos .....	63
3.13.3.	Costos totales.....	64
3.14.	Conclusiones .....	64
3.15.	Recomendaciones .....	66
REFERENCIAS	.....	67

## Índice de Tablas

Tabla 1. Códigos para aleaciones de aluminio forjado y fundido [2].....	2
Tabla 2. Notaciones básicas del templado para aleaciones de aluminio [3].....	3
Tabla 3. Denominaciones de temple para aluminio aleado [3].....	3
Tabla 4 Composición química de la aleación aluminio AA-7075-T6 [5] .....	4
Tabla 5. Características físicas de la aleación AA-7075-T6 .....	4
Tabla 6. Propiedades mecánicas de la aleación AA-7075-T6 [4] .....	4
Tabla 7. Áreas de aplicación de la aleación AA-7075-T6 [3].....	5
Tabla 8. Datos Técnicos EMCO Concept Mill [8].....	7
Tabla 9. Estrategia óptima de mecanizado HSM para operaciones de acabado 3D [11].....	13
Tabla 10. Características de las principales herramientas de corte [3].....	15
Tabla 11. Propiedades físicas y mecánicas del carburo de tungsteno [2].....	15
Tabla 12. Propiedades físicas de fresa Guhring [16].....	16
Tabla 13. Dimensiones de fresa Guhring [16] .....	16
Tabla 14. Parámetros de corte para fresado en aleaciones de aluminio [17] .....	17
Tabla 15. Estrategias de acabado [18] .....	19
Tabla 16. Especificaciones rugosímetro MITUTOYO SJ210 [22] .....	24
Tabla 17. Notaciones para el análisis ANOVA [27] .....	26
Tabla 18. Parámetros de corte definidos para la experimentación.....	30
Tabla 19. Resultado del cálculo de velocidad de corte efectiva y velocidad de avance .....	31
Tabla 20. Arreglo ortogonal de los ensayos L27.....	37
Tabla 21. Detalle del orden de parámetros y factores.....	38
Tabla 22. Resultados del experimento .....	40
Tabla 23. Ensayo que presenta la menor rugosidad .....	42
Tabla 24. Rugosidad Ra media en cada estrategia de mecanizado .....	42
Tabla 25. Porcentaje de reducción del mejor resultado con relación a los demás .....	43
Tabla 26. Rugosidad Ra media en cada velocidad de corte efectiva.....	44
Tabla 27. Porcentaje de reducción del mejor resultado con relación a las demás Vc	44
Tabla 28. Rugosidad Ra media en cada avance por diente .....	45
Tabla 29. Porcentaje de reducción del mejor resultado con relación a los demás Fz.	46
Tabla 30. Promedio de la rugosidad Ra respecto a Vc por cada estrategia .....	46
Tabla 31. Promedio de la rugosidad Ra respecto al avance por cada estrategia .....	49

Tabla 32. Distribución F ( $\alpha = 0,05$ en la cola a la derecha).....	55
Tabla 33. Resultados ANOVA. ....	55
Tabla 34. Resultados del análisis de la varianza de los niveles según sus factores ...	56
Tabla 35. Resultados de la rugosidad calculada con el avance óptimo de 0,1 mm/z .	59
Tabla 36. Parámetros óptimos de mecanizado. ....	60
Tabla 37. Menor valor de rugosidad promedio del ensayo.....	62
Tabla 38. Costo de materiales utilizado en los ensayos.....	63
Tabla 39. Costos directos por servicio de equipos .....	63
Tabla 40. Costo indirectos en el proyecto.....	64
Tabla 41. Costos totales del proyecto .....	64

## Índice de Figuras

Figura 1. Movimientos en fresadora vertical [7].....	6
Figura 2. Centro de mecanizado Emco Concept Mill 260 de 3 ejes. [8].....	7
Figura 3. Métodos Modernos de fresado [7].....	8
Figura 4 Corte ascendente y descendente con fresa punta redonda [9].....	9
Figura 5. Esquema del corte con herramienta esférica [10].....	11
Figura 6. Curvas de Salomon [9].....	12
Figura 7. Fuerzas de corte a diferentes velocidades en aleaciones de Al (AA) [14]..	13
Figura 8. Fresa de acabado punta redonda marca Guhring de diámetro 14 mm [16]	16
Figura 9. Parámetros de corte de fresa de acabado punta redonda [18] .....	17
Figura 10. Mecanizado de una cavidad de una estampa [9] .....	18
Figura 11. Proceso de medición de rugosidad [3] .....	20
Figura 12. Medición de rugosidad de fresado con z constante [20].....	21
Figura 13. Trayectoria paralela de fresado [21] .....	22
Figura 14. Valor media aritmética [22].....	22
Figura 15. Profundidad media de rugosidad [22].....	23
Figura 16. Rugosímetro MITUTOYO SJ 210 [22] .....	24
Figura 17. Modelo CAD para el experimento. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	31
Figura 18. Relación entre pendiente, diámetro efectivo y velocidad de corte. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo.....	32
Figura 19. Estrategias a) Contorno en descenso CD, b) Paralelo en descenso PD ....	32
Figura 20. Configuración de la herramienta. Fuente: Captura de <i>Solidworks</i> .....	33
Figura 21. Configuración de velocidad y avance de corte. Fuente: Captura de <i>Solidworks</i> .....	34
Figura 22. Configuración de parámetros de profundidad, dirección y trayectoria. Fuente: Captura de <i>Solidworks</i> .....	34
Figura 23. Simulación de la estrategia de acabado contorno. Fuente: Captura de <i>Solidworks</i> .....	35
Figura 24. Postprocesado de códigos. Fuente: Captura de <i>Solidworks</i> .....	35
Figura 25. Medición de la rugosidad superficial. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	39

Figura 26. Rugosidad obtenida por ensayo. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	42
Figura 27. Rugosidad Ra media vs Estrategias de mecanizado. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo.....	43
Figura 28. Rugosidad Ra media vs Velocidad de corte. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	44
Figura 29. Rugosidad Ra media vs Avance por diente. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	45
Figura 30. Rugosidad Ra vs Velocidad de corte efectiva con CD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	47
Figura 31. Rugosidad Ra vs Velocidad de corte efectiva con PAD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	47
Figura 32. Rugosidad Ra vs Velocidad de corte efectiva con PD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	48
Figura 33. Comparación de Ra vs VC con las diferentes estrategias. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	49
Figura 34. Rugosidad Ra vs Fz con estrategia CD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	50
Figura 35. Rugosidad Ra vs Fz con estrategia PAD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	50
Figura 36. Rugosidad Ra vs Fz con estrategia PD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	51
Figura 37. Rugosidad vs avance con cada estrategia. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo .....	52
Figura 38. Efecto de los factores en operaciones de fresado 3D. Fuente: Captura de <i>Minitab</i> .....	58
Figura 39. Rugosidad Ra media vs estrategia y velocidad de corte. Fuente: Captura de <i>Minitab</i> .....	59
Figura 40. Medición de rugosidad con parámetros óptimos. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo.....	60

## RESUMEN

El presente proyecto investiga la calidad superficial obtenida en el material de aleación de aluminio AA 7075 T6 al variar los parámetros de corte y estrategias de mecanizado 3D en. Donde, se ha escogido tres tipos de estrategias de acabado 3D para el mecanizado de superficies inclinadas, y se analiza la calidad superficial obtenida a través de la medición de la rugosidad. En los experimentos se varía la velocidad de corte efectiva, el avance por diente y se mantiene constante la profundidad de corte y velocidad del husillo conforme al recomendado por el fabricante de la herramienta. La velocidad de corte varía a lo largo del filo de la fresa punta redonda. El diseño CAD de la probeta a mecanizar contiene tres pendientes, de  $60, 5^\circ$  a  $68, 5^\circ$  en intervalos de  $86, 5^\circ$ . Se utilizó una metodología estadística Taguchi, donde se obtuvo un arreglo ortogonal de 27 ensayos a realizar, combinando los factores de estrategia de mecanizado, velocidad de corte efectiva y avance. Se mecanizan las probetas en un centro de mecanizado CNC y se mide la rugosidad superficial. Con los resultados se realiza un análisis estadístico ANOVA y se encontró que la estrategia que presenta mejor calidad superficial es la de paralelo con trayectoria en descenso (PD), velocidad de corte de 360 m/min y un avance por diente de 0,1 mm/z.

**Palabras clave:** parámetros de corte, estrategias de mecanizado, rugosidad superficial

## ABSTRACT

This research project investigates the influence of cutting parameters and 3D machining strategies on the surface quality obtained in the AA 7075 T6 aluminum alloy material. Where, three types of 3D finishing strategies have been chosen for the machining of inclined surfaces, and the surface quality obtained through the measurement of the roughness is analyzed. In the experiments, the cutting speed, the feed per tooth is varied and the parameters of the cutting depth and spindle speed are kept constant, in accordance with that recommended by the tool manufacturer. The cutting speed varies along the edge of the round tip milling cutter. The CAD design of the specimen to be machined contains three slopes, from  $60.5^\circ$  to  $68.5^\circ$  in  $86.5^\circ$  intervals. A Taguchi statistical methodology was used, where all the variables were combined, therefore, 27 trials are carried out. An ANOVA statistical analysis of the results was performed and it was found that the strategy with the best surface quality is parallel with a downward path (PD), with a cutting speed of 360 m / min and an advance of 0.1 mm / z.

**Keywords:** cutting parameters, strategies of machining, surface roughness

## INTRODUCCIÓN

Las investigaciones en procesos de mecanizado en aleaciones de aluminio AA-7075 T6, tiene un gran interés en la industria metalmecánica, de moldes de plástico e industria aeronáutica debido a su alta resistencia mecánica, buena maquinabilidad y bajo peso [1]. En un artículo de Capla et al. [2], indica que, para el fresado en superficies inclinadas, la velocidad de corte varía alrededor del filo de la fresa punta redonda en el punto de contacto con la superficie y presenta valores de rugosidad menores con altas velocidades de corte en este caso 188 m/min.

Un estudio de mecanizado a altas velocidades de corte HSM desarrollado por Vaca [3], propone un rango de velocidades de corte óptimas desde 260 a 420 m/min con trayectorias en descenso.

Un artículo de Lee et al. [4], determina, que el fresado con trayectoria en ascenso, presenta mayor estabilidad de corte y menor flexión de la herramienta, sin embargo, no presenta resultados de calidad superficial.

Un estudio presentado por Pasko et al. [5], indica que la velocidad de tiene un efecto dominante en la calidad superficial, y que esta disminuye cuando la velocidad de corte aumenta.

El presente proyecto desea analizar los efectos de la rugosidad superficial al aplicar parámetros de corte con diferentes estrategias de mecanizado de fresado 3D en superficies inclinadas. Se utilizará altas velocidades de corte, de 320, 360 y 420 m/min, la velocidad de avance será de 3000, 4000 y 5000 mm/min, con tres diferentes estrategias de mecanizado y determinar los parámetros de corte, estrategia y trayectoria óptimos, para obtener una menor rugosidad superficial en función de la rugosidad Ra medida.

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

Este capítulo se concentra en la descripción de las aleaciones de aluminio, su composición, nomenclatura, características tanto físicas como químicas lo cual permite conocer el campo de aplicación, principalmente en aleación de aluminio AA-7075 T6.

Se presenta también el proceso de mecanizado en fresado CNC, mencionando, fórmulas, cálculos y parámetros de corte importantes al momento de seleccionar una herramienta de corte de acabado. Se menciona las estrategias de mecanizado 3D definiendo diferentes trayectorias, las cuales generan diferentes acabados superficiales, Se menciona la rugosidad teórica y las fórmulas para determinarla.

Se presenta también el método estadístico Taguchi para la optimización del proceso y el análisis de la varianza ANOVA con sus respectivas ecuaciones. Este método estadístico será aplicado en el capítulo del análisis de resultados.

### 1.1. Aluminio

El metal más abundante en el planeta ocupa el tercer lugar en abundancia en la corteza terrestre aproximadamente el 7,5% en masa. En la naturaleza no se encuentra en forma elemental se la extrae de minerales como ortoclasa, el berilio, la criolita y el corindón [6].

Es uno de los metales más versátiles con densidad de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  y alta resistencia a la tensión lo que permite que pueda estirarse o alargarse. El aluminio es maleable con él se puede formar láminas muy delgadas [6].

Sus propiedades mejoran en forma considerable con pequeñas proporciones con metales formando aleaciones con zinc, cobre, magnesio, manganeso o silicio con gran uso en construcción de aeronaves. Se lo considera inofensivo y metal activo puesto que no reacciona con el agua como lo hace el sodio y calcio [6].

### 1.1.1. Aleaciones del aluminio

Las aleaciones de aluminio (AA) tienen una nomenclatura de 4 números. Existen dos grupos de aleaciones que poseen características, propiedades mecánicas y aplicaciones distintas denominados aleaciones maleables o de forja y aleaciones de fundición en la Tabla 1 se puede observar sus designaciones [7].

Tabla 1. Códigos para aleaciones de aluminio forjado y fundido [2]

Aleación	Códigos para forjado	Códigos para fundido
Al, pureza de 99,0%	1XXX	1XX,X
Cu	2XXX	2XX,X
Mn	3XXX	
Si + Cu o Mg		3XX,X
Si	4XXX	4XX,X
Mg	5XXX	5XX,X
Mg y Si	6XXX	
Zn	7XXX	7XX,X
Sn		8XX,X
Otros	8XXX	9XX,X

Tomando en cuenta que las propiedades del aluminio aleado tienen inferencia en el endurecimiento por trabajo y tratamientos térmicos en la Tabla 2 se muestra la nomenclatura para el templado del aluminio aleado [7].

Tabla 2. Notaciones básicas del templeado para aleaciones de aluminio [3]

Templado	Detalle
F	En estado tosco de fabricación (No hay control sobre la cantidad de endurecimiento o deformación)
O	Recocido (Templado con la más baja solidez y la más alta ductilidad)
H	Endurecido por tensión mediante trabajo en frío
T	Tratado térmicamente
W	Solo tratado con soluciones (temple inestable)

### 1.1.2. Aleación de Aluminio AA 7075-T6

Una de las aleaciones más importantes del aluminio aleado es la AA-7075-T6 conocido como Prodax en la industria con alta resistencia alcanzando valores superiores a 550 Mpa, laminado al caliente existentes en el mercado como barras redondas y placas con las siguientes características descritas en Tabla 3 [8]. El tratamiento térmico T6 hace referencia a que el material es solubilizado y después envejecido en forma artificial, aumentando resistencia mecánica [7].

Tabla 3. Denominaciones de temple para aluminio aleado [3]

Característica	Descripción
Buena maquinabilidad	Altas velocidades de corte, menor costo herramental, entregas más rápidas.
Bajo peso	Aproximadamente la tercera parte del peso del acero.
Alta Conductividad térmica	Se reduce el tiempo de los ciclos y se pueden utilizar sistemas de enfriamiento menos complicados.
Buena resistencia a la corrosión	Buena resistencia contra ataques corrosivos en los plásticos habitualmente usados.
Apropiado para tratamientos superficiales	Anodizado duro, cromado o niquelado, para incrementar su dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión.

En la Tabla 4 se observa la composición química de la aleación aluminio AA-7075-T6.

Tabla 4. Composición química de la aleación aluminio AA-7075-T6 [5]

Composición	Rangos
Si	0,40 (máx) %
Fe	0,50 (máx) %
Cu	1,20 – 2,00 %
Mg	2,10 – 2,90 %
Cr	0,18 – 0,28 %
Zn	5,10 – 6,10 %
Ti	0,20 %
Al	Al resto
Mn	0,30 (máx) %

La Tabla 5 muestra las características físicas de la aleación aluminio AA-7075-T6.

Tabla 5. Características físicas de la aleación AA-7075-T6

Característica	Valor
Densidad	2830 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	71500 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	23 x 10 <sup>6</sup> por °C de 20 °C a 100 °C
Conductividad térmica	165 W/m C
Calor específico	890 J/kg C

Las propiedades mecánicas de la aleación AA-7075-T6 se muestran en Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de la aleación AA-7075-T6 [4]

Barras redondas (diámetro) mm	Resistencia a la tracción N/mm <sup>2</sup>	Límite de fluencia N/mm <sup>2</sup>
40	680	630
100	680	620
200	670	610

Las propiedades y características de la aleación AA-7075-T6 lo han convertido en un material ideal para la industria aeronáutica y para el moldeo de series cortas y medianas, en la Tabla 7 se muestra las áreas de aplicación.

Tabla 7. Áreas de aplicación de la aleación AA-7075-T6 [3]

Aplicación	Prototipos	Series cortas	Series medianas	Series largas
Moldes de soplado	X	X	X	X
Formado al vacío	X	X	X	X
Moldes de espuma	X	X	X	X
Moldes	X	X	X	X
Moldes de inyección	X	X	X	
Moldeo de goma	X	X		

## 1.2. Maquinado

Es la elaboración de piezas mediante el proceso de arranque de viruta, se obtienen productos con dimensiones y acabado superficial deseados. Resulta favorable hacia el fabricante lograr obtener dichas piezas con tolerancias y alta calidad superficial [9].

### 1.2.1. Fresado

Consiste en la elaboración de piezas con una herramienta de corte rotativa de varios filos la que ejecuta movimientos de avance contra otra pieza en cualquier dirección, se lo usa generalmente en mecanizado de superficies planas y con ayuda de la tecnología se puede producir diferentes formas y superficies [10].

### 1.2.2. Fresadoras verticales

En las máquinas convencionales de 3 ejes, las principales acciones que se realizan son generalmente caras planas, escuadras y ranuras, en la Figura 1 se muestra el movimiento de una fresadora vertical [10].

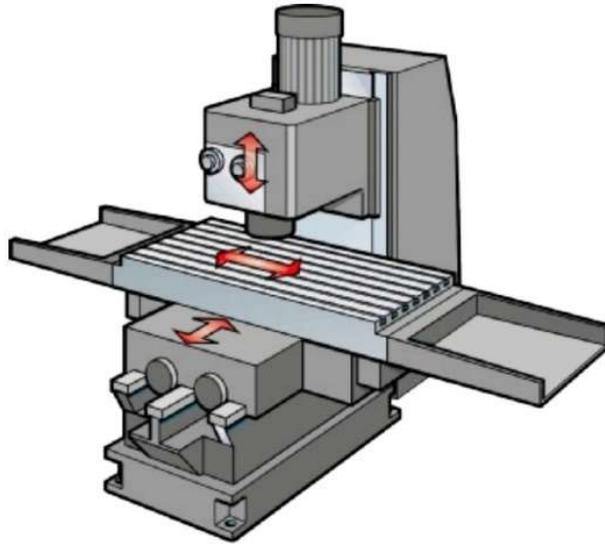


Figura 1. Movimientos en fresadora vertical [7]

### 1.2.3. Centro de mecanizado CNC

Es una máquina herramienta automática, controlada por una computadora, tiene la capacidad de realizar varias operaciones de maquinado en diferentes superficies y orientaciones de una pieza sin tener que retirarla de su dispositivo de sujeción [11].

El centro de mecanizado a utilizar en este proyecto ver Figura 2, pertenece al laboratorio de CNC de la Universidad Salesiana de Quito. Los datos técnicos más importantes de la máquina se pueden observar en Tabla 8, donde se muestra los principales datos técnicos de la máquina a EMCO Concept Mill 260.



Figura 2. Centro de mecanizado Emco Concept Mill 260 de 3 ejes. [8]

Tabla 8. Datos Técnicos EMCO Concept Mill [8]

Datos Técnicos EMCO	Unidades
<b>Ámbito de trabajo</b>	
Recorrido del carro longitudinal (X)	350 mm
Recorrido del carro transversal (Y)	250 mm
Recorrido del carro útil vertical (Z)	300 mm
Distancia nariz del husillo - superficie de la mesa (mín. máx)	120 – 420 mm
<b>Fresa husillo</b>	
Rango de velocidad	150 - 10 000 rpm
Torque (100/40% ED)	23 / 34 N·m
Potencia (100/40% ED)	4,9 / 6,8 kW

La Figura 3 muestra algunos métodos de fresados modernos que los centros de mecanizado CNC pueden ejecutar.

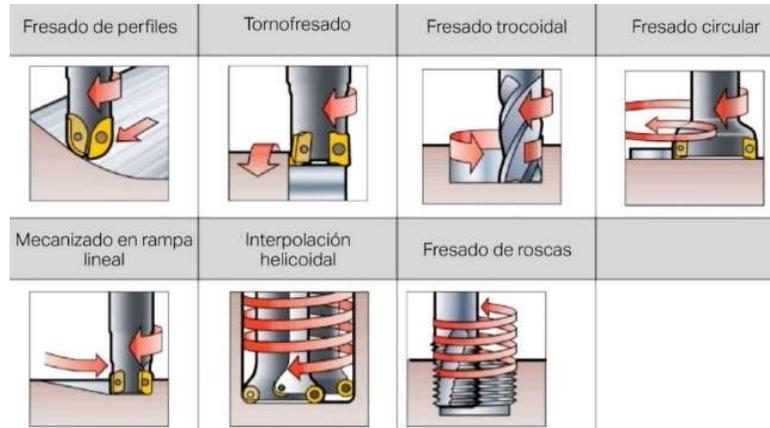


Figura 3. Métodos Modernos de fresado [7]

### 1.2.4. Parámetros de Fresado

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

- Diámetro efectivo [ $mm$ ]
- Velocidad de corte efectiva [ $\frac{m}{min}$ ]
- Avance por diente [ $\frac{mm}{z}$ ]
- Velocidad de avance [ $\frac{mm}{min}$ ]
- Profundidad de pasada axial y radial [ $mm$ ]

### 1.2.5. Velocidad de corte

Es la velocidad tangencial periférica de los filos de corte de la fresa y la pieza de trabajo. El valor suele darse en m/min. Este depende directamente de la velocidad del husillo y del diámetro de la fresa [12]. La Ecuación (1) muestra la fórmula para determinar la velocidad de corte [13].

$$Vc = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \quad (1)$$

Donde:

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

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

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

### 1.2.6. Diámetro efectivo

En la obtención del diámetro efectivo en superficies con pendientes se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros que se detallan en la Figura 4 [3].

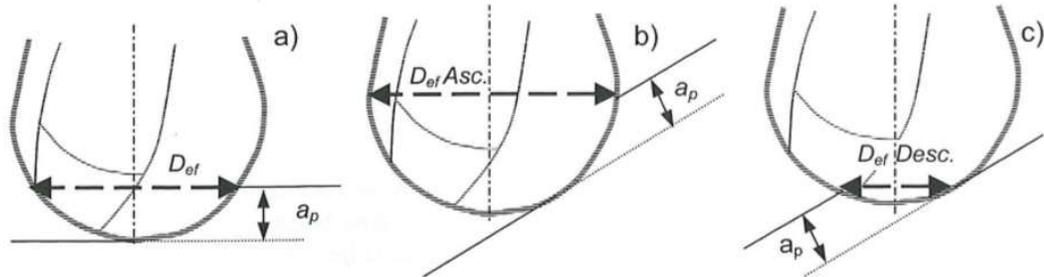


Figura 4. Corte ascendente y descendente con fresa punta redonda [9]

El diámetro efectivo varía a lo largo del filo de la herramienta, dependiendo del diámetro de la herramienta, la pendiente, la profundidad de pasada axial y de la trayectoria de la herramienta. La ecuación (2) para el cálculo del diámetro efectivo en ascenso se obtiene con la siguiente expresión [14].

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

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 se tiene la Ecuación (3) [13].

$$D_{efd} = D \cdot \text{sen}\left[\alpha - \arccos\left(\frac{D-2ap}{D}\right)\right] \quad (3)$$

Donde:

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

### 1.2.7. Velocidad de corte efectiva

Con esto es necesario calcular los parámetros de corte en función del diámetro efectivo.

La ecuación (4) define el cálculo de la velocidad de corte efectiva [13].

$$V_{Cef} = \frac{\pi \cdot N \cdot D_{ef}}{1000} \quad (4)$$

Tomando en cuenta si el mecanizado es con trayectoria en ascenso, la velocidad de corte es mayor, cambiando los valores con trayectoria en descenso, tomando como valor donde velocidad de corte será menor [3].

### 1.2.8. Avance por diente

Es la distancia que recorre un diente al entrar en contacto con el material, El avance por diente lleva las siguientes unidades  $[\frac{mm}{z}]$ , donde  $z$  es el número de dientes [7].

### 1.2.9. Velocidad de avance

La fórmula descrita como ecuación (5), calcula la velocidad de avance lineal [13]:

$$V_f = fz \cdot z \cdot N \quad (5)$$

Donde:

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

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

$z$ : Número de dientes.

### 1.2.10. Profundidad de pasada axial y radial

Se define como la penetración axial y radial que la herramienta realiza, se denomina  $a_p$  y  $a_e$  respectivamente. Este valor es medido en mm y se representa en la Figura 5 [13].

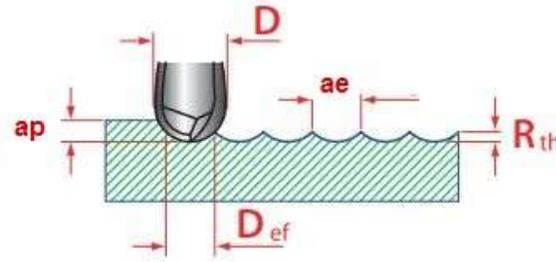


Figura 5. Esquema del corte con herramienta esférica [10]

Existen tablas establecidas por los fabricantes de herramientas donde establecen parámetros de corte óptimos para las operaciones de desbaste y acabado generando un buen acabado superficial; sin embargo, con el fin de obtener una rugosidad definida en una superficie plana se establece la siguiente ecuación (6) [13].

$$a_e = 2\sqrt{R_{th}(D - R_{th})} \quad (6)$$

Donde:

$a_e$ : Profundidad radial o Paso [mm]

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

### 1.3. Mecanizado de alta velocidad

Mecanizado de alta velocidad o High Speed Machining con sus siglas en ingles HSM, denominado al proceso de mecanizado a alta velocidad.

HSM se ha convertido en una de las tecnologías de mecanizado a comparación de las tradicionales, el mismo que permite el aumento de la eficiencia, precisión y buena calidad en las piezas de trajo de igual manera reduciendo costos y tiempos de mecanizado [15].

En 1931 el Dr. Carl Salomon en sus investigaciones [12], definió acerca del mecanizado de alta velocidad, donde, afirmó que la temperatura y el desgaste de la herramienta de corte para un material particular alcanza su punto máximo a una velocidad específica de corte, la misma que fue denominada velocidad crítica, de igual forma concluyó cuando la velocidad de corte se incrementa, la temperatura disminuye.

En materiales no ferrosos como en aleaciones de aluminio define una velocidad convencional que varía entre 70 a 100 m/min, su velocidad crítica comienza a partir de 200 m/min y definiendo la disminución de temperatura de corte HSM a partir de 300 m/min, la Figura 6 muestra los cambios de valores para cada material a trabajar [3].

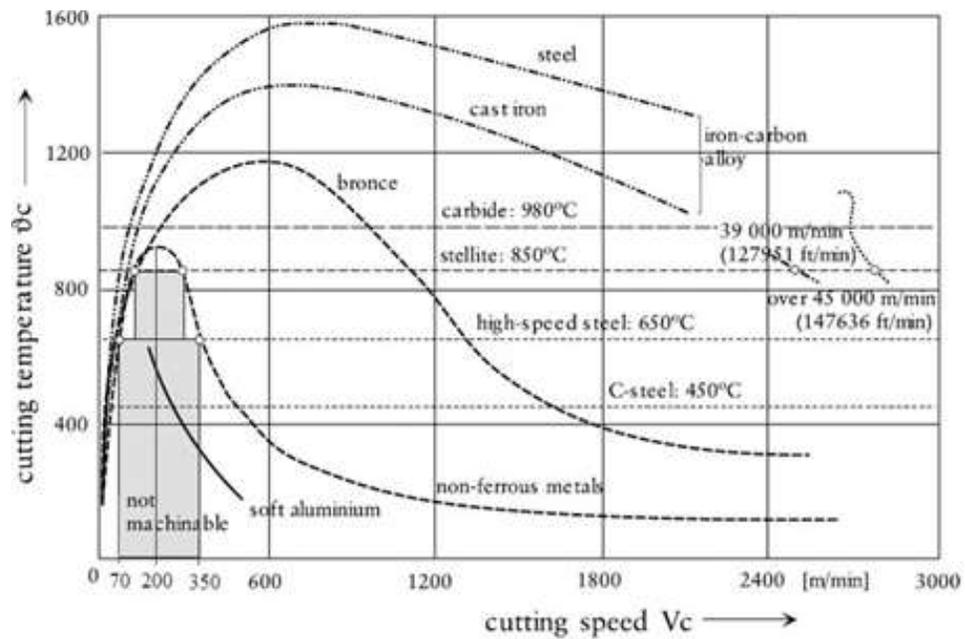


Figura 6. Curvas de Salomon [9]

Algunos estudios han permitido evaluar las mejoras de mecanizado en alta velocidad de corte en aleaciones de aluminio. Estos estudios involucran la fuerza de corte aumentando las velocidades disminuyendo el consumo de energía en el proceso, dando buenos resultados en la AA-7075-T6, en la Figura 7 se observa dicho comportamiento [16].

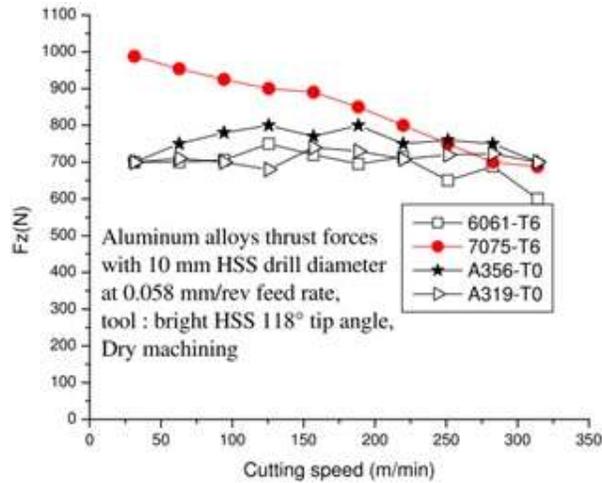


Figura 7. Fuerzas de corte a diferentes velocidades en aleaciones de Al (AA) [14]

De acuerdo a un estudio presentado por E. Vaca [3], muestra que la velocidad de corte es un factor que influye significativamente en la rugosidad superficial.

De forma análoga 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 [3].

De igual manera recomienda trabajar con una estrategia de mecanizado como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Estrategia óptima de mecanizado HSM para operaciones de acabado 3D [11]

Condiciones	Resultado óptimo
Velocidad de corte efectiva	260 - 422 [m/min]
Trayectoria	Descenso
Estrategia	Paralelo

Dicho estudio fue realizado con avance constante de 0,05 mm/z, 10.000 RPM fijas, con una herramienta de carburo revestida de TiAlN de diámetro 14 mm. El autor del estudio E. Vaca [3], recomienda aumentar el avance y conocer la influencia de este factor en la calidad superficial.

Debido a ello, en el presente proyecto se realizará experimentos de varias estrategias de mecanizado que se mencionarán en el capítulo dos, con velocidades de corte óptimos recomendados y se aumentará el avance de acuerdo al límite recomendado por el fabricante de la herramienta para conocer su influencia en el acabado superficial.

### **1.3.1. Mecanizado en seco**

El mecanizado en seco minimiza el consumo de lubricante o aceite, pero no impide que la viruta quede impregnada del fluido. Las virutas se venden para su reciclado y su costo varía en la cantidad de lubricante que haya atrapado en su masa. Si es menos del 2% su precio es cero y si supera la cantidad se debe pagar para que se lleven dicha viruta, aumentando el valor de producción, de igual forma la taladrina influye en el costo de producción de piezas. En el proceso de fresado, esta necesidad no es tan urgente puesto que este está diseñado para el tratamiento del fluido refrigerante y la viruta, el interés económico se mantiene en el proceso de manufactura [12].

### **1.4. Herramientas**

Las herramientas de corte se encuentran sometidas a condiciones mecánicas extremas de igual forma condiciones térmicas, soportando grandes tensiones y elevadas temperaturas, por lo que deben estar fabricadas de materiales que permitan resistir dichos parámetros, en la Tabla 10 se expone los principales materiales con los que están fabricadas dichas herramientas [17].

Tabla 10. Características de las principales herramientas de corte [3]

Material de herramienta	Características	Tipos de desgaste de las herramientas	Limitaciones
Aceros de alta velocidad HSS	Alta tenacidad, resistencia a la fractura.	Desgaste de filos, fractura	Baja resistencia a altas temperaturas y limitada resistencia al desgaste
Carburos recubiertos	Mayor resistencia, propiedades térmicas y de fricción que los carburos no recubiertos.	Desgaste del flanco, fractura	No usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas.
Cerámicos	Alta dureza a temperaturas elevadas, alta resistencia al desgaste abrasivo.	Muescado de línea de profundidad de corte micro astillado fractura gruesa.	Baja resistencia a la fatiga y baja resistencia mecánica.

#### 1.4.1. Carburo de tungsteno

Este se produce en forma común mediante el sinterizado de polvos de tungsteno que han sido reducidos a partir de minerales tales como el wolframio y la scheelita, es de los más recomendados al momento de mecanizar aleaciones de aluminio. En la Tabla 11 se presenta las propiedades físicas de esta herramienta [7].

Tabla 11. Propiedades físicas y mecánicas del carburo de tungsteno [2]

Material	Dureza (Vickers)	Módulo de elasticidad, E [Gpa]	Gravedad específica	Temperatura de fusión, [°C]
Carburo de Tungsteno (WC)	2600	700	15,6	2870

#### 1.4.2. Herramienta de Carburo con revestimiento TiAlN

La herramienta para esta investigación se realizará con una fresa de carburo con revestimiento de TiAlN de diámetro 14mm, de marca Guhring. En la Tabla 12 se describe las características de esta fresa. En la Figura 8 se muestra la fresa a utilizar.

Tabla 12. Propiedades físicas de fresa Guhring [16]

Características	Unidad
Temperatura del revestimiento	500° C
Dureza	3000-3300 HV
Coefficiente de fricción	0,60
Estabilidad térmica	900° C

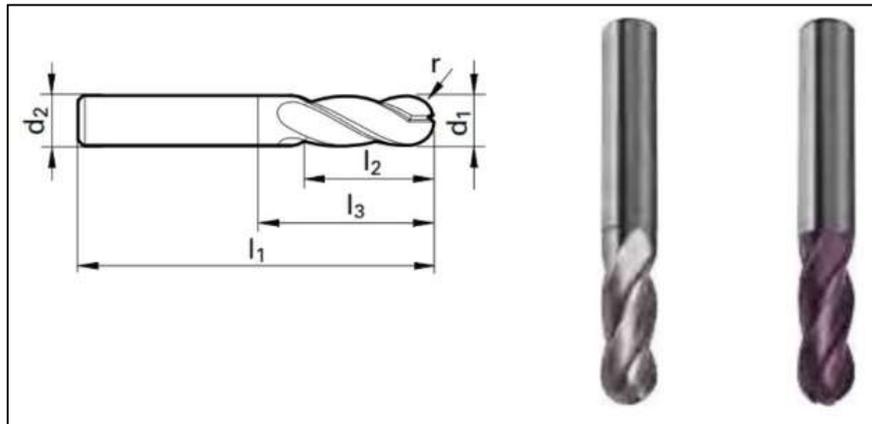


Figura 8. Fresa de acabado punta redonda marca Guhring de diámetro 14 mm [16]

La Tabla 13 muestra las dimensiones de la fresa de acabado punta redonda.

Tabla 13. Dimensiones de fresa Guhring [16]

Dimensiones de fresa Guhring	
d1	14,00 mm
d2	14,00 mm
l1	83,00 mm
l2	26,00 mm
l3	38,00 mm
Numero de filos	4

En la Figura 9 se observa los parámetros de corte recomendados por el fabricante según su catálogo.

**GF 500 B and GF 300 B (Ball Nose)** **METRIC**

			Nom. diameter (mm)					
Application	Width/depth		4	6	8	10	12	16
Roughing	ae	(mm)	0.2	0.4	0.6	0.75	1	1.2
	ap	(mm)	0.3	0.5	0.75	1	1.5	1.5
Finishing	ae	(mm)	0.1	0.14	0.16	0.18	0.2	0.3
	ap	(mm)	0.07	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3

Tool length/reach up to 3xD	Vc and fz	100%
Tool length/reach 3-5xD	Vc and fz	80%
Tool length/reach > 5-10xD	Vc and fz	60%



Material	Hardness	Type of End Mill	ae Max	cut Vc	fz (mm/z) with nom. Ø					
					8	10	12	16	20	25
Aluminum-cast alloys 3.2131 G-AISI5Cu1, 3.2153 G-AISI7Cu3, 3.2573 G-AISI9 3.2581 G-AISI12, 3.2583 G-AISI12Cu, - G-AISI12CuNiMg	over 7% Si	GF 500 B	0.1 x D	300	0.060	0.090	0.120	0.150	0.180	0.240
		GF 500 B	0.03 x D	400	0.042	0.063	0.084	0.110	0.130	0.170
		GF 500 B	0.01 x d	500	0.036	0.054	0.072	0.090	0.110	0.140

Figura 9. Parámetros de corte de fresa de acabado punta redonda [18]

### 1.4.3. Parámetros de corte para aleaciones de aluminio

Para el mecanizado en aleaciones de aluminio el fabricante recomienda [18], una herramienta con los parámetros que se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de corte para fresado en aleaciones de aluminio [17]

Herramienta de acabado	
Material:	Aleaciones de Aluminio
Díámetro	14 mm
Vc	300 - 500 m/min
Fz	0,05 - 0,15 mm

En el siguiente capítulo del presente proyecto se determinará los parámetros de corte a experimentar que serán de acuerdo a los recomendados por el fabricante de la herramienta.

### 1.5. Trayectorias de mecanizado

La trayectoria en el mecanizado influye en el movimiento de la fresa en relación de la superficie a mecanizar. Puede variar si es un movimiento ascendente o descendente, puesto que este movimiento va a cambiar la zona de corte, al realizar dichos cambios de sección en las figuras complejas se cambian constante mente las trayectorias por lo que la velocidad de corte varía constantemente [12].

Definir las trayectorias y estudiar la pieza mediante CAM es lo más adecuado al momento de elegir una buena trayectoria de mecanizado tal como se muestra en la Figura 10, de igual forma combinaciones formando estrategias de mecanizado [12].

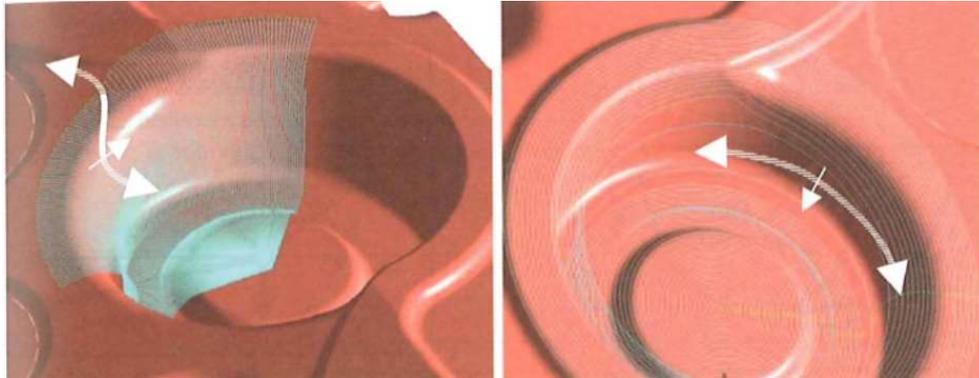
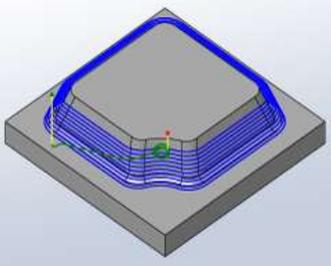
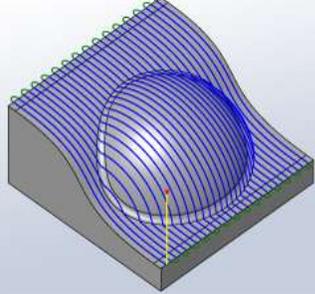
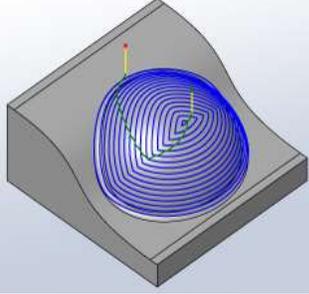
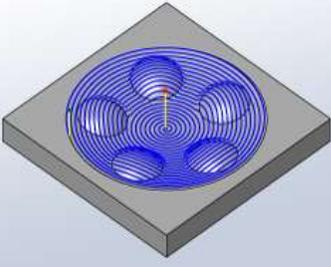
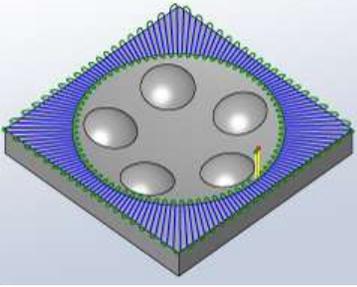


Figura 10. Mecanizado de una cavidad de una estampa [9]

### 1.6. Estrategias de mecanizado

Las trayectorias conjunto con las estrategias de mecanizado dependen del software CAM disponible, para este proyecto se detallan las siguientes estrategias de mecanizado dividiéndolas en estrategias para desbaste y estrategias para acabado. En la Tabla 15 se muestra las estrategias 3D de fresado de acabado.

Tabla 15. Estrategias de acabado [18]

Estrategias	Descripción	Esquema
Contorno (Contour)	El mecanizado se lo realiza en tipo Z constante, donde sus movimientos simultáneos se los realiza en los ejes X y Y, el software deja a libre elección si las trayectorias son en ascenso o en descenso.	
Paralelo (Parallel)	La herramienta recorre en una forma paralela en el plano XY y siguen la superficie en la dirección Z. Las pasadas pueden enlazarse en un patrón en zigzag, unidireccional o dividirse en secciones de fresado descendente o ascendente.	
Festonear (Scallop)	El software CAM genera pasadas a una distancia constante de otra mediante el desfase hacia dentro por la superficie.	
Espiral (Spiral)	Se crea una ruta de herramienta de espiral a partir de un centro determinado. Esta operación genera un contacto constante.	
Radial	Similar que el mecanizado de espiral, esta operación también se inicia en un punto central, lo que permite mecanizar piezas radiales.	

Un estudio presentado por E. Vaca [3], en su investigación selecciona estrategias de contorno y paralelo con trayectorias en ascenso o descenso y define que la estrategia de paralelo es mejor que la estrategia de contorno, también menciona que trayectorias

en descenso es mejor que trayectorias en ascenso de acuerdo a la calidad superficial obtenida.

En esta investigación se empleará las estrategias de:

- Contorno en descenso (CD)
- Paralelo en descenso (PD)
- Paralelo en ascenso y descenso (PAD)

Estas estrategias se utilizarán con la finalidad de comparar el acabado superficial, y concluir en cuál de estas es más eficiente al momento de mecanizar.

### 1.7. Rugosidad

Las superficies fresadas se usan con el fin de acoplarse con otras partes y lograr ciertas funciones. La calidad superficial generalmente tiene la influencia por la parte mecánica, por lo tanto, la rugosidad de la superficie es considerada un requisito técnico importante puesto que mejora la eficiencia de mecanizado y reduce costos de mecanizado [19].

El instrumento utilizado para medir la rugosidad es conocido como rugosímetro superficial, con este se puede registrar la rugosidad superficial. Dicho instrumento consta con una punta de diamante el mismo que avanza en línea recta sobre la superficie a medir este recorre regularmente de 0,08 mm a 25 mm, en la Figura 11 se muestra el proceso de la medición de la rugosidad [11].

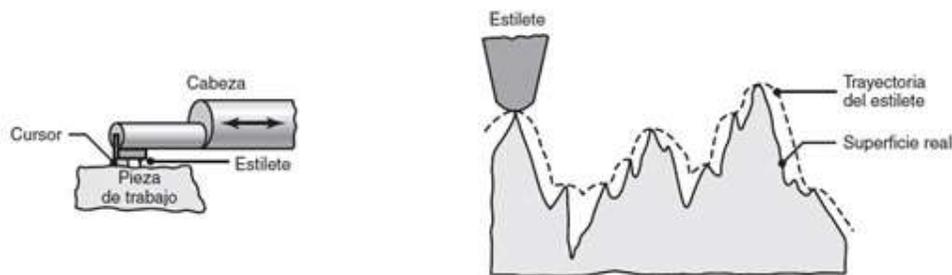


Figura 11. Proceso de medición de rugosidad [3]

Durante el mecanizado 3D, La rugosidad es originada por el paso de la fresa, esta produce irregularidad en el acabado superficial llamados surcos, si el corte es transversal o z constante existe una relación continua con la trayectoria de la

herramienta y perfil generado. La altura de la cresta es  $R_{th}$  se determina por el radio de la fresa  $R$ , la profundidad axial de corte  $a_p$  y el Angulo de la pared  $\alpha$  en la Figura 12 se observa los parámetros descritos [12].

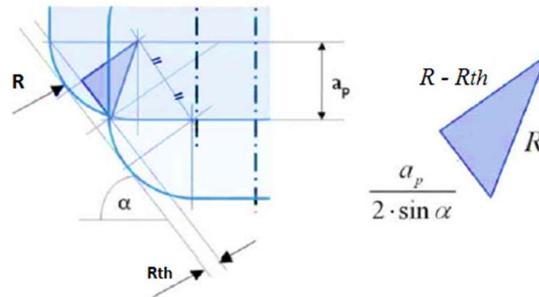


Figura 12. Medición de rugosidad de fresado con  $z$  constante [20]

La ecuación 7 establece el cálculo para la medición de la rugosidad en el fresado [20].

$$R_{th} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_p}{2 \cdot \sin \alpha}\right)^2} \quad (7)$$

Donde:

$R$ : Radio de la herramienta esférica. [mm]

$\alpha$ : Ángulo de la pared.

En el caso en que se considera operaciones de paralelo la expresión se la designa por la ecuación 8, en la Figura 13 se observa este proceso [21].

$$R_{th} = \frac{a_e^2}{8 \cdot R} \quad (8)$$

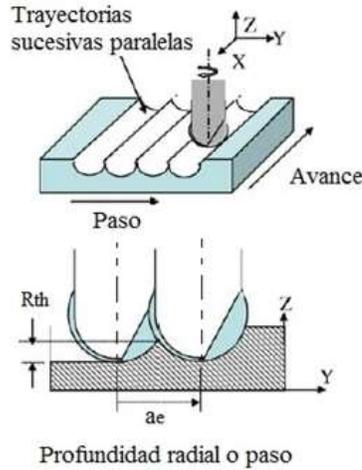


Figura 13. Trayectoria paralela de fresado [21]

### 1.7.1. Rugosidad media aritmética ( $R_a$ )

Analizando los datos de mediciones se realiza una media aritmética entre los absolutos de las desviaciones. La ecuación 9 muestra el cálculo para dicho análisis igualmente la Figura 14 muestra los valores, medido por el rugosímetro y comparados con la rugosidad calculada de forma teórica [22].

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (9)$$

Donde:

$Z_i$ : Desviaciones del perfil en Z.

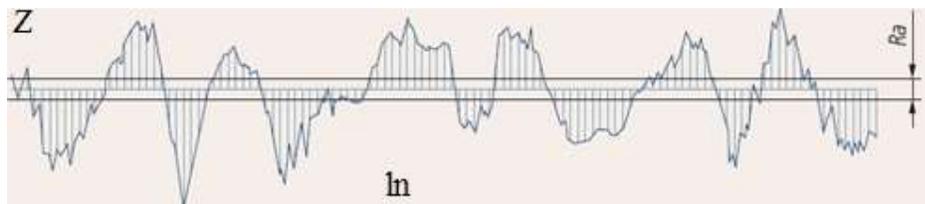


Figura 14. Valor media aritmética [22]

### 1.7.2. Rugosidad de la raíz media cuadrática ( $R_q$ )

Definido como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las desviaciones  $Z_i$  desde la línea media del perfil de evaluación. La ecuación 10 es designada para el cálculo de la media cuadrática es [22]:

$$Rq = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Zi^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

### 1.7.3. Profundidad media de rugosidad (Rz)

Este valor es medio por cinco valores Rzi estas cinco longitudes de muestreo lri están dentro de la longitud de evaluación ln, en la figura 15 se define estos parámetros, en la ecuación 11, se define la fórmula de cálculo para esta [22].

$$R_z = \frac{Rz1+Rz2+Rz3 \quad Rz4+Rz5}{5} \quad (11)$$

Donde:

Rzi: Altura media en la longitud de muestreo.

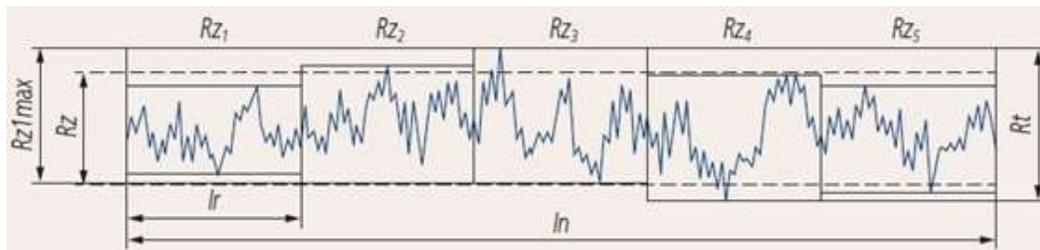


Figura 15. Profundidad media de rugosidad [22]

### 1.8. Equipo de medición

Para el presente proyecto, se realizará la medición de la rugosidad superficial con un equipo Mitutoyo. En la tabla 16 se describe las características del equipo y la imagen en la Figura 16.

Tabla 16. Especificaciones rugosímetro MITUTOYO SJ210 [22]

Rugosímetro	MITUTOYO SJ 210
Pantalla	Digital
Rango de medición en X	17,5 mm
Rango de medición en Z	360 $\mu\text{m}$ (-200 $\mu\text{m}$ $\pm$ 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 $\mu\text{m}$ )



Figura 16. Rugosímetro MITUTOYO SJ 210 [22]

### 1.9. Taguchi

La metodología Taguchi conforma en definir niveles de los factores. El mecanizado es un caso típico puesto que es afectado por diferentes factores que no son independientes. La aplicación de Taguchi se llega a resultados priori evidentes, sin más que estudiar el proceso y la influencia física de cada factor durante este [12].

Wang et al [19] en su investigación usa Taguchi como herramienta para la predicción de la superficie siendo esta metodología la más idónea para este caso.

Zhang et al [23], en su estudio de diseño de Taguchi para optimizar la calidad de la superficie de una operación de fresado frontal. Los resultados verificaron que el diseño de Taguchi fue exitoso en la optimización de los parámetros de fresado para la rugosidad de la superficie.

Al utilizar Taguchi como método seleccionado es importante determinar la matriz ortogonal al momento de facilitar el experimento, este propone un número determinado de grado de libertad del arreglo ortogonal (AO), este debe ser mayor que el total de ensayo requeridos en el experimento la ecuación 12 satisface esta necesidad [24].

$$DF = ((n1 - 1) \cdot (nf)) + ((n1 - 1) \cdot (n1 - 1) \cdot ni) \quad (12)$$

Donde:

$DF$  = Grados de libertad

$n1$  = Numero de niveles

$nf$  = Numero de factores

$ni$  = Numero de interacciones

### 1.9.1. Arreglo ortogonal (AO)

El AO se elige en base al número de factores y niveles de cada uno para ser inspeccionados durante cada experimento. En el caso de tres factores constará tres interacciones: AxB, BxC y AxC; el número de interacciones depende del número de factores a experimentar [25].

Taguchi desarrolló una serie de arreglos particulares que denominó:

$$La = (b)^c \quad (13)$$

Donde:

$La$  = Representa el número de pruebas o experimentos que se tomarán.

$b$  = Representa los diferentes niveles a los que se tomará cada factor.

$c$  = Es el número de factores

### 1.10. Análisis de la varianza ANOVA

ANOVA es una herramienta de toma de decisiones objetiva y basada en estadísticas para detectar cualquier diferencia en el rendimiento promedio de los grupos de elementos probados [26].

ANOVA ayuda a probar formalmente la importancia de todos los factores principales y sus interacciones al comparar el cuadrado medio con una estimación de los errores experimentales en niveles de confianza específicos [26].

Para este análisis se requiere utilizar la tabla de distribución F de Fischer.

### 1.10.1. Notaciones para el análisis ANOVA

La Tabla 17 expresa las notaciones a utilizar para el análisis de la varianza ANOVA.

Tabla 17. Notaciones para el análisis ANOVA [27]

Símbolo	Denominación	Símbolo	Denominación
$V$	Promedio de raíces (Varianza)	$F$	Prueba F
$S$	Suma de cuadrados	P	Porcentaje de influencia
DF	Grados de libertad	T	Total de resultados
N	Numero de experimentos	CF	Factor de corrección
$E$	Error (experimental)		

### 1.10.2. Varianza

La varianza es determinada por la suma de cuadrados de cada resultado del experimento, dividido para los grados de libertad del factor [27].

Formalmente se obtiene con la ecuación 14:

$$V = \frac{S}{f} \quad (14)$$

### 1.10.3. Prueba F de Fisher

Es la relación entre la varianza del parámetro y el error, se utiliza para determinar si el parámetro analizado tiene influencia en el estudio [27].

Para la prueba F, se compara el valor que se calcula con el valor F de Fisher de la tabla 32, donde, se toma en cuenta el nivel de significancia estadística, para este estudio el nivel de significancia será de 5%. Si el valor calculado es mayor que el valor tabulado

se concluye que el parámetro es estadísticamente significativo para el estudio, de lo contrario es agrupado, de acuerdo a la prueba de hipótesis.

El valor F se calcula con la ecuación 15:

$$F = \frac{V}{Ve} \quad (15)$$

#### **1.10.4. Porcentaje de influencia P**

Se determina con la relación de la suma de cuadrados de cada factor y la suma total de cuadrados.

Se obtiene con la expresión 16:

$$P = \frac{S}{S_T} \cdot 100\% \quad (16)$$

La suma de cuadrados totales  $S_T$ , se obtiene con la diferencia entre la suma de cuadrados de cada prueba y el factor de corrección CF.

Formalmente se obtiene con la expresión 17:

$$S_T = S - CF \quad (17)$$

El factor de corrección se obtiene con la expresión 18:

$$CF = \frac{1}{n} \cdot [\sum_{i=1}^n y_i]^2 \quad (18)$$

Donde:

$y$  = Resultado para cada nivel y factor.

### **1.10.5. Grados de libertad**

Los grados de libertad indica la cantidad de información contenida en un conjunto de datos.

El grado de libertad total se obtiene con la expresión 19:

$$f_{total} = \text{Numero de pruebas} - 1 \quad (19)$$

El grado de libertad para cada factor se obtiene con la expresión 20:

$$f_{factor} = \text{Numero de niveles} - 1 \quad (20)$$

### **1.10.6. Prueba de la hipótesis**

La prueba examina dos tipos de hipótesis opuestas sobre una población: hipótesis nula e hipótesis alternativa. El modo en que se configuran estas hipótesis obedece a lo que se desea demostrar [27].

La validación se lo realiza comparando los resultados del valor F con la tabla 29 de distribución F. Donde se establece las siguientes hipótesis.

#### **1.10.7. Hipótesis nula ( $H_0$ )**

Es la afirmación de que el factor analizado no posee diferencia significativa estadísticamente en el origen de las variaciones [27].

#### **1.10.8. Hipótesis alternativa ( $H_1$ )**

Es la afirmación de que el factor analizado posee diferencia significativa estadísticamente en el origen de las variaciones, por lo tanto, es un parámetro influyente en el estudio [27].

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1. Generalidades**

En el presente proyecto de investigación, se ha seleccionado tres tipos de estrategias de mecanizado para operaciones de acabado 3D para aleación de aluminio 7075 T6.

En los ensayos se varía la velocidad de corte y el avance de acuerdo a parámetros establecidos por el fabricante de la fresa de acabado punta redonda de diámetro 14 mm y se analizará la calidad superficial a través de la medición de la rugosidad Ra.

Para los ensayos, se mantendrá constante la velocidad del husillo de  $N = 10000$  RPM, la profundidad de corte  $a_p$  y  $a_e = 0,2$  mm.

Los parámetros de corte a experimentar serán de: velocidad de corte VC de 320, 360 y 420 m/min, el avance por diente  $F_z = 0,075; 0,1$  y  $0,125$  mm/z correspondientes a la velocidad de avance de  $V_f = 3000, 4000$  y  $5000$  mm/min.

Posterior al mecanizado se efectúa un análisis estadístico con la metodología Taguchi y ANOVA para determinar cuál de estos factores influye en la calidad superficial y así optimizar el proceso de mecanizado de acabado 3D.

#### **2.2. Selección de parámetros de corte**

Para el experimento se selecciona los parámetros de corte que el fabricante de la herramienta de acabado recomienda como se indicó en la Tabla 14, donde menciona un rango de velocidad de corte de 300 a 500 m/min y con un rango de avance por diente de 0,05 a 0,15 mm/z.

Para este estudio se realizará el experimento de tres velocidades de corte y tres avances dentro del rango establecido por el fabricante, las cuales se muestran en la Tabla 18.

#### **2.3. Selección de la estrategia de mecanizado**

En el capítulo anterior se explicó las principales estrategias de fresado 3D de acabado para el mecanizado.

La rugosidad superficial mecanizada influirá si la estrategia es Z constante (contorno) o Z no constante (Paralelo) y si la trayectoria es en ascenso o descenso [3]. En la tabla 9, se mostró los resultados óptimos de un estudio previo donde analizó estas dos estrategias y trayectorias. Dando como resultado óptimo, estrategias en paralelo y trayectorias en descenso. Para este estudio se experimentará la estrategia de paralelo en descenso (PD), estrategia de contorno en descenso (CD) y estrategia de paralelo en descenso - ascenso (PAD).

#### 2.4. Definición de parámetros de maquinado y niveles

La Tabla 18 indica los parámetros independientes definidos para el ensayo, los cuales son, velocidad de corte, avance y estrategias de mecanizado con sus niveles.

Tabla 18. Parámetros de corte definidos para la experimentación

Nivel	Vcef [m/min]	Avance F/z [mm]	Estrategia 3D	Profundidad ap, ae [mm]	Herramienta
1	320	0.075	CD		Carburo con
2	360	0.1	PAD	0,2	revestimiento TiAlN
3	420	0.125	PD		[Guhring]

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

El parámetro dependiente que este proyecto analizará será la rugosidad media aritmética Ra.

#### 2.5. Modelo CAD

El diseño de la probeta a ensayar se realizó en el software *Solidworks*, contiene superficies con tres pendientes definidas en: 60, 5°; 68, 5° y 86, 5°, como se ve en Figura 17.

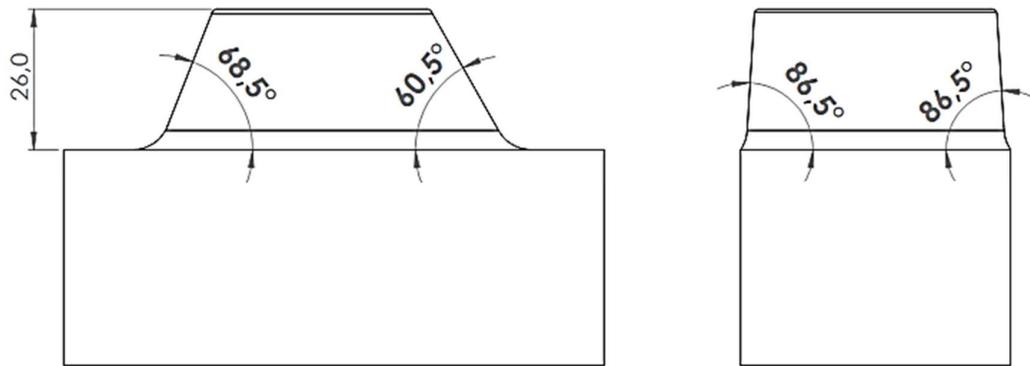


Figura 17. Modelo CAD para el experimento. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Las pendientes asignadas se utilizan para alcanzar una velocidad de corte efectiva de 320, 360 y 420 m/min respectivamente como se indica en la Figura 18. El resultado del cálculo de parámetros de corte se muestra en la Tabla 19, el diámetro efectivo se obtiene con la ecuación 3, la velocidad de corte efectiva se obtiene con la ecuación 4 y la velocidad de avance con la ecuación 5.

Tabla 19. Resultado del cálculo de velocidad de corte efectiva y velocidad de avance

Constantes: $D = 14 \text{ mm}$ $ap = 0,2 \text{ mm}$ $ae = 0,2 \text{ mm}$					
VCef	Def	N	Pendiente	Fz	Vf
[m/min]	[mm]	[RPM]	[°]	[mm/z]	[mm/min]
320	10,2	10.000	60,5	0,075	3000
360	11,4	10.000	68,5	0,1	4000
420	13,4	10.000	86,5	0,125	5000

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

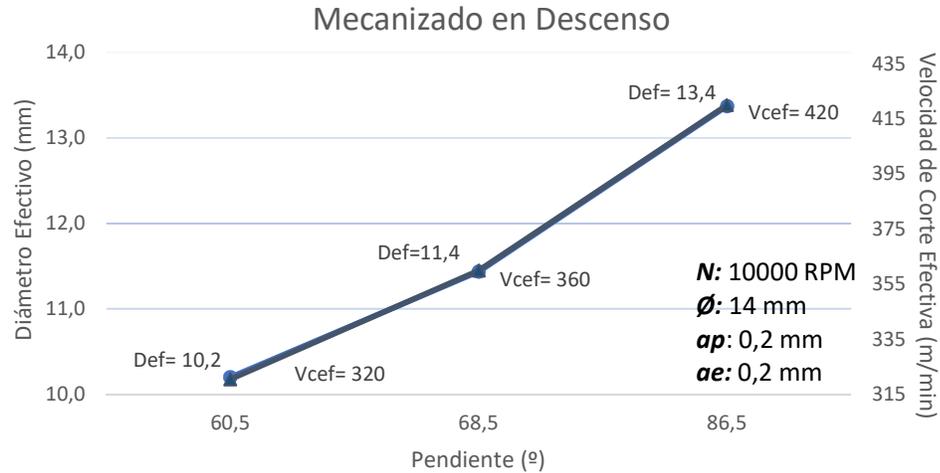


Figura 18. Relación entre pendiente, diámetro efectivo y velocidad de corte. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

## 2.6. Modelo CAM.

La programación CAM se realizó en el software HSM, las estrategias de fresado 3D que se designan son las que comúnmente se utilizan en el mecanizado y son: Contorno en Descenso (CD), Paralelo en descenso (PD) y Paralelo en ascenso – descenso (PAD) como se muestra en la Figura 19.

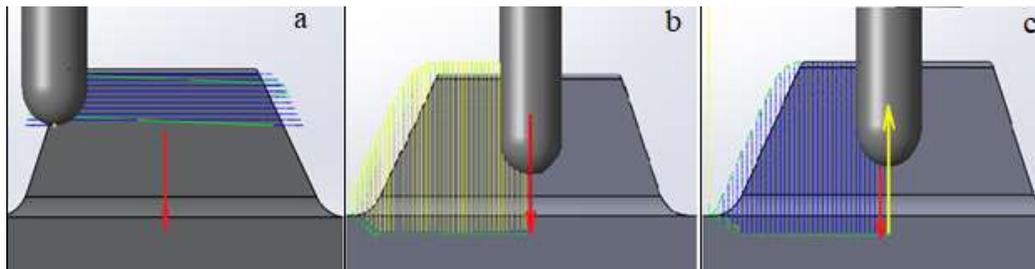


Figura 19. Estrategias a) Contorno en descenso CD, b) Paralelo en descenso PD  
c) Paralelo en ascenso - descenso PAD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

### 2.6.1. Programación CAM

El software de diseño y programación CAM utilizado es el Solidworks HSM CAM, en síntesis, el proceso de programación para las estrategias de acabado se menciona a continuación.

- a) Se realiza la configuración inicial de acuerdo al material en stock de 100x100x50mm.

- b) Se selecciona la estrategia de desbaste y semiacabado, donde se establecen parámetros definidos para el mecanizado, dejando 0,2 mm de sobre medida para el posterior acabado (este paso se detalla brevemente y no se analiza en la investigación).
- c) Se selecciona la estrategia de acabado y se configura la herramienta a utilizar como se ve en la Figura 20.

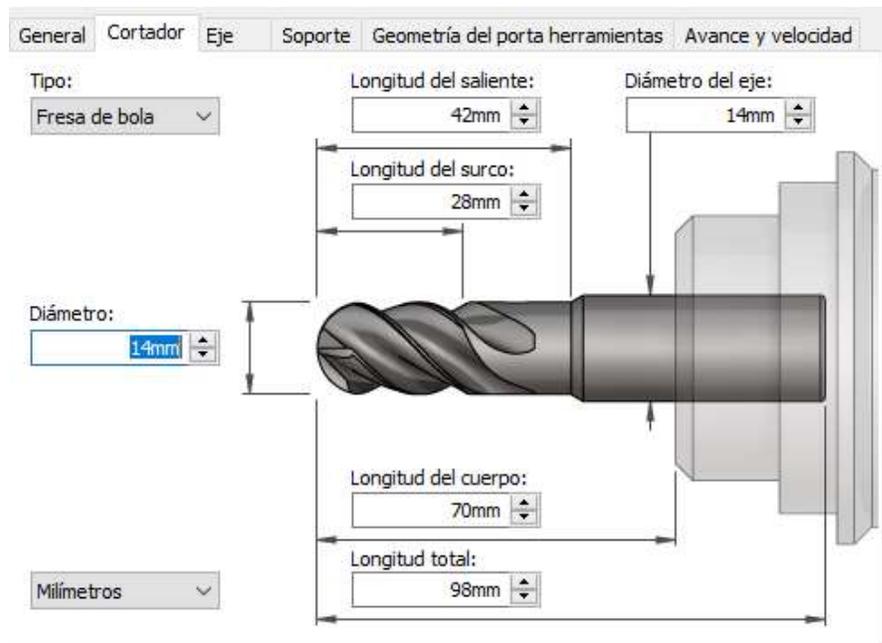


Figura 20. Configuración de la herramienta. Fuente: Captura de *Solidworks*

- d) Se configura los parámetros de velocidad de corte y avance como se ve en la Figura 21.

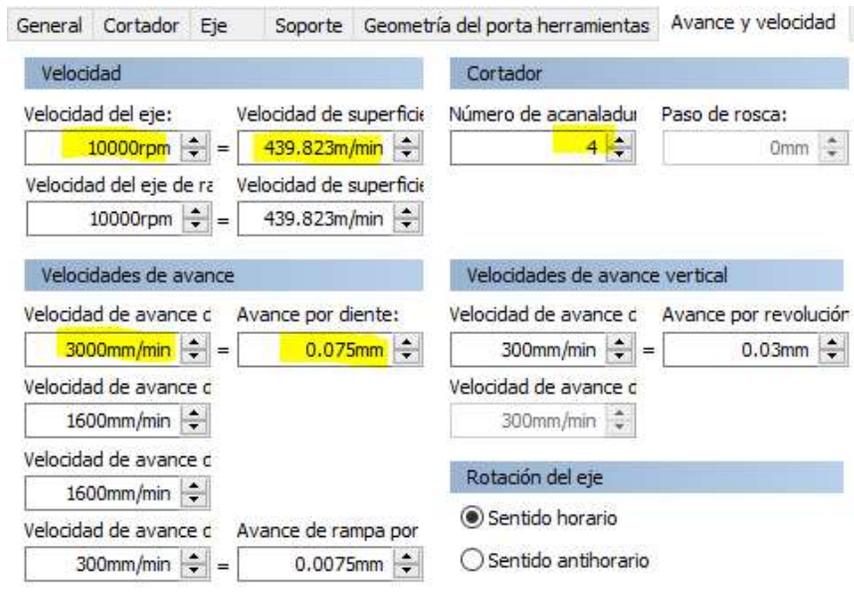


Figura 21. Configuración de velocidad y avance de corte. Fuente: Captura de *Solidworks*

- e) Se establece los parámetros de profundidad o el paso de 0,2 mm, trayectoria y dirección concurrente como se aprecia en la Figura 22, en este caso estrategia de contorno.

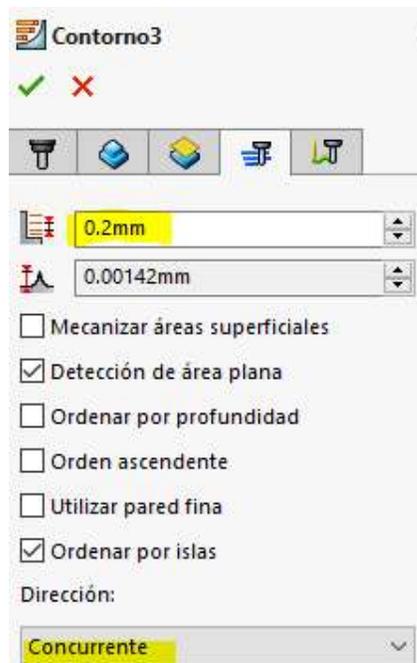


Figura 22. Configuración de parámetros de profundidad, dirección y trayectoria. Fuente: Captura de *Solidworks*

- f) Se realiza la simulación del proceso, en la Figura 23 se muestra el desbaste (Adaptativo), semiacabado (Contorno) y acabado (Contorno con velocidad de avance 3000 mm/min).

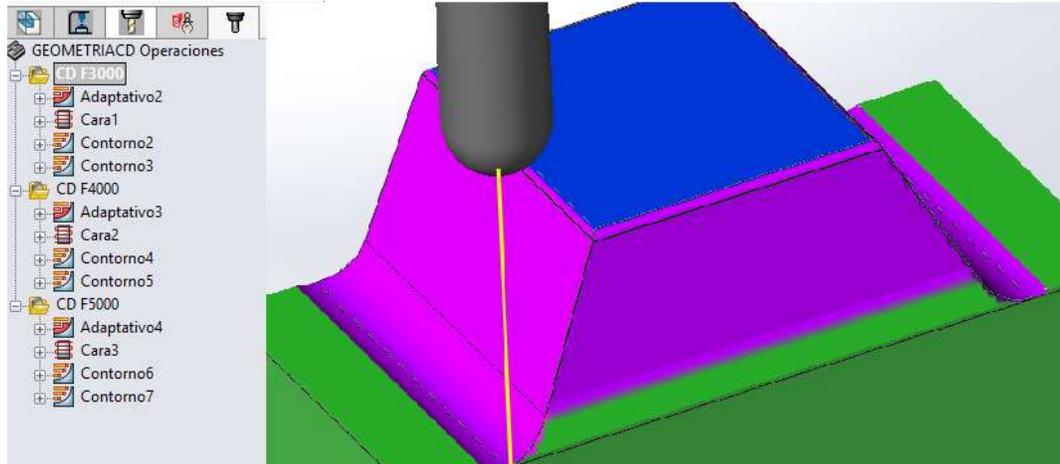


Figura 23. Simulación de la estrategia de acabado contorno. Fuente: Captura de *Solidworks*

- g) Ejecutar el postprocesador para la máquina con controlador Siemens Sinumerik como se muestra en la Figura 24.

```

CD F3000.mpf *
1 ; % N CD F3000 MPF
2 N10 ; ENSAYO CD F3000
3 N11 ; T1 D=10.318 CR=0 - ZMIN=-26 - fresa con punta plana
4 N12 ; T2 D=14 CR=7 - ZMIN=-26.5 - fresa con punta de bola
5 N13 G90 G94
6 N14 G71
7 N15 G64
8 N16 G17
9 N18 ; Adaptativo2
10 N19 T1 D1
11 N20 M6
12 N22 S8000 M3
13 N23 G54
14 N24 M8
15 N25 X0.032 Y55.24
16 N26 Z15
17 N27 Z5
18 N28 Z2.5
19 N29 G1 Z-4 F1600
20 N30 Y55.064
21 N31 X-0.775 Y53.696
22 N32 X-1.358 Y52.218
23 N33 X-1.767 Y50.682
24 N34 X-2.046 Y49.118
25 N35 X-2.234 Y47.54
26 N36 X-2.358 Y45.956
27 N37 X-2.44 Y44.369
28 N38 X-2.529 Y41.193

```

Figura 24. Postprocesado de códigos. Fuente: Captura de *Solidworks*

## 2.7. Aplicación del método Taguchi

Una vez determinado los tres factores y tres niveles a experimentar, se debe encontrar el arreglo ortogonal (AO), con el objetivo de facilitar el proceso de experimentación, según Taguchi se lo determina:

Entonces el AO se determina con la ecuación 13:

$$3^3 = 27 \text{ ensayos}$$

### 2.7.1. Grados de libertad del estudio experimental

Se calcula los grados de libertad (DF) para elegir un arreglo ortogonal que satisfaga el número de interacciones de los parámetros definidos, se lo determina con la ecuación 12. Entonces los DF se obtienen:

$$DF = ((3 - 1) \times (3)) + ((3 - 1) \times (3 - 1) \times 3)$$

$$DF = ((2) \times (3)) + ((2) \times (2) \times 3)$$

$$DF = 6 + 12$$

$$DF = 18$$

De acuerdo con Taguchi, el arreglo ortogonal apropiado para el ensayo debe ser mayor al grado de libertad calculado  $DF = 18$ , entonces el que se selecciona es el AO L27, en definitiva, este arreglo combina todas las variables sin excluir ninguna.

Se utiliza el software Minitab para configurar el arreglo ortogonal con los tres factores, tres niveles y tres interacciones AB AC y BC, tal como se indica en la Tabla 20.

Tabla 20. Arreglo ortogonal de los ensayos L27

Ensayo N°	A Estrategia de fresado 3D	B Velocidad de corte	C Avance
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	2	1	1
11	2	1	2
12	2	1	3
13	2	2	1
14	2	2	2
15	2	2	3
16	2	3	1
17	2	3	2
18	2	3	3
19	3	1	1
20	3	1	2
21	3	1	3
22	3	2	1
23	3	2	2
24	3	2	3
25	3	3	1
26	3	3	2
27	3	3	3

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

De acuerdo con el arreglo ortogonal L27 realizado en Minitab, se organiza los factores con sus respectivos niveles como se aprecia en la Tabla 21.

Tabla 21. Detalle del orden de parámetros y factores

Ensayo No	Estrategia 3D	Vc [m/min]	Fz [mm]
1	CD	320	0,075
2	CD	320	0,1
3	CD	320	0,125
4	CD	360	0,075
5	CD	360	0,1
6	CD	360	0,125
7	CD	420	0,075
8	CD	420	0,1
9	CD	420	0,125
10	PAD	320	0,075
11	PAD	320	0,1
12	PAD	320	0,125
13	PAD	360	0,075
14	PAD	360	0,1
15	PAD	360	0,125
16	PAD	420	0,075
17	PAD	420	0,1
18	PAD	420	0,125
19	PD	320	0,075
20	PD	320	0,1
21	PD	320	0,125
22	PD	360	0,075
23	PD	360	0,1
24	PD	360	0,125
25	PD	420	0,075
26	PD	420	0,1
27	PD	420	0,125

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

## 2.8. Resultados de la medición de rugosidad Ra

La medición de la rugosidad superficial se realizó en el sentido perpendicular al mecanizado utilizando un rugosímetro Mitutoyo modelo SJ210, tal como se indica en la Figura 25.

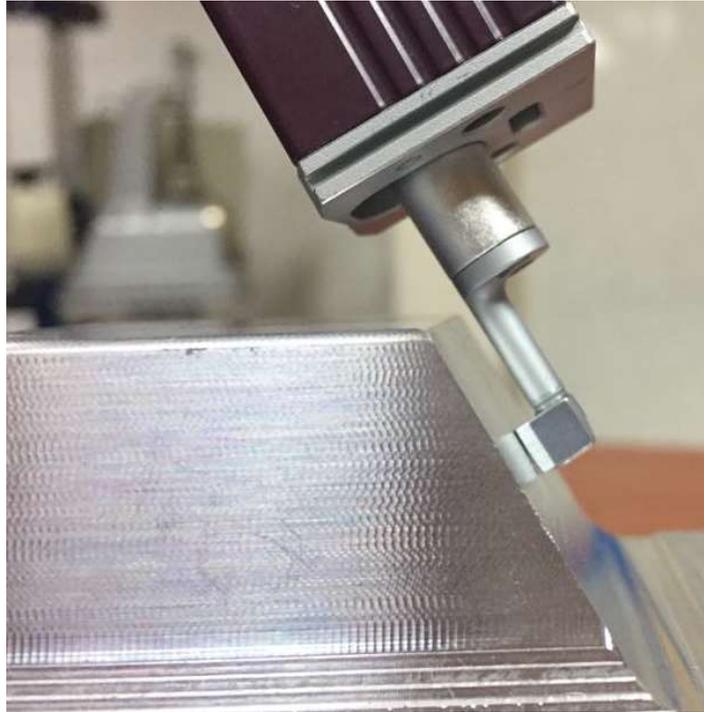


Figura 25. Medición de la rugosidad superficial. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

La Tabla 22 muestra los resultados de la rugosidad medida de los 27 ensayos. Se realizaron tres mediciones en la misma superficie para obtener un promedio.

Tabla 22. Resultados del experimento

Ensayo	Estrategia	Vc	Fz	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra
No	3D	[m/min]	[mm]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	Prom [ $\mu\text{m}$ ]
1	CD	320	0,075	0,901	0,94	0,94	0,927
2	CD	320	0,1	0,754	0,74	0,74	0,744
3	CD	320	0,125	0,848	0,82	0,82	0,827
4	CD	360	0,075	0,37	0,41	0,42	0,401
5	CD	360	0,1	0,55	0,56	0,54	0,551
6	CD	360	0,125	0,757	0,69	0,74	0,731
7	CD	420	0,075	0,849	0,86	0,86	0,855
8	CD	420	0,1	0,722	0,74	0,76	0,739
9	CD	420	0,125	0,648	0,75	0,7	0,697
10	PAD	320	0,075	0,478	0,76	0,64	0,628
11	PAD	320	0,1	0,397	0,47	0,38	0,417
12	PAD	320	0,125	0,805	0,76	0,63	0,731
13	PAD	360	0,075	0,598	0,54	0,45	0,531
14	PAD	360	0,1	0,478	0,42	0,41	0,437
15	PAD	360	0,125	0,477	0,43	0,26	0,391
16	PAD	420	0,075	0,618	0,59	0,6	0,602
17	PAD	420	0,1	0,707	0,68	0,65	0,680
18	PAD	420	0,125	0,675	0,77	0,79	0,746
19	PD	320	0,075	0,468	0,32	0,48	0,423
20	PD	320	0,1	0,239	0,34	0,32	0,301
21	PD	320	0,125	0,469	0,56	0,63	0,553
22	PD	360	0,075	0,471	0,46	0,47	0,469
23	PD	360	0,1	0,45	0,59	0,42	0,488
24	PD	360	0,125	0,204	0,22	0,21	0,212
25	PD	420	0,075	0,295	0,31	0,28	0,296
26	PD	420	0,1	0,361	0,39	0,47	0,408
27	PD	420	0,125	0,545	0,56	0,49	0,534

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1 Generalidades**

El presente capítulo se dedica a analizar los resultados de rugosidad obtenida de acuerdo a las estrategias y parámetros de corte que fueron utilizados en los ensayos.

Inicialmente se realiza un análisis de la rugosidad frente a todos los ensayos realizados donde se encuentra el ensayo que brindó la mejor rugosidad, posterior a ello se analiza la rugosidad por cada factor es decir por estrategia, velocidad de corte y avance, donde, se mostrará los mejores resultados por cada factor.

Se realiza un análisis por el método estadístico Taguchi y el análisis de la varianza con el método ANOVA para determinar cuál es el factor que más influye en el mecanizado, se obtienen los porcentajes de influencia de cada factor en la rugosidad superficial obtenida. Además, se determina la estrategia y parámetros de corte óptimos en operaciones de fresado 3D para aleaciones de aluminio AA7075 T6.

Mediante el software estadístico Minitab con método Taguchi, obtiene una ecuación de regresión que predice la rugosidad si se trabaja con los factores establecidos en este proyecto, el porcentaje de error entre la rugosidad medida y la calculada es mínimo y mediante un intervalo de confianza se determina que el proceso realizado en este proyecto es efectivo.

#### **3.1. Análisis de rugosidad Ra media por ensayo**

Para el análisis de resultados por ensayo se realiza una gráfica de dispersión y se verifica el comportamiento de la rugosidad por cada ensayo realizado. La gráfica de la Figura 26 muestra el comportamiento de la rugosidad de todos los 27 ensayos realizados.

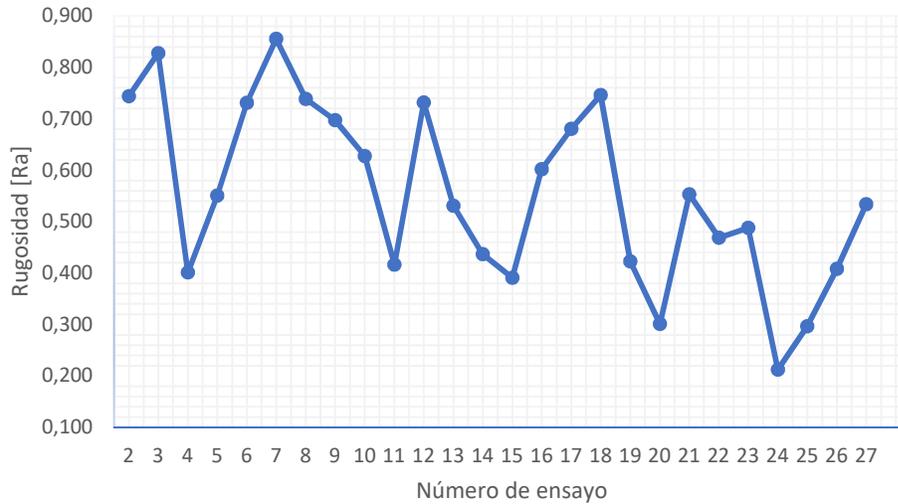


Figura 26. Rugosidad obtenida por ensayo. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Se aprecia que la mejor rugosidad Ra obtenida en los ensayos es de 0,212  $\mu\text{m}$  perteneciente al ensayo 24. La Tabla 23 muestra los factores que brindaron este resultado.

Tabla 23. Ensayo que presenta la menor rugosidad

Ensayo No	Estrategia	VC [m/min]	Fz [mm/z]	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ]
24	PD	360	0.075	0.212

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

### 3.2. Análisis de rugosidad Ra media por Estrategia de mecanizado

Para el análisis de cada estrategia se realizan gráficas de dispersión. La Tabla 24 muestra los resultados de la rugosidad Ra media con respecto a las estrategias.

Tabla 24. Rugosidad Ra media en cada estrategia de mecanizado

Estrategia	Ra medio [ $\mu\text{m}$ ]
1 (CD)	0,715
2 (PAD)	0,579
3 (PD)	0,429

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

En la gráfica de la Figura 27 se representa la línea de tendencia para los resultados de la rugosidad Ra con cada estrategia de mecanizado.

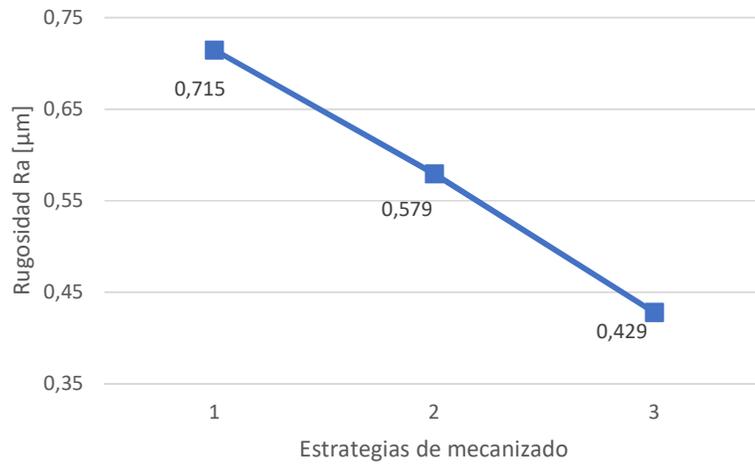


Figura 27. Rugosidad Ra media vs Estrategias de mecanizado. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Se puede apreciar que la menor rugosidad Ra se obtiene con la estrategia PD, generando una tendencia lineal para comparar las estrategias. Se representa como disminuye la rugosidad entre las estrategias CD, PAD y PD.

La estrategia PD disminuye la rugosidad en un 40 % con respecto a la estrategia CD y el 26% con respecto a PAD como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Porcentaje de reducción del mejor resultado con relación a los demás

Resultado		Mejor resultado		
Estrategia	Ra Prom. [um]	Estrategia	Ra Prom. [um]	Porcentaje reducido [%]
CD	0,715	PD	0,429	40
PAD	0,579			26

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

### 3.3. Análisis de rugosidad Ra media por Velocidad de corte efectiva

La Tabla 26 muestra los resultados de la rugosidad con respecto a la velocidad de corte.

Tabla 26. Rugosidad Ra media en cada velocidad de corte efectiva

VC [m/min]	Ra medio [ $\mu\text{m}$ ]
320	0,617
360	0,483
420	0,623

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

En la gráfica de la Figura 28 se representa los resultados de la rugosidad Ra media con cada velocidad de corte efectiva.

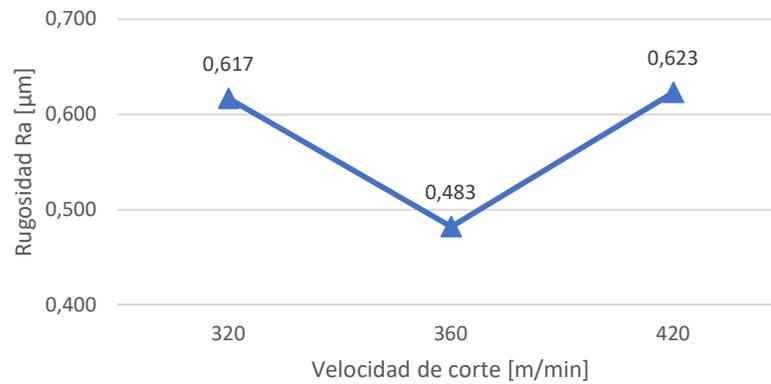


Figura 28. Rugosidad Ra media vs Velocidad de corte. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Se puede apreciar que la menor rugosidad se obtiene con una velocidad de corte de 360 m/min. La velocidad de 360 m/min disminuye la rugosidad en un 22 % aproximadamente con respecto a velocidades de 320 y 420 m/min como indica la Tabla 27.

Tabla 27. Porcentaje de reducción del mejor resultado con relación a las demás Vc

Resultado		Mejor resultado		
Vc [m/min]	Ra Prom. [ $\mu\text{m}$ ]	Vc [m/min]	Ra Prom. [ $\mu\text{m}$ ]	Porcentaje reducido [%]
320	0,617	360	0,483	21,7
420	0,623			22,5

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

### 3.4. Análisis de rugosidad Ra media por avance por diente

La Tabla 28 muestra los resultados de la rugosidad Ra media con respecto al avance.

Tabla 28. Rugosidad Ra media en cada avance por diente

Fz [mm/z]	Ra medio [ $\mu\text{m}$ ]
0,075	0,570
0,1	0,551
0,125	0,602

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

En la gráfica de la Figura 29 se representa la línea de tendencia para los resultados de la rugosidad Ra con cada avance por diente.

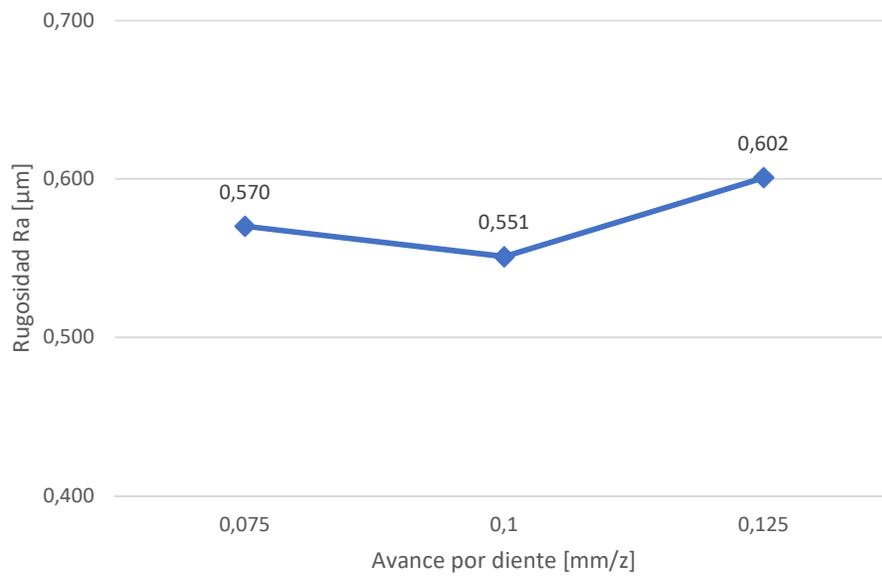


Figura 29. Rugosidad Ra media vs Avance por diente. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Se puede apreciar que la menor rugosidad Ra media se obtiene con un avance de 0,1 mm/z.

El avance de 0,1 mm/z disminuye la rugosidad media en un 3,3 y 8,5 % aproximadamente con respecto a avances de 0,075 y 0,125 mm/z respectivamente, como indica la Tabla 29.

Tabla 29. Porcentaje de reducción del mejor resultado con relación a los demás Fz

Resultado		Mejor resultado			Porcentaje reducido [%]
Fz [m/min]	Ra Prom. [um]	Fz [m/min]	Ra Prom. [um]		
0,075	0,57	0,1	0,551	3,3	
0,125	0,602			8,5	

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Con el análisis realizado se puede determinar que el factor que más influye porcentualmente con respecto a los otros es el factor de estrategia de mecanizado. Por lo tanto, a continuación, se realiza un análisis de cada estrategia de mecanizado con los parámetros de corte de velocidad y avance.

### 3.5. Rugosidad por velocidad de corte efectiva en estrategias de mecanizado.

La Tabla 30 muestra la rugosidad promedio obtenida con respecto a la velocidad de corte.

Tabla 30. Promedio de la rugosidad Ra respecto a Vc por cada estrategia

Estrategia	Vc [m/min]	Ra Prom [μm]
CD	320	0,833
	360	0,547
	420	0,764
PAD	320	0,592
	360	0,453
	420	0,693
PD	320	0,426
	360	0,446
	420	0,413

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

En el gráfico de la Figura 30, se muestra el comportamiento de la rugosidad Ra con respecto a la velocidad de corte efectiva en la estrategia de contorno en descenso.



Figura 30. Rugosidad Ra vs Velocidad de corte efectiva con CD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Para la estrategia de contorno en descenso se obtiene una mejor rugosidad con velocidad de corte efectiva a 360 m/min.

La velocidad a 360 m/min disminuye la rugosidad media en un 34 y 28 % aproximadamente con respecto a velocidades de 320 y 420 m/min respectivamente.

La Figura 31, muestra el comportamiento de la rugosidad Ra con respecto a la velocidad de corte efectiva en la estrategia de paralelo en ascenso - descenso.

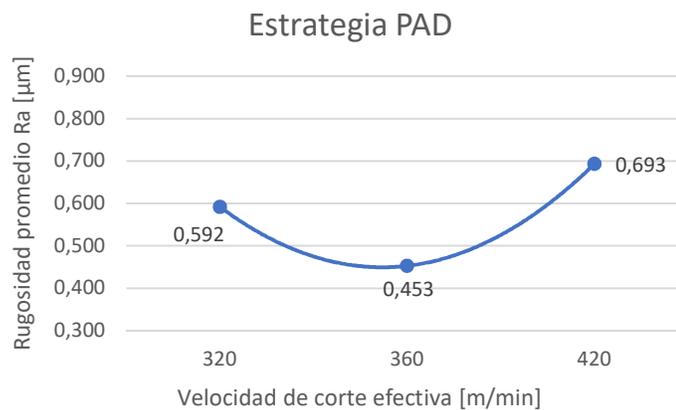


Figura 31. Rugosidad Ra vs Velocidad de corte efectiva con PAD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

La velocidad de 360 m/min obtiene la mejor rugosidad con la estrategia de paralelo en ascenso y descenso.

La velocidad de 360 m/min disminuye la rugosidad media en un 23 y 34 % aproximadamente con respecto a velocidades de 320 y 420 m/min respectivamente.

En el gráfico de la Figura 32, se muestra el comportamiento de la rugosidad Ra con respecto a la velocidad de corte efectiva en la estrategia de paralelo en descenso.

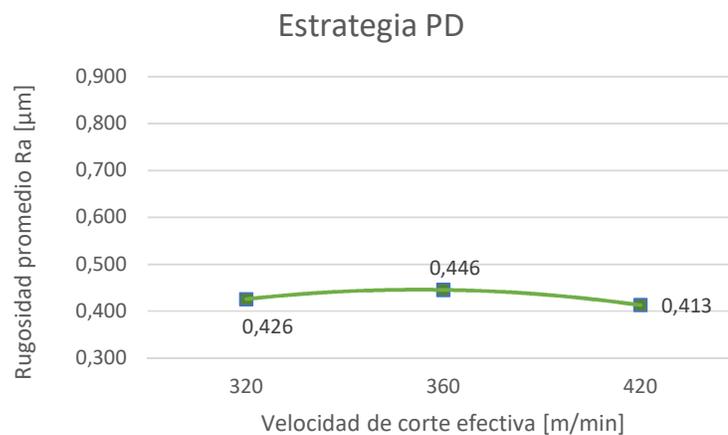


Figura 32. Rugosidad Ra vs Velocidad de corte efectiva con PD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Para estrategias PD, la rugosidad media obtenida con 360 m/min es levemente mayor con una relación del 5,8 y 7,4% a las obtenidas con 320 y 420 m/min respectivamente.

Se puede apreciar que la rugosidad varía ligeramente con respecto a la velocidad de corte al utilizar la estrategia de paralelo en descenso, sin embargo, se obtiene una mejor rugosidad con una velocidad de 420 m/min.

### 3.5.1. Comparación de estrategias de mecanizado por velocidad de corte

Se realiza una comparación de las diferentes estrategias de mecanizado con respecto a la velocidad de corte como se muestra en la Figura 33.

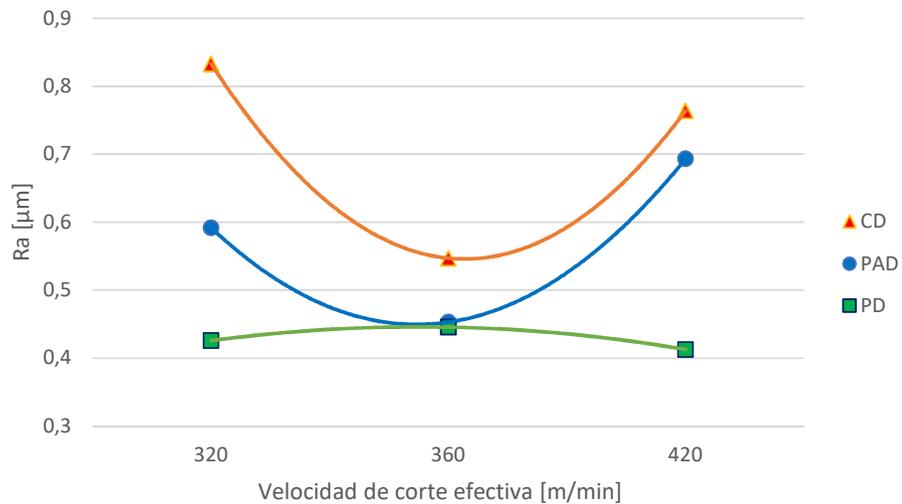


Figura 33. Comparación de Ra vs VC con las diferentes estrategias. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Como ya se había mencionado la estrategia PD es la que obtiene mejores resultados, sin embargo, en PD la influencia de la velocidad de corte en la rugosidad es mínima.

### 3.6. Rugosidad por avance en estrategias de mecanizado

La Tabla 31 se muestra los resultados de la rugosidad Ra con respecto al avance por diente.

Tabla 31. Promedio de la rugosidad Ra respecto al avance por cada estrategia

Estrategia	Fz [mm/z]	Ra Prom [μm]
CD	0,075	0,728
	0,100	0,664
	0,125	0,752
PAD	0,075	0,587
	0,100	0,528
	0,125	0,623
PD	0,075	0,396
	0,1	0,460
	0,125	0,428

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

En el gráfico de la Figura 34, se muestra el comportamiento de la rugosidad Ra con respecto al avance por diente en la estrategia de contorno en descenso.

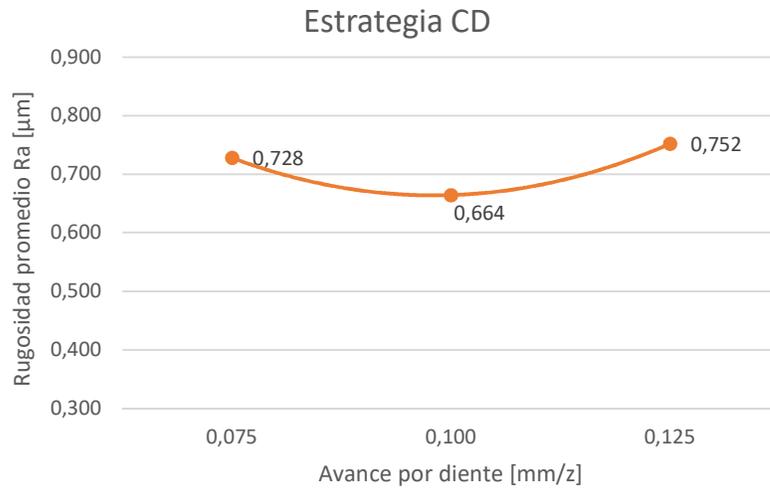


Figura 34. Rugosidad Ra vs Fz con estrategia CD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Se puede apreciar que la rugosidad varía levemente con respecto al avance por diente.

El gráfico de la Figura 35, muestra el comportamiento de la rugosidad Ra promedio con respecto al avance por diente en la estrategia de paralelo en ascenso - descenso.

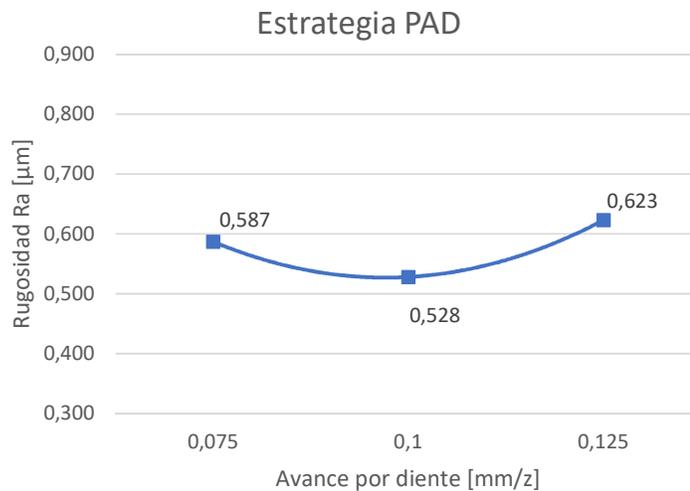


Figura 35. Rugosidad Ra vs Fz con estrategia PAD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Se puede apreciar que la rugosidad no varía significativamente con respecto al avance, sin embargo, con un avance de 0,1 mm/z se obtiene una menor rugosidad.

En el gráfico de la Figura 36, se muestra el comportamiento de la rugosidad Ra promedio con respecto al avance por diente en la estrategia de paralelo en descenso.

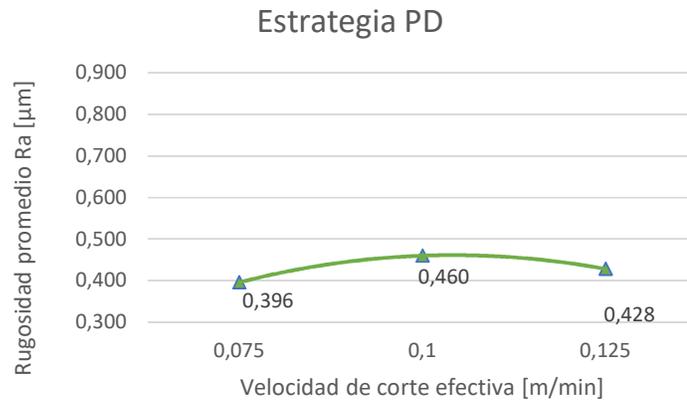


Figura 36. Rugosidad Ra vs Fz con estrategia PD. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

De igual manera se aprecia que el factor de avance influye ligeramente en la rugosidad superficial por cada estrategia de mecanizado.

De modo que, al realizar un análisis ANOVA se confirmará que el porcentaje de influencia de este factor será bajo.

### 3.6.1. Comparación de estrategias por avance

Se realiza una comparación de la rugosidad superficial obtenida con las diferentes estrategias de mecanizado con respecto al avance. En la Figura 37 se muestra un diagrama de líneas de los valores de la rugosidad Ra obtenidos con cada estrategia.

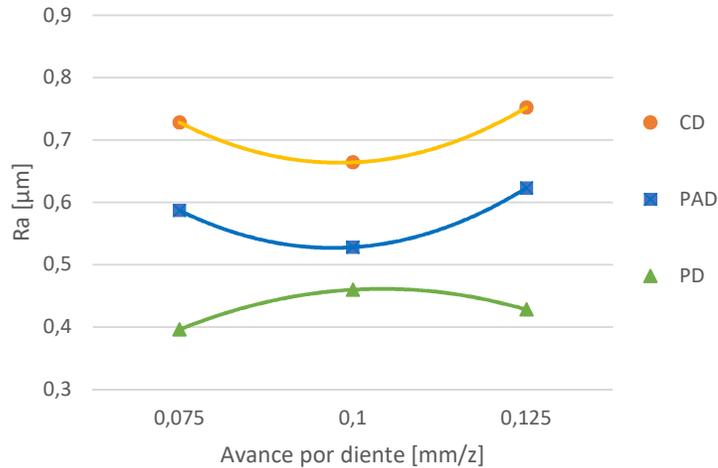


Figura 37. Rugosidad vs avance con cada estrategia. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Se puede establecer entonces que, aumentando el avance, la rugosidad no aumentará drásticamente y que se puede mejorar los tiempos de mecanizado, con un avance de 0,075 mm/z perteneciente a 3000 mm/min se puede obtener casi la misma calidad que con un avance de 0,125 mm/z perteneciente a 5000 mm/min.

### 3.7. Aplicación del método ANOVA.

El análisis ANOVA ayudará a probar formalmente la importancia de los factores y sus interacciones al comparar el cuadrado medio con una estimación de los errores experimentales en niveles de confianza específicos.

El cálculo del análisis ANOVA se realizó utilizando las ecuaciones mencionadas en el marco teórico. No obstante, a continuación, se realiza el ejemplo de cálculo para el factor A perteneciente a las estrategias de mecanizado.

#### 3.7.1. Modelo de cálculo para el factor A

Suma total de los resultados

$$\sum_{i=1}^{27} Ra_i = 0,927+0,744+0,827\dots\dots\dots+0,408+0,534 = 15,498$$

Utilizando la ecuación 18 se obtiene el factor de corrección CF

$$CF = \frac{15,498^2}{27} = 8,89$$

La suma total de cuadrados se obtiene con ecuación 17

$$S_T = (0,859 + 0,553 + 0,683 \dots \dots + 0,166 + 0,285) - 8,89$$
$$S_T = 9,822 - 8,89 = 0,927$$

Factor A suma de los cuadrados

$$S_A = \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_2^2}{n_{A2}} + \frac{A_3^2}{n_{A3}} - CF$$

Donde:

$n_{A1}$  = número de ensayos para cada nivel en el factor A

$A_i$  = suma de resultados de Ra en cada nivel

$$S_A = \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_2^2}{n_{A2}} + \frac{A_3^2}{n_{A3}} - CF$$
$$S_A = \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_2^2}{n_{A2}} + \frac{A_3^2}{n_{A3}} - CF$$
$$S_A = \frac{6,432^2}{9} + \frac{5,214^2}{9} + \frac{3,852^2}{9} - 8,89 = 0,370$$

La varianza se obtiene con la ecuación 14

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} = \frac{0,376}{2} = 0,185$$

Donde los grados de libertad del factor A es:

$$f_A = 3 - 1 = 2$$

El error se determina:

$$e = S_T - (S_A + S_B + S_C)$$
$$e = 0,927 - (0,370 + 0,115 + 0,011) = 0,431$$

Varianza del error

$$V_e = \frac{e}{DF} = \frac{0,431}{18} = 0,024$$

El valor F del factor A se calcula con la expresión 15:

$$F_A = \frac{V_A}{V_e}$$
$$F_A = \frac{0,185}{0,024} = 7,70$$

Con la ecuación 16 se determina el porcentaje de influencia del factor A:

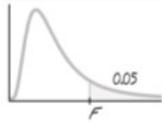
$$P_A = \frac{S_A}{S_T} \cdot 100\%$$
$$P_A = \frac{0,370}{0,927} \cdot 100 = 39,9 \%$$

Prueba F

Para la prueba F, se compara el valor calculado con el valor de la tabla 32 de distribución F con un nivel de confianza del 95%, lo que indicará, que el parámetro a estimar se encuentre en dicho intervalo de confianza estadísticamente y un nivel de significancia de  $\alpha$  0,05, lo que indica que el 5 % de riesgo de cometer un error en la hipótesis alternativa mencionada más adelante.

Los grados de libertad en el numerador son de 2 correspondiente a los grados de libertad de cada factor  $f$ . Los grados de libertad del denominador es de 18 correspondiente a los grados de libertad del arreglo ortogonal DF.

Tabla 32. Distribución F ( $\alpha = 0,05$  en la cola a la derecha)



**Grados de libertad en el numerador**

Grados de libertad del denominador	Grados de libertad en el numerador		
	1	2	3
17	4,45	3,59	3,19
18	4,41	<b>3,55</b>	3,15
19	4,38	3,52	3,12

El valor obtenido  $F(0,05;2;18)$  es igual a 3,55, dicho valor es menor que el calculado  $F_A=7,70$  por lo tanto se concurre a una hipótesis alternativa en donde su factor posee diferencia estadística significativa, el factor A correspondiente a “estrategias de mecanizado”, es un factor que influye en la rugosidad superficial.

### 3.7.2. Resultados del método ANOVA

Se realiza el mismo procedimiento realizado con el factor A para los demás factores B y C. La Tabla 33 muestra los resultados del ANOVA para todos los factores.

Tabla 33. Resultados ANOVA

Factor/Fuente	DF	S	V	Valor F	%P
A (Estrategia)	2	0,370	0,185	7,739	39,95
B (Vc)	2	0,115	0,057	2,393	12,35
C (Avance)	2	0,011	0,006	0,237	1,22
Error	18	0,431	0,024		44,55
ST (total)	26	0,927			100

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

La hipótesis nula es la afirmación de que el factor analizado no posee diferencia significativa estadísticamente en el origen de las variaciones, es decir influye en el experimento.

La hipótesis alternativa es la afirmación de que el factor analizado posee diferencia significativa estadísticamente en el origen de las variaciones, por lo tanto, es un parámetro influyente en el estudio.

### 3.7.3. Prueba de hipótesis

Para el factor A (Estrategia de mecanizado) el valor F tabulado  $F_A$  (0,05:2:18) es igual a 3,55, es menor que el calculado  $F_A=7,70$ , por lo tanto, su factor posee diferencia significativa estadísticamente en el origen de las variaciones, el factor A correspondiente a “estrategias de mecanizado”, se admite la hipótesis alternativa.

Para el factor B (Vc) el valor F tabulado  $F_B$  (0,05:2:18) es igual a 3,55, es mayor que el calculado  $F_B=2,39$ , por lo tanto, su factor no posee diferencia significativa estadísticamente en el origen de las variaciones, el factor B correspondiente a “velocidad de corte”, se admite la hipótesis nula.

Para el factor C (Fz) el valor F tabulado  $F_C$  (0,05:2:18) es igual a 3,55, es mayor que el calculado  $F_C=0,237$ , por lo tanto, su factor no posee diferencia significativa estadísticamente en el origen de las variaciones, el factor C correspondiente al “avance por diente”, se admite la hipótesis nula.

### 3.8. Análisis de la varianza

El método de Taguchi recalca la importancia de estudiar la variación de la respuesta utilizando la correspondencia señal/ruido (S / N) o acción respuesta. Con pie a los resultados, se identifica la disposición óptima de los factores de control que hace que el proceso sea robusto ante la variación provocada por los factores de ruido. La Tabla 34 indica los valores de la varianza obtenidos en el ensayo.

Tabla 34. Resultados del análisis de la varianza de los niveles según sus factores

Nivel	A	B	C
1	0,715	0,617	0,570
2	0,579	0,483	0,551
3	0,429	0,623	0,602
Variación	0,285	0,139	0,051
Rango	1	2	3
Promedio	0,575		

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Donde la variación es igual a:

$$\begin{aligned} \text{Variación} &= \text{Promedio de niveles (máximo)} \\ &\quad - \text{Promedio de niveles (mínimo)} \end{aligned}$$

Entonces:

$$\text{Variación}_A = 0,715 - 0,429 = 0,285 [\mu m]$$

$$\text{Variación}_B = 0,623 - 0,483 = 0,139 [\mu m]$$

$$\text{Variación}_C = 0,602 - 0,551 = 0,051 [\mu m]$$

En la Tabla 34 se aprecia que el factor A posee mayor varianza entonces pertenece al rango 1, por lo tanto, se demuestra que es el factor más influyente, el factor C posee menor variación que pertenece al rango 3 y se demuestra que es el factor que menos influye.

### **3.9. Niveles óptimos de mecanizado**

Basado en el análisis de la varianza, se logra los parámetros óptimos de mecanizado en el fresado 3D al obtener menores valores de rugosidad Ra media.

Se obtiene una mejor rugosidad superficial Ra media con una estrategia de mecanizado PD (nivel 3 de factor A), velocidad de corte 360 m/min (nivel 2 del factor B) y avance de 0,1 mm/z (nivel 2 del factor C). La figura 38, muestra el efecto de los parámetros en la calidad superficial.

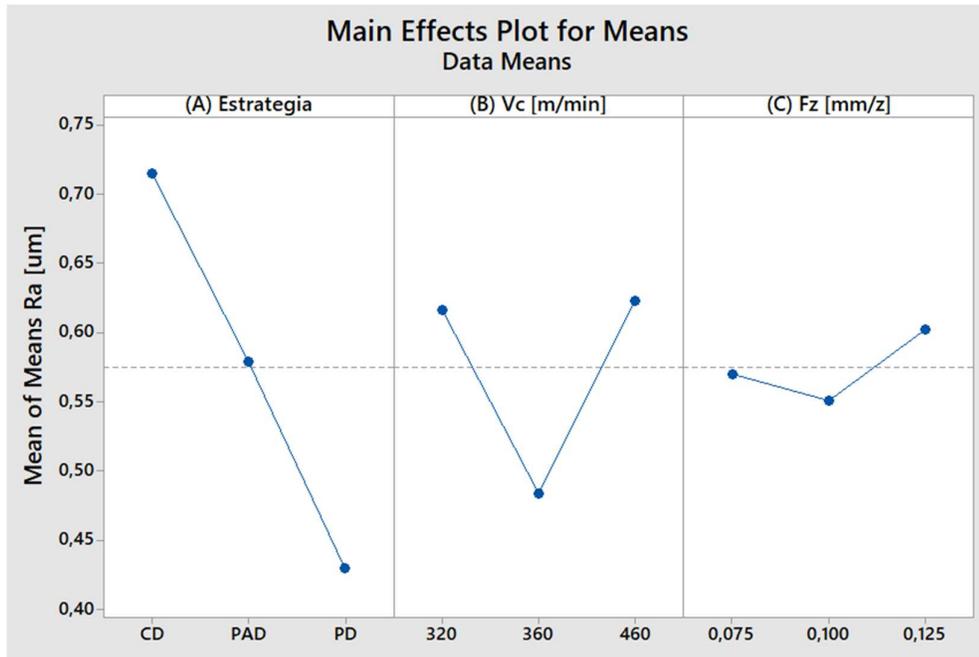


Figura 38. Efecto de los factores en operaciones de fresado 3D. Fuente: Captura de *Minitab*

### 3.10. Predicción de la rugosidad

La estrategia de mecanizado y la velocidad de corte son los parámetros que más influyen en la rugosidad de este proceso, de modo que, para obtener la ecuación de regresión se toma en cuenta los factores A y B.

Se obtiene la ecuación de regresión que predice la rugosidad Ra en función de los resultados de la interacción de los factores más influyentes en el proceso, para ello se utiliza el software para cálculo estadístico Minitab.

La rugosidad prevista se detalla en la ecuación:

$$R_a = 0,84 - 0,178.A + 0,00002.B + 0,00005.A.B \quad (21)$$

Donde:

A= 1, 2, 3 (estrategias: CD, PAD, PD)

B= 320, 360, 420 m/min

Además, se obtiene la gráfica en 3 dimensiones de la interacción entre los factores de

Estrategia y velocidad con respecto a la rugosidad Ra como se indica en la Figura 39.

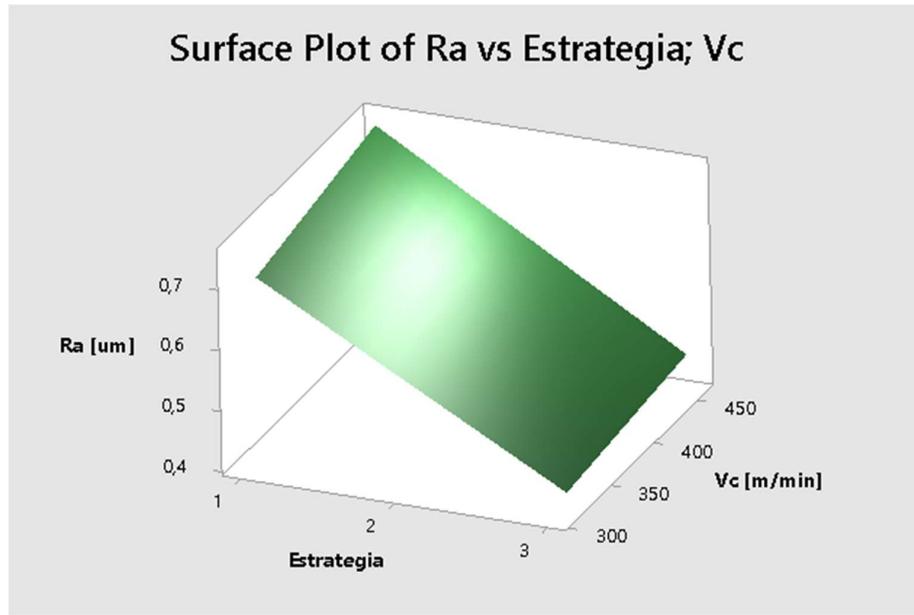


Figura 39. Rugosidad Ra media vs estrategia y velocidad de corte. Fuente: Captura de *Minitab*

Para reconocer la ecuación obtenida, se procede a determinar el porcentaje de error con respecto a las mediciones de las pruebas, se calcula la rugosidad de los ensayos que poseen el avance óptimo de 0,1 mm/z, en la Tabla 35 se muestra los resultados de los valores calculados con la ecuación 21.

Tabla 35. Resultados de la rugosidad calculada con el avance óptimo de 0,1 mm/z

Ensayo No	Fz [mm/z]	Estrategia	Vc [m/min]	Ra medida [μm]	Ra calculado [μm]	Error %
2	0,1	CD	320	0,744	0,684	8,06
5	0,1	CD	360	0,550	0,687	19,9
8	0,1	CD	420	0,739	0,691	6,45
11	0,1	PAD	320	0,417	0,522	20,2
14	0,1	PAD	360	0,437	0,527	17,1
17	0,1	PAD	420	0,680	0,534	21,4
20	0,1	PD	320	0,301	0,364	17,2
<b>23</b>	0,1	PD	360	0,488	0,370	24,2
<b>26</b>	0,1	PD	420	0,408	0,377	7,6

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

De acuerdo con los resultados de los errores mostrados se puede apreciar que la fórmula de predicción de rugosidad posee un error que varía entre el 6,45 y 24,2 %, se define que es un error relativamente mínimo, por lo cual, se acepta la ecuación obtenida para condiciones óptimas de mecanizado.

### 3.11. Validación de la rugosidad prevista

Para la validación se realizó el mecanizado de una probeta con los parámetros óptimos de maquinado obtenidos en el análisis estadístico.

La Tabla 36 indica los parámetros óptimos de maquinado y la rugosidad Ra superficial prevista a obtener.

Tabla 36. Parámetros óptimos de mecanizado

(A) Estrategia	(B) VC [m/min]	(C) Fz [mm/z]	Ra previsto [ $\mu\text{m}$ ]
(3) PD	360	0,1	0,370

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

En la Figura 40 se muestra el resultado de la medición de rugosidad Ra obtenido con el rugosímetro Mitutoyo SJ210 en la superficie mecanizada con los parámetros óptimos.

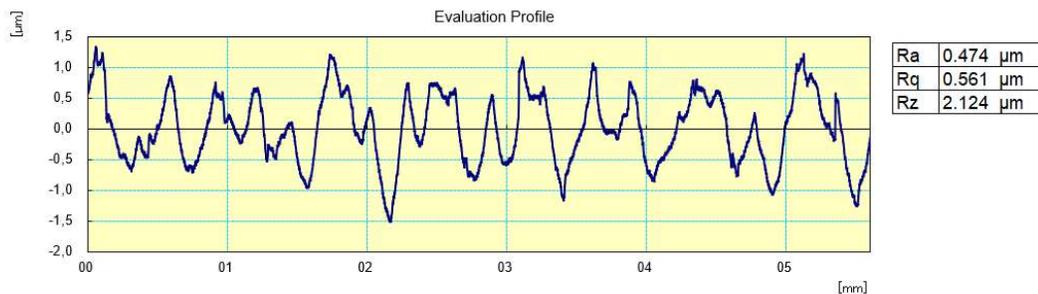


Figura 40. Medición de rugosidad con parámetros óptimos. Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Se aprecia que se obtiene una rugosidad Ra de 0,474  $\mu\text{m}$ , el valor que predice la ecuación es de 0,370  $\mu\text{m}$ , se obtiene de esta manera un error del 21% con relación a la rugosidad real obtenida.

### 3.12. Intervalo de confianza

El intervalo verifica el rango donde los valores de rugosidad óptimos del experimento se desenvuelven, esto se determina para validar el proceso.

El intervalo de confianza (C.I.) se obtiene mediante la ecuación 22:

$$C.I. = \pm \sqrt{F(1, D_{ef}) \cdot Ve \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R_p} \right]} \quad (22)$$

Donde se obtiene de la Tabla 32:

$D_{ef}$ : Son los grados de libertad del error = 18

De la Tabla 32, con un nivel de confianza del 95% de Fisher se obtiene  $F(1, D_{ef}) =$

$$F(1,18) = 4,41$$

$Ve$ : Varianza del error = 0,024

De la ecuación 23 se obtiene el número de replicaciones ( $n_{eff}$ ):

$$n_{eff} = \frac{N}{1+V_t} \quad (23)$$

Donde N es el número de pruebas,  $V_t$  es el número de grados de libertad concerniente con los factores que influyen significativamente en la respuesta es decir 2.  $R_p$  es el número de mediciones de las pruebas, en este estudio fueron 3.

Entonces C.I. se obtiene:

$$C.I. = \pm \sqrt{4,41 \cdot (0,024) \cdot \left[ \frac{1}{\frac{27}{1+2}} + \frac{1}{3} \right]}$$
$$C.I. = \pm 0,215$$

Según Taguchi, la rugosidad óptima se puede obtener con la ecuación 24.

$$R_{\text{óptima}} = W + X + Y - 3 \cdot R_{\text{mean}} \quad (24)$$

Donde W, X, Y es el valor medio menor de los niveles de cada factor de la Tabla 34 y  $R_{mean}$  es la media de rugosidad total de la misma tabla.

Entonces:

$$R_{\text{óptima}} = 0,429 + 0,483 + 0,551 - 3 \cdot 0,575$$

$$R_{\text{óptima}} = 0,260 \mu\text{m}$$

Entonces la óptima rugosidad prevista en la superficie es 0,260  $\mu\text{m}$  con un intervalo de confianza de  $\pm 0,215\mu\text{m}$ .

La comprobación del experimento se puede comprobar con el resultado de la mejor rugosidad obtenida en los ensayos mostrado en la Tabla 37, donde, en el ensayo 24 se obtiene la menor rugosidad con un valor de 0,212  $\mu\text{m}$ .

Tabla 37. Menor valor de rugosidad promedio del ensayo

Ensayo No	Estrategia	VC [m/min]	Fz [mm/z]	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ]
24	PD	360	0,075	0,212

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

Entonces se asegura la validez del estudio, los resultados se encuentran en el rango de los valores óptimos obtenidos del proceso.

### 3.13. Análisis de costos

Los costos correspondientes al desarrollo de este proyecto se desglosan especifican en costos directos, costos por servicio de equipos y costos indirectos.

#### 3.13.1. Costos directos

Estos costos se confinan al costo de materiales según la cantidad de ensayos propuestos por el método Taguchi. En la Tabla 38 se muestra los costos de materiales utilizados en el ensayo.

Tabla 38. Costo de materiales utilizado en los ensayos

Material	Cantidad	Valor unitario USD	Valor total USD
Placas de Aleación de Aluminio 7075 T6 Dimensiones 80x80x50 mm.	6	40	240
Fresa de desbaste de carburo con revestimiento TiAlN, d10 x 70 mm.	1	30	30
Fresa de acabado punta redonda de carburo con revestimiento TiAlN, d14x70 mm.	1	240	240
		TOTAL	510

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

En la Tabla 39 se muestra los costos directos por servicios de manufactura del centro de mecanizado CNC Emco y medición de rugosidad con el rugosímetro Mitutoyo. Sin embargo, estos valores son aparentes debido a que los equipos pertenecen a la Universidad La Salesiana y se utilizan de manera gratuita para estudiantes que desarrollan proyectos de investigación.

Tabla 39. Costos directos por servicio de equipos

Servicio	horas	Valor hora USD	Valor total USD
Centro de Mecanizado CNC Emco	20	30	600
Rugosímetro Mitutoyo	10	5	50
		TOTAL	650

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

### 3.13.2. Costos indirectos

Los costos indirectos representan los valores de los materiales y servicios indirectos a los ensayos pero que son necesarios para la presentación del proyecto como se muestra en la Tabla 40.

Tabla 40. Costos indirectos en el proyecto

Descripción	Valor total
	USD
Suministros e impresiones	100
Transporte	40
Asesoría externa	100
TOTAL	240

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

### 3.13.3. Costos totales

La Tabla 41 se muestra los costos totales en el proyecto realizado, cabe mencionar que los costos directos por servicios son teóricos debido a que son realizados dentro de la universidad sin costo.

Tabla 41. Costos totales del proyecto

Costos	Valor total
	USD
Directos de materiales	510
Directos por servicios	650
Indirectos	240
TOTAL	1.400

Elaborado por: Jorge Pincha & Juan Pillajo

### 3.14. Conclusiones

Los resultados del experimento permitieron encontrar las condiciones para seleccionar estrategias de mecanizado óptimas, se realizaron análisis estadísticos por cada factor y se determinaron las condiciones más significantes en el proyecto:

La mejor rugosidad Ra obtenida en los ensayos es de 0,212  $\mu\text{m}$  con la estrategia de fresado 3D paralelo en descenso PD, velocidad de corte efectiva de 360 m/min y avance de 0,125 mm/min.

La estrategia paralela en descenso PD disminuye la rugosidad en un 40 % con respecto a la estrategia CD y el 26% con respecto a PAD.

Con velocidad de 360 m/min se obtiene la menor rugosidad Ra media de 0,483  $\mu\text{m}$ , la velocidad de corte a 360 m/min disminuye la rugosidad en un 22 % aproximadamente con respecto a velocidades de 320 y 420 m/min.

Con un avance de 0,1 mm/z se obtiene la menor rugosidad Ra media de 0.551  $\mu\text{m}$ , el avance de 0,1 mm/z disminuye la rugosidad media en un 4 y 8 % aproximadamente con respecto a avances de 0,075 y 0,125 mm/z respectivamente.

Se establece que, aumentando el avance, la rugosidad no aumentará drásticamente de modo que, con un avance de 0,075 mm/z perteneciente a 3000 mm/min se puede obtener casi la misma calidad que con un avance de 0,125 mm/z perteneciente a 5000 mm/min.

Mediante el análisis ANOVA se determinó que el factor más influyente en el proceso es la estrategia de mecanizado con un porcentaje de influencia del 40 % mientras que la velocidad de corte con el 12,3 % y el avance con 1,2 % de influencia en la rugosidad superficial.

Basado en el análisis de la varianza se logró determinar parámetros óptimos de mecanizado en operaciones de fresado 3D al obtener menores valores de rugosidad Ra media, donde se obtiene una mejor rugosidad superficial Ra media con una estrategia de mecanizado PD, velocidad de corte a 360 m/min y avance por diente de 0,1 mm/z.

Mediante el software estadístico Minitab se obtuvo la ecuación de regresión que predice la rugosidad, con los parámetros óptimos se obtiene 0,370  $\mu\text{m}$  y en la medición real se obtiene una rugosidad Ra de 0,474  $\mu\text{m}$ , de esta manera se tiene un error del 21% con relación a la rugosidad real obtenida.

### **3.15. Recomendaciones**

Se recomienda realizar experimentos utilizando la técnica MQL en el proceso de mecanizado, en este proyecto se lo realizó en seco, donde se pudo apreciar acumulación de partículas de viruta sobre las superficies y la herramienta que puede afectar la calidad superficial.

Efectuar ensayos en diferentes pendientes con los parámetros de corte óptimos encontrados en este estudio para determinar si la pendiente afecta en la rugosidad.

El avance es un factor que no influye significativamente en el acabado superficial como se determinó en la tabla 33, por lo tanto, se recomienda efectuar experimentos con avances superiores a los ensayados.

La estrategia de mecanizado es el factor más influyente en el acabado superficial, de modo que, se recomienda realizar una investigación que presente la influencia de las estrategias de mecanizado en el desgaste de herramientas de carburo con revestimiento TiAlN.

La herramienta utilizada es de carburo recubierta con TiAlN, de modo que se recomienda realizar investigaciones similares con herramientas de diferente recubrimiento para determinar la influencia del revestimiento en el acabado superficial.

## REFERENCIAS

- [1] Ivan Bohman, «Duraluminio para moldes plásticos catálogo,» Ivan Bohman, Quito, 2015.
- [2] R. Lemes Capla, «Efectos de la variación de sobremedida debido al uso de 2 ½ ejes en la operación de acabado,» *Ingeniería Mecánica*, vol. 1, pp. 31 - 39, 2008.
- [3] E.Vaca y B. Culqui., «Estrategia de mecanizado óptima en operaciones de fresado 3D en superficies,» *Congreso de Ciencia y Tecnología*, vol. 13, nº ISSN: 1390-4663, pp. 89-92, 23 Mayo 2018.
- [4] M. Lee a, «The optimal cutter orientation in ball end milling of cantilever-shaped thin plate,» *Material Processing Technology*, vol. 1, pp. 900 - 906, 2004.
- [5] B. Pasko, «High speed machining (HSM) – The effective way of modern cutting,» de *International Workshop CA Systems And Technologies*, Poland, 2002.
- [6] R. Chang, Química, México D.F: McGraw-Hill, 2010.
- [7] G. Mikell P, Fundamentos de manufactura moderna, México D.F: McGraw-Hill, 2007.
- [8] IVAN BOHMAN C.A., «IVAN BOHMAN,» Enero 2016. [En línea]. Available: <http://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2016/01/catalogo-general-IBCA.pdf>. [Último acceso: 24 Octubre 2018].
- [9] H. Gerling, Alrededor de las Máquinas-Herramientas, Barcelona: Reveté, S.A., 2006.
- [10] Sandvik Coromant, «Sandvik Coromant,» Noviembre 2017. [En línea]. Available: [http://sandvik.ecbook.se/se/es/training\\_handbook/](http://sandvik.ecbook.se/se/es/training_handbook/). [Último acceso: 5 Noviembre 2018].
- [11] S. Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [12] M. López de Lacalle, M. Laikiz y G. S, Mecanizado de alto rendimiento, BilBao: Izaro, Ed. (1st ed.), 2004.

- [13] Kendu, «Catalogo de parámetros de corte Katalog,» Kendu, Vasco, 2014.
- [14] M. Wang, «Residual Stresses Analysis in Ball end Milling of Nickel-Based Superalloy Inconel 718,» *Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology*, p. 1681–1689., 2017.
- [15] S. Aneiro, «Conceptos del maquinado con altas velocidades de corte aplicado en moldes y matrices,» *Ediciones Mecánicas*, p. 63–69, 2007.
- [16] V. Songmene, «Dust Emission During Dry Machining of Aeronautic Aluminum Alloys,» *Machining and Machinability of Aluminum Alloys*, p. 378–400, 2011.
- [17] E. Trent y P. Wright, *Metal Cutting*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [18] GUHRING, «GUHRING,» Julio 2017. [En línea]. Available: <http://media.guhring.com/catalogs/wrp4hs4gaiz.pdf?=-020718082045>. [Último acceso: 21 Noviembre 2018].
- [19] N. Liu, S. Wang, Y. F. Zhang y W. F. Lu, «A novel approach to predicting surface roughness based on specific cutting energy consumption when slot milling Al-7075,» *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 118, pp. 13-20, 2016.
- [20] Ó. Egyetem, «Study of z-level finishing milling strategy,» *Development in Machining Technology*, p. 83–90, 2014.
- [21] M. Chen, «A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process,» *Machine Tools & Manufacture*, p. 1077–1084, 2005.
- [22] MITUTOYO., «QUICK GUIDE TO SURFACE,» MITUTOYO., Korea, 2016.
- [23] J. Zhang, J. Chen y D. Kirby, «Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method,» *Journal of materials processing technology*, vol. 184, pp. 233-239, 2017.
- [24] A. Murat, «Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 Aluminium alloy via taguchi method,» 2013.
- [25] Pulido y R. d. l. V. Salazar, *Análisis y Diseño de Experimentos*, México DF: McGraw Hill, 2012.
- [26] Rama R., «Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of

Al/5%SiC composites,» *International Journal of Engineering Research* , vol. 2, nº 3, pp. 192 - 197, 2012.

- [27] M. F. Triola, Estadística, México DF: Pearson, 2009.
- [28] SUMINDU, «Sumindu aceros especiales e inoxidables,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.sumindu.com/especificaciones/40-%20DURALUMINIO%207075.pdf>. [Último acceso: 4 11 2018].
- [29] EMCO, Manual EMCO Concept Mill, Australia, 2016.
- [30] Axxecol, «AXXECOL S.A,» 06 Junio 2016. [En línea]. Available: [https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Faxxecol.com%2F\\_Axxecol%2F\\_DwPortal%2FDocuments%2FProdax%2520Spa.pdf](https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Faxxecol.com%2F_Axxecol%2F_DwPortal%2FDocuments%2FProdax%2520Spa.pdf). [Último acceso: 5 Noviembre 2018].
- [31] HSM Works, «Catálogo de software HSMWorks CAM,» Autodesk Inc., California, 2018.
- [32] L. M. López de Lacalle Marcaide, Mecanizado de Alto Rendimiento, 1st ed., Bilbao: Izaro, 2004.