

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:

DETERMINACIÓN DE ESTRATEGIAS DE MECANIZADO TRES EJES DE
SUPERFICIES CONCAVAS Y CONVEXAS EN ALUMINIO EN-AW-7075

AUTORES:

JUAN GABRIEL CHANATAXI GUALOTUÑA

RICHARD XAVIER VILLACIS ARCE

TUTOR:

ING. LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMIN

Quito, enero del 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, **Juan Gabriel Chanataxi Gualotuña**, con número de identificación N° 1721736591, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: **Determinación de estrategias de mecanizado tres ejes de superficies cóncavas y convexas en aluminio EN-AW-7075**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, 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 mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del Trabajo Final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, enero de 2018.



Juan Gabriel Chanataxi Gualotuña
C.I. 172173659-1

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, **Richard Xavier Villacis Arce**, con número de identificación N° 0803070317, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: **Determinación de estrategias de mecanizado tres ejes de superficies cóncavas y convexas en aluminio EN-AW-7075**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, 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 mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del Trabajo Final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, enero del 2018.

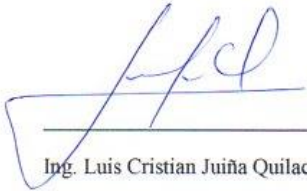


Richard Xavier Villacis Arce
C.I. 080307031-7

DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico: **Determinación de estrategias de mecanizado tres ejes de superficies cóncavas y convexas en aluminio EN-AW-7075**, realizado por **Juan Gabriel Chanataxi Gualotuña** y, **Richard Xavier Villacis Arce**, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como Trabajo Final de Titulación.

Quito, enero del 2018.



Ing. Luis Cristian Juiña Quilachamin MSc.
DIRECTOR DE PROYECTO.

DEDICATORIA

A Dios por permitirme culminar una etapa más de mi vida; a mis padres, Ramiro y María Transito por el apoyo incondicional que me han sabido brindar, ejemplo de constancia y superación; a mis hermanos Pablo y Eduardo por el apoyo, comprensión y compañía; y, a mi compañera de vida Betty Rocio por sus consejos y ayuda brindados.

Juan Chanataxi

A mi querida esposa Nelly Carvache, mi compañera de vida, quien me ha acompañado durante toda esta etapa; a mis hijos Aldo, Alessandro y Alissa los que me motivan a seguir adelante; a mi amada madre Verónica Arce que ha sido mi ángel en todo momento desde su pronta partida y a mi padre Richard Villacis, quien fue el mentor de este logro.

Richard Villacis

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica Salesiana, autoridades y docentes que conforman la Carrera de Ingeniería Mecánica por los consejos, conocimientos y valores éticos entregados en mi formación académica. Al Ingeniero Luis Christian Juiña Quilachamin, tutor del proyecto de titulación, por su experiencia, guía y paciencia para la elaboración de este proyecto. A los docentes que conforman los Laboratorios de CNC (Control Numérico Computarizado) y Metrología por su ayuda en el desarrollo del proyecto.

Juan Chanataxi

A Dios por mantenerme con vida y salud, a mis tías por su apoyo incondicional, a las autoridades de la Universidad Politécnica Salesiana, a los docentes que forma parte de la Carrera de Ingeniería Mecánica por su paciencia para impartir conocimientos y valores a lo largo de mi formación académica, al Ingeniero Luis Christian Juiña Quilachamin, tutor del proyecto de titulación que con su experiencia me supo encaminar para la elaboración del mismo. A los docentes de los Laboratorios de CNC (Control Numérico Computarizado) y Metrología que con su colaboración hicieron posible que este proyecto concluya.

Richard Villacís

CONTENIDO

RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	17
OBJETIVOS.....	19
CAPITULO 1.....	20
MARCO TEÓRICO	20
1.1. Aluminio	20
1.1.1. Propiedades del aluminio En-AW-7075	21
1.1.2. Características del Aluminio EN-AW-7075	22
1.1.3. Aplicaciones del aluminio.....	23
1.1.4. Fabricación en moldeo por soplado	24
1.1.5. Mecanizado	25
1.1.6. Mecanizado en Aluminio EN-AW-7075	25
1.1.7. Parámetros de mecanizado en Aluminio.....	25
1.2. Herramientas de corte	26
1.2.1. Selección de material para la herramienta de trabajo.....	27
1.2.2. Generación de trayectorias en superficies libres.....	27
1.2.3. Parámetros de mecanizado.....	29
1.2.4. Herramienta de punta redonda o esférica.....	30
1.2.5. Fórmulas para el fresado	31
1.2.6. Parámetros de mecanizado con fresas de punta esférica.....	34
1.2.7. Mecanizado en superficies cóncavas	35
1.2.8. Mecanizado en superficies convexas	36
1.2.9. Fuerzas de corte.....	37
1.3. Introducción al CAD/CAM.....	37
1.3.1. Computer Aided Design (CAD):	38
1.3.2. Computer Aided Manufacturing (CAM):	38
1.3.3. Computer Aided Engineering (CAE):.....	38
1.3.4. Proceso de fabricación y diseño con el uso del CAD/CAM.	38
1.4. Rugosidad.....	40
1.4.1. Parámetros de la rugosidad superficial	42

1.4.2. Rugosidad superficial teórica producida por las herramientas de fresado	45
1.4.3. Rugosímetro	46
1.4.4. Método Taguchi	47
1.4.5. Método Anova.....	50
CAPITULO 2.....	54
PROCESO DE MECANIZADO.....	54
2.1. Maquinaria	54
2.2. Rugosímetro	56
2.2.1. Propiedades del rugosímetro mitutoyo SJ-210.	56
2.3. Herramienta.....	57
2.3.1. Características de la herramienta	58
2.4. Inventor HSM.....	59
2.4.1. Ventajas del inventor HSM.....	60
2.4.2. Parámetros de mecanizado.....	60
2.4.3. Estrategias de mecanizado	62
2.4.4. Programación en Inventor HSM PRO.....	65
2.5. Método de mecanizado	68
2.6. Determinación de factores y sus niveles para el método Taguchi	69
2.6.1. Aplicación del método Taguchi	70
CAPITULO 3.....	73
CÁLCULOS Y RESULTADOS	73
3.1.1. Ejemplos de cálculos.....	85
3.2. Prueba de hipótesis.....	88
3.2.1. Hipótesis nula (H_0).....	88
3.2.2. Hipótesis alternativa (H_1).....	88
3.3. Prueba de hipótesis para superficies cóncavas.....	88
3.4. Prueba de hipótesis para superficies convexas.....	90
3.5. Predicción para la optimización de la rugosidad superficial.....	92
3.5.1. Resultados de mecanizado	94
CONCLUSIONES.....	99
RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA.....	102

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características mecánicas del aluminio EN-AW-7075 [2]	21
Tabla 1.2 Composición química del aluminio EN-AW-7075 [13].	22
Tabla 1.3 Características mecánicas a la tracción del aluminio EN-AW-7075 [13].....	22
Tabla 1.4 Velocidades y avances de corte recomendado en el proceso de planeado, para aluminio 7075, con herramientas de carburo [15, p. 701].	26
Tabla 1.5 Velocidades y avances de corte de corte recomendado en el proceso de acabado, para aluminio 7075, con herramientas de carburo [15, p. 707].	26
Tabla 1.6 Parámetros de las fórmulas para fresar con punta esférica [22].....	34
Tabla 1.7 Valores de rugosidad en diferentes procesos de mecanizado [25, p. 50].....	44
Tabla 1.8 Clasificación de acabado superficial según el tipo de maquinado [25, p. 51].	45
Tabla 1.9 Arreglo ortogonal L8 (2^7) [31, p. 26].....	49
Tabla 2.1 Datos técnicos de la máquina [32]	55
Tabla 2.2 Características principales de la herramienta [35]	58
Tabla 2.3 Especificaciones de la herramienta para el material requerido [35]	58
Tabla 2.4 Factores y niveles seleccionados.....	70
Tabla 2.5 Arreglo ortogonal L27 con factores e interacciones [30].....	71
Tabla 2.6 Interacciones de los niveles de cada factor para la superficie cóncava y convexa	72
Tabla 3.1 Datos y resultados experimentales para superficies cóncavas	74
Tabla 3.2 Datos y resultados experimentales para superficies convexas.	75
Tabla 3.3 Factores influyentes en el mecanizado.....	76
Tabla 3.4 Resultados método Anova de superficies cóncavas.....	87

Tabla 3.5 Evaluación de la media de cada nivel según el factor en superficies cóncavas.	87
Tabla 3.6 Distribución f (95% de confianza) [31, p. 284]	89
Tabla 3.7 Resultados método Anova de superficies convexas.....	90
Tabla 3.8 Evaluación de la media de cada nivel según el factor en superficies convexas.	91
Tabla 3.9 Valores porcentuales de factores más incidentes en el mecanizado	92
Tabla 3.10 Menor rugosidad en superficies cóncavas.....	94
Tabla 3.11 Menor rugosidad en superficies convexas	94
Tabla 3.12 Valor de rugosidad mejorada en superficies cóncavas	96
Tabla 3.13 Valor de rugosidad mejorada en superficies convexas	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1.1 Ejemplos de aleaciones de aluminio [2, p. 2].	20
Figura. 1.2 Molde de cuchara [17].	28
Figura. 1.3 Tres tipos de interferencia en mecanizado 3 ejes [17].	28
Figura. 1.4 Diversos estilos de corte en fresado [18].	29
Figura. 1.5 El intervalo de trayectoria y las escalas de intervalo de alimentación de una fresa con punta esférica [19].	30
Figura. 1.6 Geometría de la fresa de punta redonda, a) Geometría global de la herramienta [20].	31
Figura. 1.7 Geometría y parámetros de la herramienta de punta esférica [21].	33
Figura. 1.8 Espacio o tira que queda en cada pasada [21].	33
Figura. 1.9 Parámetros para mecanizar con punta esférica [22].	34
Figura. 1.10 Dirección de la trayectoria de mecanizado en una superficie cóncava [23].	35
Figura. 1.11 Dirección de la trayectoria de mecanizado en una superficie convexa [23].	36
Figura. 1.12 Influencia del ángulo de la posición de fresado en las fuerzas de corte [18].	37
Figura. 1.13 Proceso de diseño y fabricación [24].	39
Figura. 1.14 Proceso CAD [24].	40
Figura. 1.15 Proceso CAM [24].	40
Figura. 1.16 Perfiles de rugosidad y ondulación [26, p. 3].	41

Figura. 1.17 Diagrama de pescado, parámetros para la rugosidad superficial [27, p. 2].	42
Figura. 1.18 Medida de rugosidad media [25].	43
Figura. 1.19 Superficies teóricas producidas en modelos de fresado con herramientas tipo A, B y C [25, p. 52].	45
Figura. 1.20 Partes de un rugosímetro superficial [29].	47
Figura. 1.21 Etapas de aplicación de la técnica Taguchi en tres partes [30, p. 5].	48
Figura. 2.1 Centro de mecanizado EMCO Concept Mill 260 [32].	54
Figura. 2.2 Rugosímetro marca MITUTOYO SJ - 210 [33].	56
Figura. 2.3 Partes de la herramienta [35].	57
Figura. 2.4 Desgaste de la herramienta.	58
Figura. 2.5 Programa Inventor HSM PRO 2016.	59
Figura. 2.6 Procesos de mecanizado, a) Desbaste, b) Semiacabado, c) Acabado [38].	61
Figura. 2.7 Trayectoria Paralell [39].	63
Figura. 2.8 Trayectoria Scallop [39].	64
Figura. 2.9 Trayectoria Morphed Spiral [39].	65
Figura. 2.10 Panel de Software Autodesk Inventor HSM.	65
Figura. 2.11 Estegia a) Parallel, b) Scallop, c) Morphed Spiral.	66
Figura. 2.12 Selección de la herramienta.	66
Figura. 2.13 Parametros de mecanizado.	67
Figura. 2.14 Inventor HSM,Codigo G.	68
Figura. 2.15 Probetas de superficies cóncavas y convexas.	69
Figura. 3.1 Mecanizado de Superficies cóncavas y convexas.	73
Figura. 3.2 Rugosidad vs RPM con estrategia Parallel en superficies cóncavas.	76

Figura. 3.3 Rugosidad vs RPM con estrategia Scallop en superficies cóncavas	77
Figura. 3.4 Rugosidad vs RPM con estrategia Morphed Spiral en superficies cóncavas.	78
Figura. 3.5 Rugosidad vs Avance y RPM con estrategia Parallel en superficies cóncavas.....	79
Figura. 3.6 Rugosidad vs Avance y RPM con estrategia Scallop en superficies cóncavas.....	79
Figura. 3.7 Rugosidad vs Avance y RPM con estrategia Morhped Spiral en superficies cóncavas.....	80
Figura. 3.8 Rugosidad vs RPM con estrategia Parallel en superficies convexas.....	81
Figura. 3.9 Rugosidad vs RPM con estrategias Scallop en superficies convexas.....	81
Figura. 3.10 Rugosidad vs RPM con estrategia Morphed Spiral en superficies convexas.	82
Figura. 3.11 Rugosidad vs Paso y Avance con estrategia Parallel en superficies convexas.....	83
Figura. 3.12 Rugosidad vs Paso y Avance con estrategia Scallop en superficies convexas.....	84
Figura. 3.13 Rugosidad vs Paso y Avance con estrategia Morhped Spiral en superficies convexas.....	84
Figura. 3.14 Prueba de hipótesis para superficies cóncavas.....	89
Figura. 3.15 Prueba de hipótesis para superficies convexas.....	91
Figura. 3.16 Niveles óptimos de cada factor para superficies cóncavas.....	93
Figura. 3.17 Niveles óptimos de cada factor para superficies convexas.....	94
Figura. 3.18 Estructura microscópica sin mecanizar	98

Figura. 3.19 Estructura microscópica probeta cóncava.	98
Figura. 3.20 Estructura microscópica probeta convexa.	98

RESUMEN

El presente proyecto técnico describe las diferentes metodologías capaces de desarrollar nuevos parámetros eficientes en un Centro de Mecanizado Vertical controlado por Ordenador EMCO Concept Mill 260, indispensable para la mejora de rugosidad en superficies curvas en una muestra de Aluminio EN-AW-7075 variando las estrategias, RPM (revoluciones por minuto), avance y el paso.

Con el software estudiantil libre *Autodesk Inventor* se procede con el dibujo de las probetas con medidas de 25 mm de ancho, 25 mm alto y 25 mm de profundidad para su posterior programación en *Autodesk Inventor HSM*. Con la ayuda del personal capacitado de la Universidad Politécnica Salesiana y su alta gama de equipos de calidad y última generación se realizaron las pruebas en los laboratorios de CNC (Control Numérico Computarizado), para la recolección de datos.

Mediante el método estadístico *Taguchi* junto a un arreglo ortogonal de 27 pruebas y 4 factores dependientes en el mecanizado como son: la estrategia, RPM, avance y paso, se encuentra un valor de rugosidad baja, siendo optimizado este valor mediante el método *ANOVA*, el cual permite encontrar un rango de confiabilidad que permite validar el estudio que se realiza en el proyecto técnico.

Se determina que los factores más influyentes en el mecanizado de superficies cóncavas son el avance y la estrategia, para superficies convexas el factor influyente es el paso.

Estos modelos dan como resultados rugosidades de $0.251\mu\text{m}$ en la muestra óptima, obteniendo una mejora del 2.47% para superficies cóncavas; mientras que la muestra óptima para las superficies convexas es de $0.375\mu\text{m}$, con una mejora del 1.1%.

Con este estudio se evidencia los mejores parámetros al momento de mecanizar en superficies cóncavas y convexas disminuyendo considerablemente tiempos, costos y calidad que son factores fundamentales dentro de la industria metalmecánica.

Palabras claves: estrategia, mecánica, ejes, superficies, cóncavas, convexas, aluminio.

ABSTRACT

The present technical project describes the different methodologies capable of developing new efficient parameters in a Vertical Machining Center controlled by EMCO Concept 260 Computer, to improve the surface roughness in an EN-AW-7075 Aluminum sample in concave and convex surfaces varying the Strategies, RPM, Advance and Step.

From the hand of the free student software Autodesk Inventor proceeds with the drawing of the test tubes with measures of 25mm wide, 25mm high and 25mm deep for later programming in Autodesk Inventor HSM. With the help of the trained staff of the Salesian Polytechnic University and its high range of quality equipment and last generation tests were performed in the CNC laboratories (Computerized Numerical Control), for data collection.

By means of the Taguchi statistical method together with an orthogonal arrangement of 27 tests and 4 dependent factors in machining such as: strategy, RPM, advance and step, a low roughness value is found, this value being optimized by means of the ANOVA method, the which allows to find a range of reliability that allows to validate the study carried out in the technical project.

It is determined that the most influential factors in the machining of concave surfaces are the advance and the strategy, for convex surfaces the influencing factor is the step.

These models give roughness of $0.251\mu\text{m}$ in sample numbers 21, obtaining an improvement of 2.47% for concave surfaces while for convex surfaces it is $0.375\mu\text{m}$ in sample number 2 obtaining an improvement of 1.1%.

This study shows the best parameters when machining concave and convex surfaces, considerably reducing time and costs that are fundamental factors in the metalworking industry.

Keywords: strategy, mechanics, axes, surfaces, concave, convex, aluminum.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio de la serie 7000 tienen aplicaciones importantes dentro de la industria metalmecánica en la elaboración de matrices para moldes plásticos, debido a su peso ligero asociado, alta resistencia y buenas características al maquinar. El aluminio 7075 T6 es la aleación de aluminio de mayor resistencia, posee una alta tenacidad a la fractura y un crecimiento de grietas con baja fatiga [1], las propiedades y características del material influyen, ampliamente, en el cotizado para una vasta variedad de usos, ya sea en la calidad, capacidad de elaboración, propiedades físicas, químicas y mecánicas, siendo su principal característica la resistencia alta a la corrosión [2].

El mecanizado se utiliza para convertir piezas fundidas, piezas forjadas o bloques preformados de metal en formas deseadas, con el tamaño y el acabado especificados para cumplir con los requisitos de diseño [3]. Los programas de diseño CAD (Diseño asistido por computador) van de la mano con los procesos CAM (Manufactura Asistida por Computador) y CAE (Ingeniería Asistida por Computador) facilitando su operación en la innovación de los mismos permitiendo desarrollar elementos mucho más complejos.

En la actualidad, el proceso CNC (Control Numérico Computarizado) hace que las máquinas herramientas sean más fáciles de operar por sus programas amigables que presentan las diferentes marcas y su compatibilidad con diferentes programas CAD/CAM. El proceso de maquinado multiejes CNC (Control Numérico Computarizado) con fresa de punta esférica se utiliza para la obtención de formas complejas [4], [5], las cuales están, generalmente, conformadas por combinaciones de superficies de curvatura cero, positiva y negativa [6], y esto dependerá de la efectiva planificación del proceso de manufactura.

Para el estudio del acabado superficial existen parámetros que influyen en la calidad de los elementos a mecanizar ya sea la rugosidad, calidad superficial, velocidades de cortes, avance de la herramienta, profundidad de corte y las estrategias; por ello este trabajo de investigación se enfoca y evalúa las siguientes variables para determinar la incidencia que tienen en las superficies mecanizadas.

Dentro del estudio de las rugosidades en superficies planas para un aluminio A5083 mediante el método de *Taguchi* se determinó los efectos de la velocidad de corte, de la velocidad de avance que tienen mayor incidencia en la rugosidad superficial y la trayectoria de la herramienta y los parámetros del proceso de profundidad de corte en la rugosidad superficial de mecanizado. Estas tienen un bajo efecto de incidencia [7].

En los procesos de fresado con herramienta de punta esférica se determina que la trayectoria *scallop*, en el avance, actúa con mayor eficiencia para obtener niveles de rugosidades bajos. [8].

La rugosidad de la superficie, generalmente, se mide fuera de línea, cuando el componente ya está mecanizado y es un índice, ampliamente, utilizado de la calidad del producto. Se utiliza como uno de los requisitos principales al diseñar productos mecánicos [9]. Quintana estudio la influencia de las características geométricas del corte de la fresa esférica en la rugosidad superficial teórica obtenida [10].

Los efectos que producen los parámetros como la estrategia, velocidad de corte, profundidad, avance y diámetro de la herramienta con el uso del método estadístico *Taguchi*, se obtiene un valor de rugosidad baja, haciendo que cada parámetro tenga una influencia en el mecanizado [11].

El objetivo general del presente Trabajo de Titulación es determinar estrategias y parámetros de mecanizado 3 ejes para superficies cóncavas y convexas en el material Aluminio EN-AW-7075 y proporcionar datos técnicos a la industria metalmeccánica; y los objetivos específicos son: definir las características principales del Aluminio EN-AW-7075 en función del proceso de mecanizado a utilizar; establecer las herramientas apropiadas acorde al tipo de proceso de mecanizado a utilizar; estipular estrategias adecuadas de mecanizado a través del software CAM para el acabado superficial en áreas cóncavas y convexas; determinar las variables que afectan la rugosidad en un elemento mecanizado en procesos CAM para superficies cóncavas y convexas; estudiar los modelos estadísticos para el manejo de datos obtenidos en los ensayos; determinar un modelo experimental para predecir la rugosidad en el Aluminio EN-AW-7075 en superficies cóncavas y convexas; comparar los valores de rugosidad reales con el modelo experimental desarrollado.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Aluminio

El aluminio es el segundo elemento metálico más abundante en la tierra, convirtiéndose en un buen competidor económico desde el final del siglo XIX. El surgimiento de importantes desarrollos industriales, hizo que la demanda de este material sea beneficioso enormemente para el crecimiento de la producción industrial [2, p. 17]. En la **Figura. 1.1** se muestra ejemplos de algunas aleaciones no ferrosas con el aluminio, semiconductores para altas temperaturas.

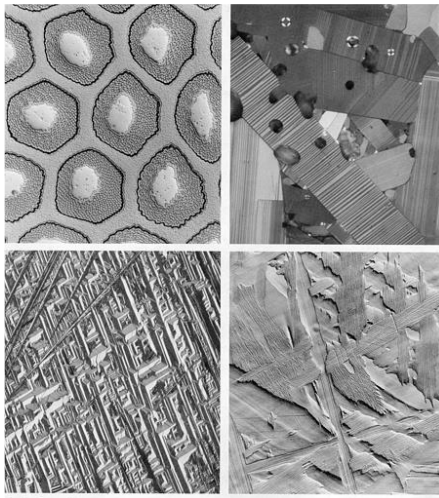


Figura. 1.1 Ejemplos de aleaciones de aluminio [2, p. 2].

Las primeras aplicaciones comerciales del aluminio fueron para artículos como marcos de espejos, artículos de hogar, bandejas para servir y utensilios de cocina. Con el paso del tiempo, las aplicaciones del aluminio fueron diversificándose, creciendo altamente en todos los aspectos de la vida moderna, siendo usadas las aleaciones del aluminio para muchas aplicaciones industriales. [2, p. 17]

1.1.1. Propiedades del aluminio En-AW-7075

El aluminio tiene propiedades muy eficientes, haciendo que este metal y sus diferentes aleaciones sean más económicas y atractivas para el consumidor, sus principales propiedades son: resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y físicas, facilidad de maquinado, peso ligero y apariencia [2, p. 18].

La conductividad eléctrica y térmica del aluminio es excelente, haciendo que se desarrollen aleaciones específicas más sofisticadas con altos grados de resistividad eléctrica, siendo útiles estas aleaciones en motores eléctricos de alto par. El aluminio es el más usado en comparación al cobre por su buena conductividad eléctrica que duplica al cobre sobre una base de peso equivalente. La conductividad térmica de las aleaciones de aluminio es ventajosa en intercambiadores de calor, radiadores de automóviles y en electrodomésticos. El aluminio es un material no tóxico usado cotidianamente para envases de alimentos y bebida. Su acabado superficial suele ser suave y brillante [2, p. 18].

En la **Tabla 1.1** se puede observar las principales características mecánicas para el aluminio EN-AW-7075.

Tabla 1.1 Características mecánicas del aluminio EN-AW-7075 [2]

Características mecánicas		
Resistencia última a la tensión	MPa	570
Límite de elasticidad	MPa	505
Dureza	HB (Brinell)	78
Resistencia última a la fractura	MPa	330
Límite de resistencia a la fatiga	MPa	160
Módulo de elasticidad	GPa	10,4

1.1.2. Características del Aluminio EN-AW-7075

Existen tres características importantes que posee el aluminio:

- Baja densidad
- Alta resistencia mecánica
- Alta resistencia a la corrosión

A su vez existen otras propiedades importantes como:

- Alta conductividad térmica y eléctrica
- Reflectividad
- Ductilidad y bajo coste de trabajo
- Neutralidad magnética
- Alto valor como chatarra

Es muy utilizado en la industria de alimentos [12], en la **Tabla 1.2** se muestra la composición química de aluminio EN-AW-7075:

Tabla 1.2 Composición química del aluminio EN-AW-7075 [13].

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
Mínimo			1,2		2,1	0,18	5,1		Zr + Ti	Total
Máximo	0,4	0,50	2	0,3	2,9	0,28	6,1	0,2	0,25	0,15
										El resto

En la **Tabla 1.3** se presenta las características mecánicas del Aluminio EN-AW-7075.

Tabla 1.3 Características mecánicas a la tracción del aluminio EN-AW-7075 [13].

Estado	Espesor	Carga de rotura N/mm ²	Limite elástico N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Limite a la fatiga	Resistencia a la cizalladura (N/mm ²)	Dureza Brinell (HB)
0		225	105		230	150	60
T6	6--12	530	450	8	300	350	140
T6	12--25	530	450	5	300	350	140
T6	26-50	530	450	3	300	350	140
T6	51-63	500	430	2	300	350	130
T6	63-75	480	410	2	300	350	130
T6	75-100	480	390	2	300	350	130

1.1.3. Aplicaciones del aluminio

Por ser un material con excelentes características y tener un elevado límite elástico es muy adecuado para piezas sometidas a grandes fatigas, como:

- Construcción de troqueles
- Moldes de soplado
- Matrices
- Maquinaria
- Herramientas
- Armamento
- Blindajes
- Industria del automóvil
- Piezas estampadas
- Tornillería
- Bastones de esquí
- Accesorios ortopédicos
- Cañas de pesca
- Arcos y flechas
- Raquetas de tenis
- Remaches
- Aplicaciones nucleares, entre otros [13].

1.1.4. Fabricación en moldeo por soplado

a) Mejora de la calidad de la pieza:

El proceso de soplado por extrusión es muy utilizado para la producción de piezas de plásticos huecas, como botellas tipo PET, depósitos, contenedores de combustible y juegos recreativos.

El **proceso** consiste en cuatro etapas:

- La extrusión de un parison fundido, es decir, un cilindro hueco de fundido plástico,
- Sujeción de las mitades del molde alrededor del parison,
- Soplado de aire en la pieza para expandirlo contra los lados del molde, y
- Enfriamiento del molde antes de la expulsión de la pieza [14].

b) Reducción de tiempo

En la ejecución de piezas por el proceso de extrusión-soplado es necesario definir los tiempos que se van a emplear para la realización de las mismas en condiciones realmente factibles y esto se puede lograr bajo tres parámetros:

- Manipulación experimental de las condiciones de funcionamiento.
- Configuración de la máquina.
- Modificación de los útiles.

Para lograr un menor tiempo de desarrollo de la pieza se utiliza la Ingeniería Concurrente que integra funciones interrelacionadas en el proceso de desarrollo de productos con el fin de minimizar el riesgo y reducir el esfuerzo en el proceso, y para satisfacer mejor las necesidades de los clientes [14].

1.1.5. Mecanizado

El proceso de mecanizado es una herramienta fundamental que engloba una variedad de procesos de fabricación diseñados, específicamente, para eliminar material no deseado en forma de viruta en la ejecución de un elemento.

El mecanizado se utiliza para convertir moldes, forjados o bloques de metal preformados en las formas deseadas, con el tamaño y acabado especificado para cumplir con los requisitos de diseño [15].

1.1.6. Mecanizado en Aluminio EN-AW-7075

Las aleaciones de aluminio son fáciles, rápidas y económicas de mecanizar debido a su estructura metalúrgica haciendo que sus características de mecanizado sean superiores a las del aluminio puro.

Los constituyentes no abrasivos, tienen un efecto beneficioso; y los constituyentes abrasivos, insolubles, ejercen un efecto perjudicial sobre la vida de la herramienta y la calidad de la superficie. Los componentes que son insolubles pero blandos y no abrasivos son beneficiosos porque ayudan en la rotura de virutas [16].

1.1.7. Parámetros de mecanizado en Aluminio

Los parámetros de fresado necesarios para el estudio de la rugosidad superficial en aluminio son:

- Avance
- Profundidad de corte
- Velocidad de corte
- Estrategia

Estos parámetros son usados en cálculos, siempre que en el mecanizado no exista un paro entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo. Esto puede ocasionar la pérdida de filo del buril, el cual interfiere en el acabado superficial de la pieza mecanizada.

En la **Tabla 1.4** y **Tabla 1.5**. se verifica las velocidades y avances recomendados para el mecanizado con herramienta de acero rápido y carburo, respectivamente.

Tabla 1.4 Velocidades y avances de corte recomendado en el proceso de planeado, para aluminio 7075, con herramientas de carburo [15, p. 701].

Material (Dureza)	Profundidad de corte (mm)	Herramienta de acero rápido			Herramienta de carburo		
		Velocidad de corte	Avance por diente (mm)	Material de la herramienta	Velocidad de corte (m/min)	Avance por diente (mm)	Material de la herramienta
AL 7075 (30 - 80 HB)	1	365	0,25	S4, S2	610	0,25	K10, M20
	4	245	0,4	S4, S3	550	0,5	K10, M21
	8	200	0,5	S4, S4	365	0,65	K10, M22

Tabla 1.5 Velocidades y avances de corte de corte recomendado en el proceso de acabado, para aluminio 7075, con herramientas de carburo [15, p. 707].

Material (dureza)	Profundidad de corte radial (mm)	Velocidad de corte (m/min)	Herramienta de carburo				Material de la herramienta
			Avance mm/diente, respecto al diámetro de la herramienta (mm/diente)				
			10 (mm)	12 (mm)	18 (mm)	25 - 50 (mm)	
7075 (30 - 80 HB)	0,5	395	0,075	0,102	0,13	0,18	K20, M20
	0,15	305	0,102	0,15	0,2	0,25	K20, M20
	Diámetro/4	275	0,075	0,13	0,15	0,2	K20, M20
	Diámetro/2	245	0,05	0,102	0,13	0,15	K20, M20

1.2. Herramientas de corte

La variable principal que afecta a cualquier operación de mecanizado es la herramienta de corte. Por su tamaño y costo hace que sea una de las variables más críticas en la operación de mecanizado. Otras variables que afectan la operación en el mecanizado son la geometría de las herramientas de corte, el portaherramientas, las velocidades y fluidos de corte [15, p. 138].

1.2.1. Selección de material para la herramienta de trabajo

Para la selección del material de herramienta de corte se toma en cuenta algunas aplicaciones específicas [15, p. 138]:

- Dureza y estado del material de la herramienta.
- Trabajo a realizar: la selección óptima de la herramienta puede reducir el número de operaciones necesarias.
- Cantidad de material a ser eliminado.
- Tipo, capacidad, estado de la máquina y herramienta a utilizar.
- Rigidez de la herramienta y condición de la máquina herramienta.
- Rigidez de la herramienta y de la pieza de trabajo.
- Requerimientos de producción que influyen la velocidad y avances seleccionados.
- Condiciones de funcionamiento como fuerzas de corte y temperaturas.
- Costo de la herramienta por pieza mecanizada, incluyendo el costo inicial de la herramienta, vida útil de la herramienta y la frecuencia de rectificación o reemplazo y el costo de mano de obra. La herramienta más económica no es necesariamente la que proporciona la vida más larga [15, p. 138].

1.2.2. Generación de trayectorias en superficies libres

Este tipo de superficies son diseñadas para cumplir una serie de parámetros en los cuales van a ser sometidos a diferentes pruebas o ensayos para satisfacer una necesidad estética y a la vez que se requiera aplicarlo en la vida cotidiana.



Figura. 1.2 Molde de cuchara [17].

El concepto de tolerancia es muy usado al de medir la calidad en superficies libres. Al mecanizar en superficies libres se debe tomar en cuenta un límite superior y un límite inferior; el primero va a controlar la altura máxima denominada (scallop) y el segundo corresponde a la incisión denominada interferencia [17].

Las interferencias que son los causantes de problemas al mecanizar se puede observar en la **Figura. 1.3**.

Los problemas que causan las interferencias son los siguientes:

- **Interferencia local:** Se presenta cuando el radio de curvatura de la herramienta es mayor que la superficie, como la mostrada en la **Figura. 1.3.a**.
- **Interferencia posterior:** Se presenta cuando los puntos de contacto interfieren con la parte inferior del buril, como la mostrada en la **Figura. 1.3.b**.
- **Interferencia global:** Se presenta cuando la parte exterior de la herramienta interfiere en la superficie, como se muestra en la **Figura. 1.3.c**.

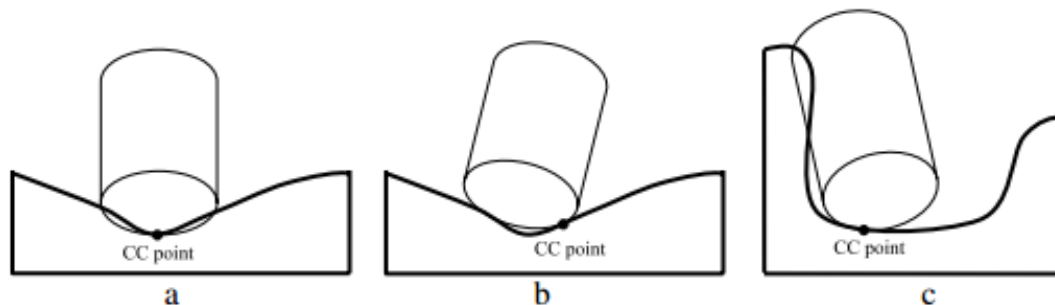


Figura. 1.3 Tres tipos de interferencia en mecanizado 3 ejes [17].

1.2.3. Parámetros de mecanizado

Dentro de los parámetros que una herramienta de corte proporciona al momento de mecanizar son el paso lateral y el paso hacia delante, de acuerdo a las necesidades del diseñador como se observa en la **Figura. 1.4**.

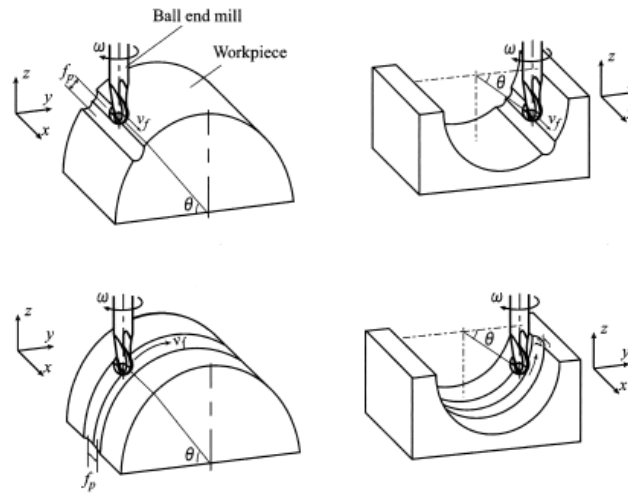


Figura. 1.4 Diversos estilos de corte en fresado [18].

El proceso de mecanizado superficial requiere la construcción de caminos de corte sucesivos separados por una distancia de desplazamiento [19].

Para el fresado con punta esférica, el proceso de mecanizado consiste en sucesivas trayectorias de corte paralelas separadas por una distancia de desplazamiento (el desplazamiento entre las trayectorias sucesivas se denomina paso lateral) [19].

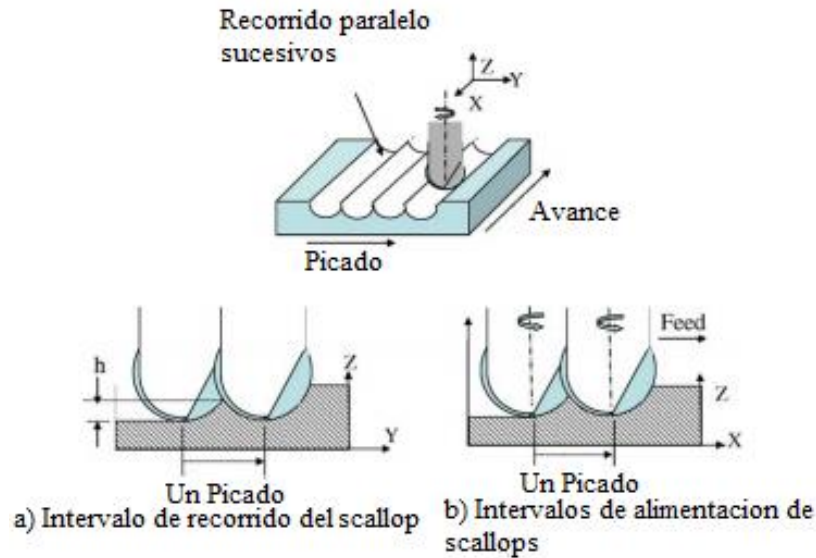


Figura. 1.5 El intervalo de trayectoria y las escalas de intervalo de alimentación de una fresa con punta esférica [19].

Donde h : altura

En el apartado **a)** se observa el recorrido de intervalo *scallop* con un paso lateral ejecutado por una herramienta de punta redonda.

En el apartado **b)** se observa el recorrido de intervalo *scallop* con un avance por diente ejecutado por el buril esférico.

1.2.4. Herramienta de punta redonda o esférica

Esta herramienta está perfectamente diseñada para el mecanizado en 3D por su geometría y su punta semiredonda en el extremo de la herramienta.

Las fresas de punta redonda son adecuadas para operaciones de acabado, desbaste y semidesbaste muy utilizadas en la industria metalmecánica, en el sector automotriz, aeroespacial e industrias de defensa para la realización de matrices y moldes. En la

Figura. 1.6 se puede apreciar la geometría y los ángulos de ataque de la herramienta:

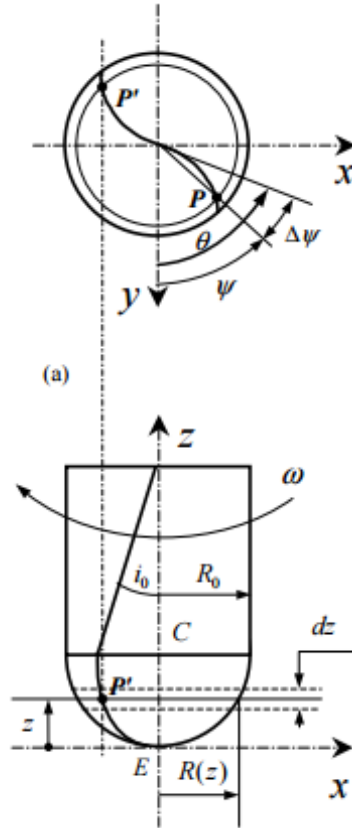


Figura. 1.6 Geometría de la fresa de punta redonda, a) Geometría global de la herramienta [20].

1.2.5. Fórmulas para el fresado

Las siguientes formulas son las más usadas para el cálculo de las principales variables de mecanizado para el fresado:

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad [21] \quad (1.1)$$

Donde:

n = RPM

V_c = Velocidad de corte en m/min

D = Diámetro

$$M_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{2 \times \pi \times n} \quad [21] \quad (1.2)$$

Donde:

- M_c = Par de corte
- a_p = Profundidad axial
- a_e = Profundidad radial

$$P_C = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{60 \times 102 \times 9,81} \quad [21] \quad (1.3)$$

$$k_c = k_{cl} \times h_m^{-z} \quad [21] \quad (1.4)$$

Donde:

- P_C = Potencia de corte
- n = RPM
- k_c = Fuerza de corte específica

$$h_m = \frac{f_z \times a_e \times 360}{D \times \pi \times \arccos \left[1 - \frac{2 \times a_e}{D} \right]}$$

- h_m = Grosor medio de la viruta (mm o plg)
- z = Factor de corrección unido al espesor promedio de la viruta

- k_c = Fuerza de corte específica
- k_{cl} = Fuerza de corte específica relacionada con 1mm de h_m

En la **Figura. 1.7** se puede observar las características de la herramienta de punta esférica y el diámetro efectivo que es el principal factor que influye al momento de mecanizar.

$$D_e = 2 \times \sqrt{R^2 - (R - A_p)^2} \quad [21]$$

Donde:

- D_e = Diámetro efectivo
- R = Radio de la herramienta
- A_p = Profundidad de corte axial

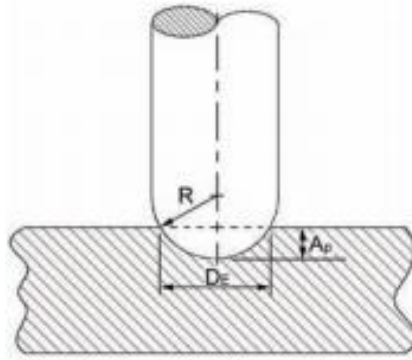


Figura. 1.7 Geometría y parámetros de la herramienta de punta esférica [21].

A su vez en la **Figura. 1.8**, cuando se utiliza la herramienta de punta esférica para mecanizar superficies en forma de zig-zag, esta crea un espacio sin cortar en cada pasada de corte.

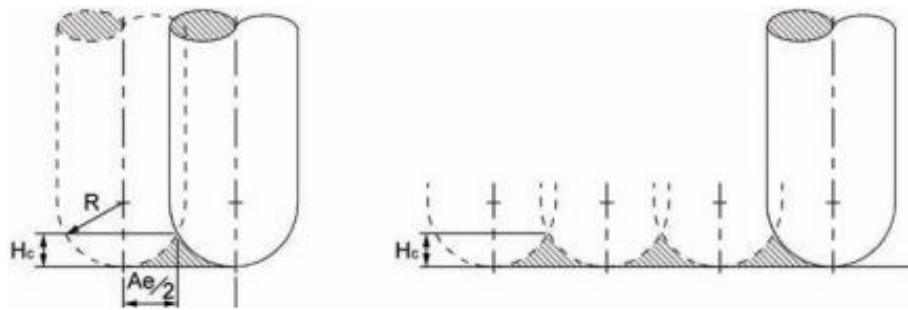


Figura. 1.8 Espacio o tira que queda en cada pasada [21].

La altura se puede calcular usando la ecuación 1.5:

$$H_c = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{A_e}{2}\right)^2} \quad [21] \quad (1.5)$$

Donde:

- H_c = Altura de la cúspide
- R = Radio de la punta de la herramienta
- A_e = Paso de valor entre dos pasadas de corte

$$A_e = 2\sqrt{R^2 - (R - H_c)^2}$$

1.2.6. Parámetros de mecanizado con fresas de punta esférica

Los principales parámetros que se toman en cuenta para el mecanizado de fresado se muestra en la **Figura. 1.9**.

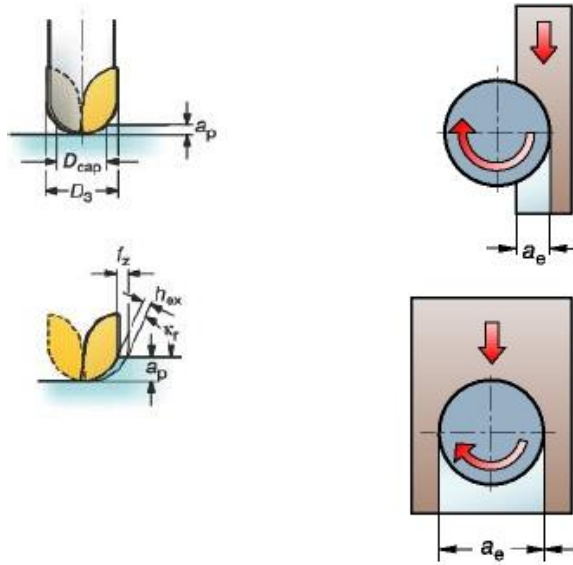


Figura. 1.9 Parámetros para mecanizar con punta esférica [22].

Diámetro de corte máximo a una profundidad específica en mm.

$$D_{cap} = \sqrt{D_3^2 - (D_3 - 2 \times a_p)^2} \quad [22] \quad (1.6)$$

Avance por diente (mm/diente), fresa centrada

$$f_z = \frac{D_3 - h_{ex}}{D_{cap}} \quad [22] \quad (1.7)$$

Avance por diente (mm/diente), fresa lateral

$$f_z = \frac{D_3 \times h_{ex}}{\sqrt{D_{cap}^2 - (D_{cap} - 2 \times a_e)^2}} \quad [22] \quad (1.8)$$

Tabla 1.6 Parámetros de las fórmulas para fresar con punta esférica [22].

Parámetro	Significado	Unidad Métrica
D_{cap}	Diámetro a profundidad de corte real, a_p	<i>mm</i>
f_z	Avance / diente	<i>mm</i>
a_p	Profundidad de corte	<i>mm</i>
a_e	Paso	<i>mm</i>
h_{ex}	Espesor máximo de la viruta	<i>mm</i>
D_3	Diámetro de la herramienta	<i>mm</i>

1.2.7. Mecanizado en superficies cóncavas

En la **Figura. 1.10** se muestra la trayectoria que realiza la herramienta de punta esférica al mecanizar en una superficie cóncava, y reduciendo a 0° el ángulo de inclinación.

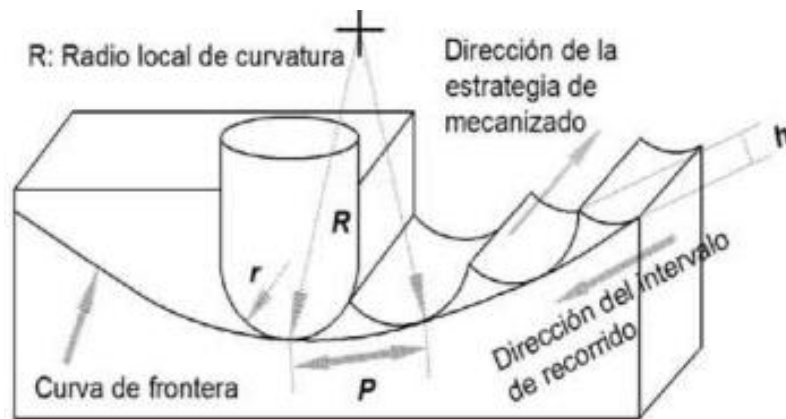


Figura. 1.10 Dirección de la trayectoria de mecanizado en una superficie cóncava [23].

Mediante la ecuación 1.9 se puede determinar los puntos de contacto de corte para controlar y mantener constante la altura máxima denominada (*scallop*).

$$P = \sqrt{\frac{8 * h * r * R}{R - r}} \quad [23] \quad (1.9)$$

Donde:

- P = Paso o profundidad radial
- R = Radio de curvatura local
- r = Radio de la fresa
- h = Altura

1.2.8. Mecanizado en superficies convexas

En la **Figura. 1.11** se muestra la trayectoria que realiza la herramienta de punta esférica al mecanizar en una superficie convexa y reduciendo a 0° el ángulo de inclinación.

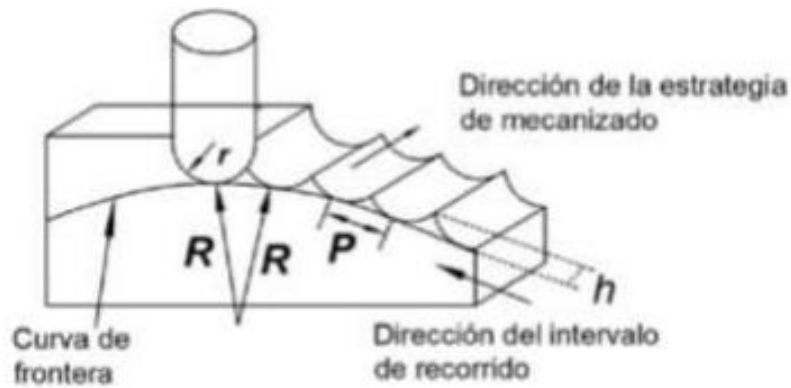


Figura. 1.11 Dirección de la trayectoria de mecanizado en una superficie convexa [23].

De la misma manera mediante la ecuación 1.10 se puede determinar los puntos de contacto de corte para controlar y mantener constante la altura máxima denominada (*scallop*).

$$P = \sqrt{\frac{8 * h * r * R}{R + r}} \quad [23] \quad (1.10)$$

1.2.9. Fuerzas de corte

Las fuerzas de corte que actúan en una superficie ya sea cóncava o convexa, al ser mecanizada, está dada por la herramienta de punta esférica o helicoidal, por ende el proceso de corte se puede considerar como una agrupación de cortes oblicuos a lo largo del filo de corte [18].

Las componentes radiales y tangenciales son las diferentes fuerzas de corte que actúan sobre un elemento infinitesimal del filo.

Dado que el ángulo de hélice de la herramienta de punta esférica varía a lo largo del borde de corte, el ángulo de inclinación efectivo ha de calcularse para cada elemento del filo de corte [18].

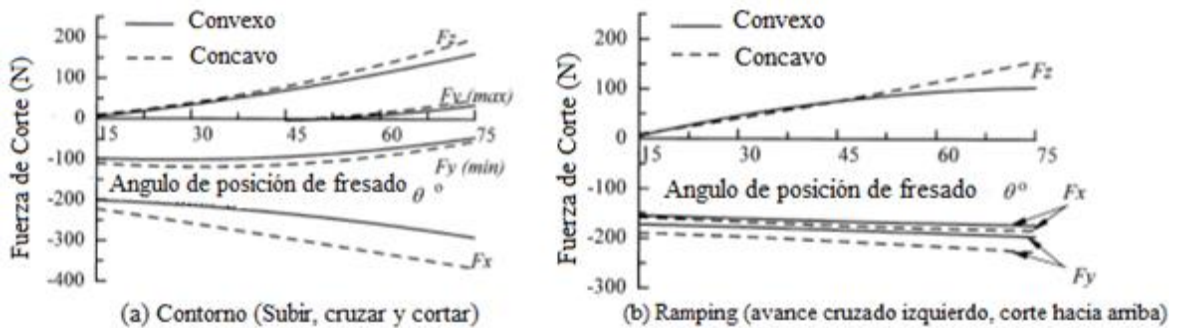


Figura. 1.12 Influencia del ángulo de la posición de fresado en las fuerzas de corte [18].

1.3. Introducción al CAD/CAM

El diseño y la fabricación asistidos por ordenador (CAD/CAM) es una disciplina que estudia el uso de sistemas informáticos como herramientas de soporte en todos los procesos involucrados en el diseño y la fabricación de cualquier tipo de producto. Esta disciplina se ha convertido en un requisito indispensable para la industria actual que se enfrenta a la necesidad de mejorar la calidad, disminuir los costes, acortar los tiempos de

diseño y producción. La única alternativa para conseguir este triple objetivo es utilizar la potencia de las herramientas informáticas actuales e integrar todos los procesos, para reducir los costes (de tiempo y dinero) en el desarrollo de los productos y en su fabricación [24].

1.3.1. Computer Aided Design (CAD):

Consta de un hardware y un software, donde usa sistemas informáticos para la creación, modificación, simulación, análisis de un producto específico.

1.3.2. Computer Aided Manufacturing (CAM):

Usa sistemas informáticos para la gestión, planificación y el control de operaciones en una planta que produce o fabrica objetos.

1.3.3. Computer Aided Engineering (CAE):

Realiza tareas de análisis, evaluación, simulación y optimización desarrolladas a lo largo del ciclo de vida del producto [24].

1.3.4. Proceso de fabricación y diseño con el uso del CAD/CAM.

En la actualidad, el CAD/CAM se usa en distintos ámbitos de producción como la animación por ordenador, control de procesos, diseño de documentos, producción de dibujos, control de calidad, análisis de ingeniería etc., De esta manera, para esclarecer las técnicas CAD/CAM, las etapas que se acogen a procesos de fabricación y diseño se actualizan, permanentemente, en la elaboración de cualquier producto deseado. [24]. En la **Figura. 1.13** se verifica el proceso de diseño y fabricación con el uso del sistema CAM/CAM.

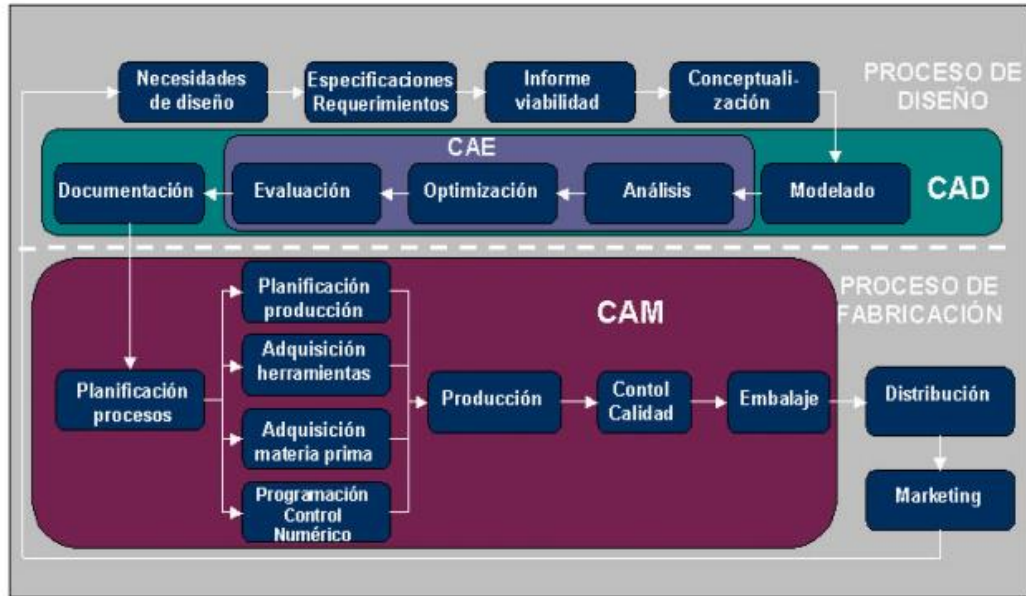


Figura. 1.13 Proceso de diseño y fabricación [24].

La demanda del mercado, hoy en día, es mucho más exigente con productos de mayor calidad, económicos y cuyo ciclo de vida sea más prolongado lo que hace necesaria la intervención de los ordenadores para satisfacer dichas exigencias.

El proceso CAD/CAM es una técnica que nos permite abaratar costos de producción, aumentando la calidad y disminuyendo el tiempo de producción.

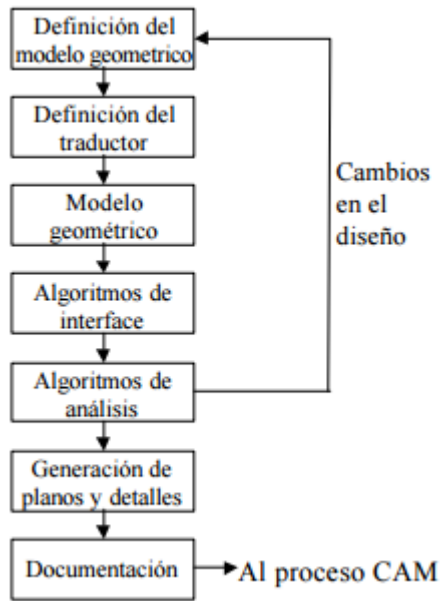


Figura. 1.14 Proceso CAD [24].

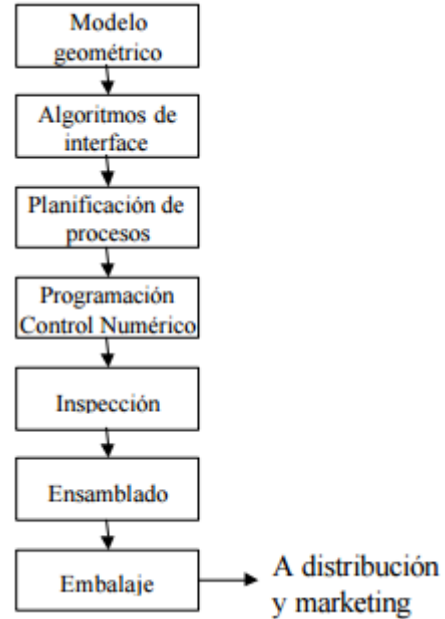


Figura. 1.15 Proceso CAM [24].

1.4. Rugosidad

El estudio de la rugosidad superficial ha sido una principal preocupación para la industria manufacturera, siendo uno de los parámetros de rendimiento cruciales que debe ser controlado en un proceso particular. La rugosidad superficial está ligada a la calidad de los productos, lo cual hace que el monitoreo de la rugosidad superficial de componentes mecanizados sea un área muy importante de investigación [25].

La rugosidad superficial o también llamada textura primaria, se forma a través de un proceso de mecanizado el cual deja surcos o marcas superficiales. Está fuertemente relacionada a la precisión o tolerancia de un componente de la máquina. Para obtener una dimensión de tolerancia baja se requiere un acabado muy fino, tomando en cuenta que un valor de rugosidad baja puede requerir varias operaciones de mecanizado como el pulido, súper acabado y flujo abrasivo. Por lo tanto, los costos de mecanizado en la especificación de acabados muy finos, normalmente, se irán incrementando [25].

Existen varias irregularidades geométricas que existen en las superficies de materiales sólidos, las cuales se determinan en términos de la rugosidad, ondulaciones y fallas [25].

- La rugosidad superficial producto de pequeñas irregularidades en la textura de la superficie producida mediante el mecanizado de la pieza.
- Las ondulaciones causadas por desajustes de la máquina-herramienta utilizadas en el mecanizado
- Dirección del patrón de superficie predominante
- Las fallas se crean inesperadamente, no siendo deseadas en la superficie como son las grietas, muescas y crestas
- Picos en la superficie del material
- Valles en la superficie del material

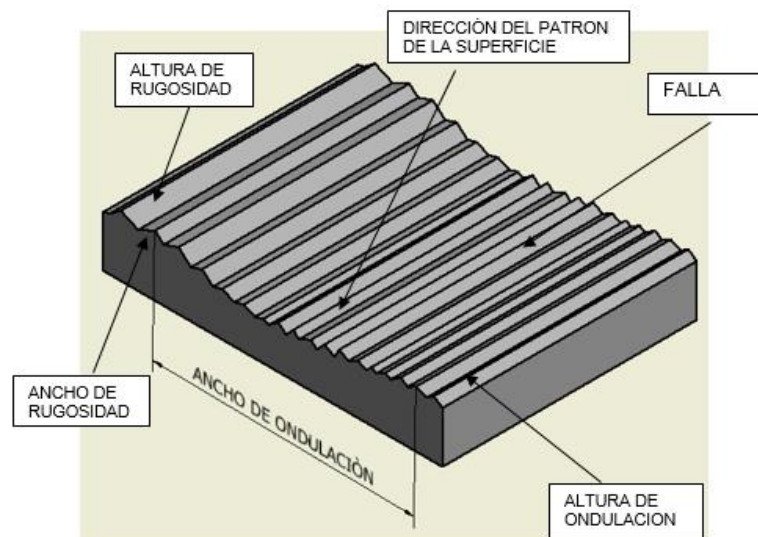


Figura. 1.16 Perfiles de rugosidad y ondulación [26, p. 3].

1.4.1. Parámetros de la rugosidad superficial

Existen varios parámetros para especificar la rugosidad superficial **Figura. 1.17**. Se ha desarrollado actualmente diferentes parámetros para la medición de la rugosidad debido a la gran variedad de operaciones de mecanizado [26, p. 3].

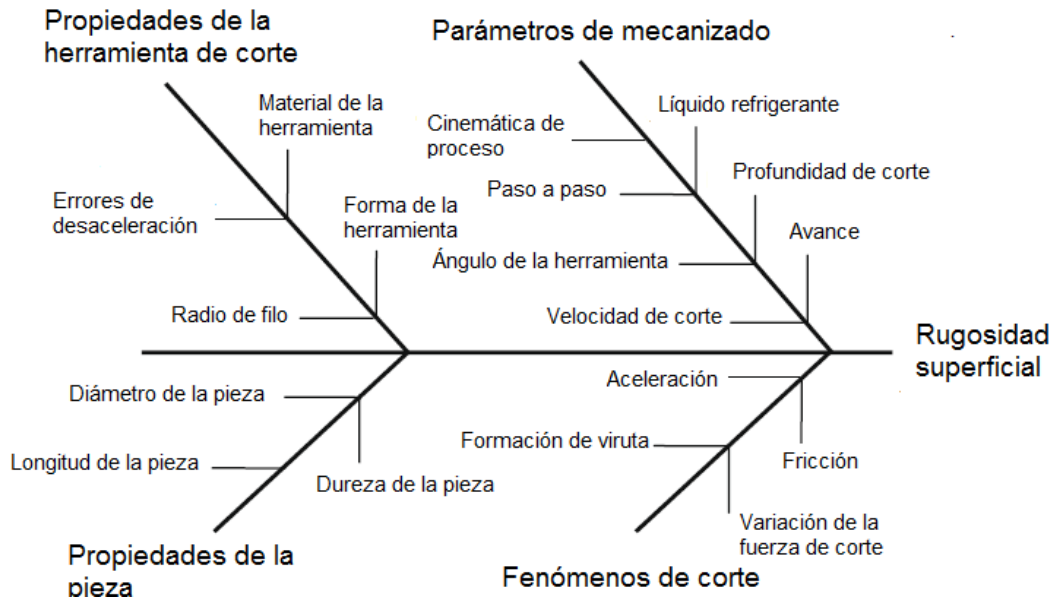


Figura. 1.17 Diagrama de pescado, parámetros para la rugosidad superficial [27, p. 2].

La técnica usada para la medición de la rugosidad superficial, se lo hace con un instrumento llamado lápiz óptico de tipo contacto, el cual puede proporcionar una indicación de la rugosidad en función de la media aritmética.

a) Rugosidad media (Ra). - Este también es conocido como valor de rugosidad media aritmética.

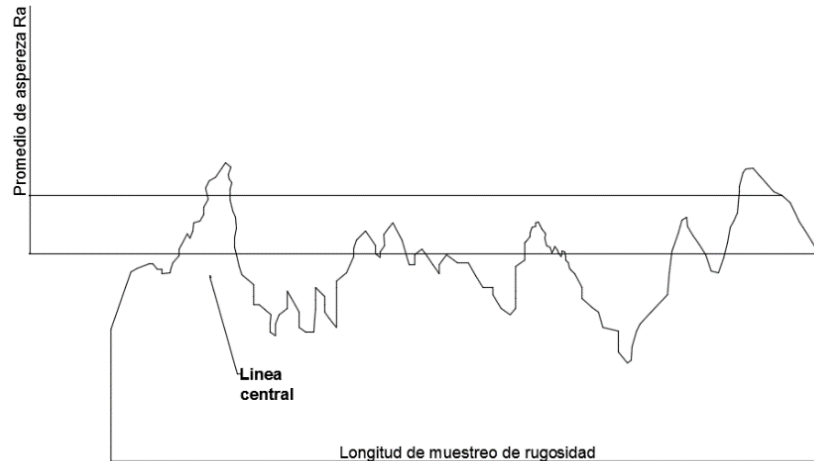


Figura. 1.18 Medida de rugosidad media [25].

El cálculo de la rugosidad media aritmética se realiza mediante la ecuación 1.11.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx \quad [26, p. 3] \quad (1.11)$$

Donde:

Ra = Rugosidad media

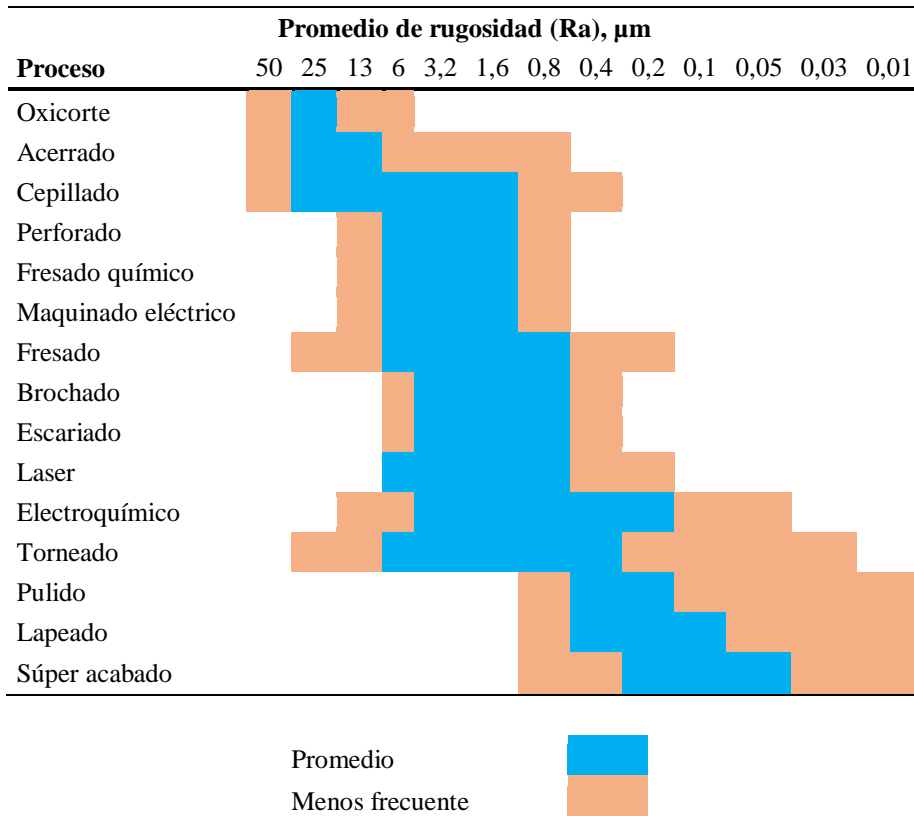
L = Longitud de muestreo

y = Ordenada de la curva de perfil

b) Rugosidad superficial en diferentes procesos de mecanizado

Los acabados superficiales que generalmente son más finos se producen mediante técnicas de mecanizado. Hay diferentes técnicas de mecanizado como son las de extracción de viruta (torneado, fresado y escariado) y abrasivos (pulido y súper acabado) como se muestra en la **Tabla 1.7**. Existe una variedad de acabados superficiales no tradicionales que se puede producirse mediante diferentes técnicas de mecanizado, tales como por descarga eléctrica, mecanizado por rayo láser o electroquímico [25, p. 49]

Tabla 1.7 Valores de rugosidad en diferentes procesos de mecanizado [25, p. 50].



c) Rugosidad superficial y tolerancias adecuadas de mecanizado

La rugosidad superficial está altamente unido a la tolerancia o precisión de la máquina y el tipo de proceso que se desea mecanizar como se muestra en la **Tabla 1.8**. Una tolerancia baja requiere dimensiones de acabado muy fino, para un valor pequeño de rugosidad se necesita múltiples operaciones de acabado, haciendo que el costo de operación aumente [15, p. 50].

Tabla 1.8 Clasificación de acabado superficial según el tipo de maquinado [25, p. 51].

Clase	Rugosidad, Ra		Tolerancia adecuada		Típico método de producción de acabado
	μm	μin	mm	in	
Súper acabado	0,1	4	0,0125	0,0005	Lustrado, micro afilado, lapeado
Pulido	0,2	8	0,0125	0,0005	Lustrado, afilado, lapeado
Lustrado	0,4	16	0,025	0,001	Lustrado, lapeado
Desbaste	0,8	32	0,050	0,002	Lustrado, fresado
Fino	1,6	63	0,075	0,003	Fresado, lustrado, escariado
Semi fino	3,2	125	0,100	0,004	Lustrado, fresado, torneado
Medio	6,3	250	0,175	0,007	Conformado, fresado, torneado
Semi áspero	12,5	500	0,330	0,013	Fresado, torneado
Áspero	25	1000	0,635	0,025	Torneado
Limpieza	50	2000	1,250	0,050	Torneado

1.4.2. Rugosidad superficial teórica producida por las herramientas de fresado

El cálculo del perfil de rugosidad superficial teórico realizado por fresas es posible. Para los cálculos de rugosidad superficial existen tres formas de herramientas de corte como se muestra en la **Figura. 1.19**, las más comunes son: tipo A punta afilada, Tipo B alrededor de la herramienta y tipo C punta redonda [25, p. 52].

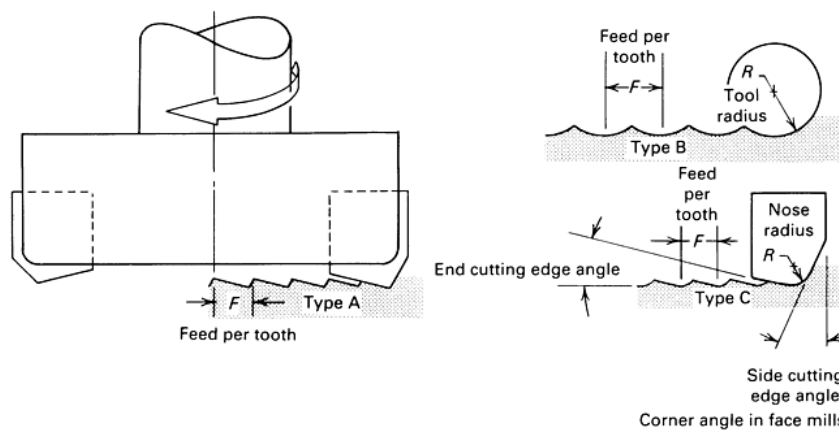


Figura. 1.19 Superficies teóricas producidas en modelos de fresado con herramientas tipo A, B y C [25, p. 52].

Se realizan cálculos de rugosidad superficial teórica tomando en cuenta variables como el radio de la herramienta, el ángulo de borde de corte final y el ángulo de borde de corte lateral. Un buen acabado superficial depende de varios factores, las cuales son el filo de la herramienta, la inclinación de la herramienta, el tiempo de mecanizado, la velocidad de corte y avance, variables que pueden ser modificadas de acuerdo al material a mecanizar. La rugosidad superficial se puede optimizar si se seleccionan las condiciones de corte adecuadas.

1.4.3. Rugosímetro

La demanda de piezas sofisticadas y de precisión se incrementa, las técnicas de medición y análisis de superficies mecanizadas es representada por un sistema de medición de la rugosidad superficial, la cual adquiere mucha importancia en el campo industrial [28, p. 2].

El rugosímetro de superficie crece en su campo desde el centrado de datos bidimensionales hacia un sistema de análisis basado en datos de perfil tridimensional [28].

Varias técnicas para el análisis de rugosidad superficial, son realizadas usualmente por un rugosímetro de superficie 2D o 3D. Estas técnicas también llamadas de medición óptica son rápidas y efectivas que no dañan la superficie a medir y que han ido desarrollándose cada vez más [28].

La medición de la rugosidad se realiza con un instrumento llamado rugosímetro [29]. Los componentes principales del rugosímetro son:

- Aguja: la cual se incrusta entre valles y picos, construido usualmente de diamante.
- Captador: registra los movimientos verticales de la aguja.
- Patín: se apoya en la superficie y sirve de filtro mecánico.

- Motorización: empuja y arrastra la aguja sobre la superficie
- Electrónica: registra los datos del captador, los procesa y obtiene los parámetros deseados.

En la **Figura. 1.20** se presenta las partes principales de un rugosímetro superficial.

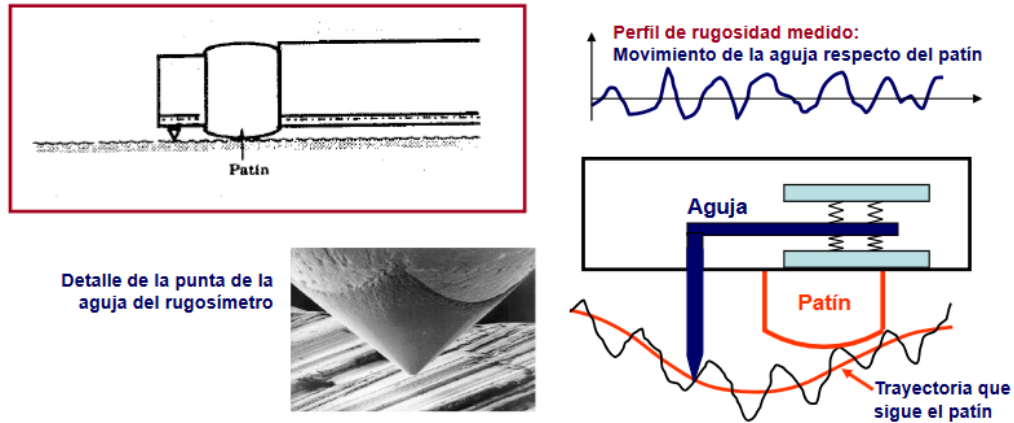


Figura. 1.20 Partes de un rugosímetro superficial [29].

1.4.4. Método Taguchi

La metodología *Taguchi* fue propuesta por el Dr. Taguchi en los años sesenta, siendo utilizada de forma amplia en estudios industriales y científicos, no requiere de cálculos matemáticos complejos y determina, fácilmente, los parámetros óptimos del proceso [30, p. 5]. Para la aplicación de método *Taguchi* se debe cumplir con tres principales parámetros como se muestra en la **Figura. 1.21**.

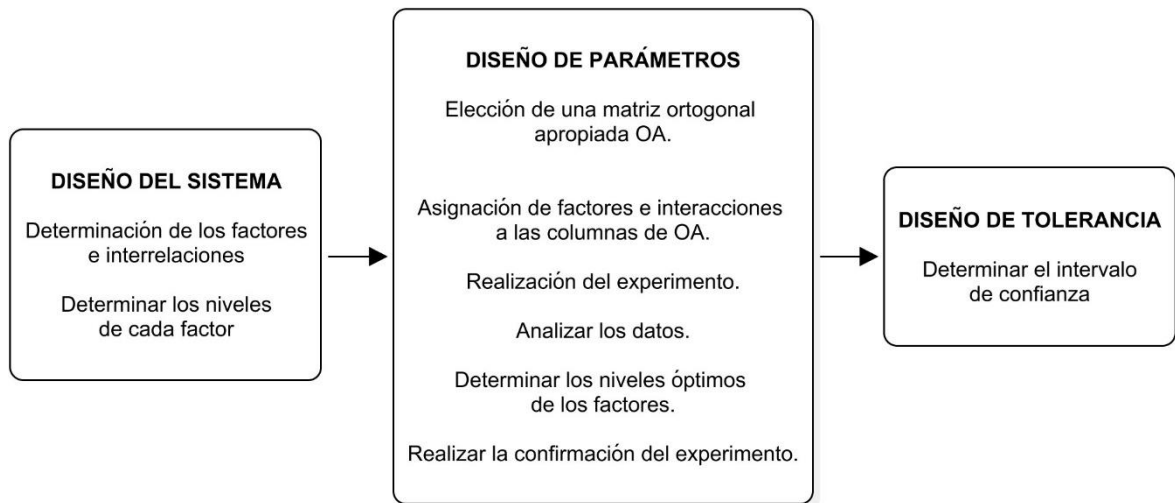


Figura. 1.21 Etapas de aplicación de la técnica Taguchi en tres partes [30, p. 5].

Para la elaboración del método se toma en cuenta los factores y niveles dependientes en el estudio a realizarse, adquiriendo conocimientos técnicos en ciencia e ingeniería. El diseño de parámetros es la parte más importante del método debido a que se determinan los niveles óptimos de los factores llevándose a cabo experimentos de confirmación. El diseño de tolerancia determina el rango de confirmación, se acepta el método si la media de las pruebas está en el intervalo, logrando una optimización con suficiente precisión [30, p. 5].

a) Aplicación del método Taguchi

Para la aplicación del método se determinan varios factores como son la velocidad de corte, el avance, trayectoria y la profundidad radial sobre la rugosidad de la superficie. El primer paso de aplicación del método es elegir el arreglo ortogonal (OA) apropiado para el estudio, considerando el tiempo / costo para proceso. Según el método *Taguchi* el DF total (grado de libertad) del arreglo ortogonal seleccionado debe ser mayor o igual al DF total requerido para el experimento. Los grados de libertad del experimento se calculan

sumando los DF de los factores utilizados en el sistema [30, p. 5]. Los grados de libertad se calculan de acuerdo a la ecuación 1.12.

$$DF = (n_1 - 1) \times n_f + (n_1 - 1) \times (n_1 - 1) \times n_i \quad [30, p. \quad (1.12)$$

5]

Donde:

n_1 = Número de niveles de los factores

n_f = Número de factores

n_i = Número de interacciones

Un arreglo ortogonal está compuesto por el número de factores y niveles que son necesarios en el experimento. A continuación, en la **Tabla 1.9** se muestra un arreglo ortogonal L8 (2^7) donde el arreglo ortogonal está compuesto por 8 experimentos, 2 interacciones y 7 factores.

Tabla 1.9 Arreglo ortogonal L8 (2^7) [31, p. 26].

Número de pruebas	Número de Factores						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

1.4.5. Método Anova

Anova es una técnica estadística estándar llamada análisis de varianza [31], utilizado para proveer una medida de confianza. Ésta técnica analiza la variabilidad de datos obteniéndose una confianza que es medida a través de la varianza [31].

a) Términos notas y desarrollo de Anova

En el análisis de varianza se necesita de variables independientes tales como los grados de libertad, cuadrados medios, suma de cuadrados, entre otros, que se calcula y organiza a través de un formato tabular estándar, las cuales se definen como se muestra a continuación:

V	Promedio de raíces (varianza)	C.F	Factor de corrección
S	Suma de cuadrados	f	Grados de libertad
n	Numero de experimentos	f _e	Error de grados de libertad
DF	Grados de libertad	f _T	Grados de libertad total
e	Error (experimental)	r	Numero de repeticiones
F	Relación de varianza	S´	Suma pura de cuadrados
P	Porcentaje de influencia	T	Total de resultados

b) Grados de libertad

Es la medida tomada de una cantidad de información [31, p. 130], determinada en forma exclusiva a partir de un conjunto de datos. El número de grados de libertad para los datos relativos de un factor es igual al número de niveles menos uno. Por ejemplo, con un factor de tres niveles se obtendrá dos grados de libertad. Un arreglo ortogonal L8 de cuatro factores y tres niveles, será de 7 y 2 grados de libertad para cada factor o columna.

$$DF_{\text{Total}} = \text{Número de Pruebas} - 1 \quad [31] \quad (1.13)$$

$$\text{Para factores} \quad DF = \text{Número de niveles} - 1 \quad [31] \quad (1.14)$$

$$\text{Para el error} \quad DF_e = DF_{\text{Total}} - DF_{\text{Factores}} \quad [31] \quad (1.15)$$

c) Varianza

La varianza es la desviación promedio al cuadrado de una población la sobre la media de la población [31].

$$V = \frac{S}{DF} \quad [31] \quad (1.16)$$

d) Suma total de los cuadrados

Es una medida de desviación promedio de los datos de una población, con el valor medio de los datos de la población [31, p. 135].

$$ST = S - C.F$$

$$ST = \sum_{i=1}^n yi^2 - \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n yi\right]^2 \quad [31, p. 136] \quad (1.17)$$

e) Razón de varianza

Es la relación entre la varianza del parámetro y error del proceso, también llamada estadística F, esta relación se usa para predecir un factor bajo en el estudio con relación a la varianza de todos los factores de la población incluidos el término del error [31, p. 138].

El valor F se obtiene después de un análisis en el experimento que compara un valor de las tablas F estandarizadas, tomando en cuenta un nivel estadístico y factores dados. Si en

la comparación el valor de F calculado es mayor que el valor de la tabla F estándar, este parámetro es considerado significativo o por otro lado es considerado agrupado.

$$F = \frac{V}{e} \quad [31, p. 138] \quad (1.18)$$

f) Porcentaje de influencia

El porcentaje de influencia para cada factor se obtiene mediante la relación del factor y la suma de cuadrados total multiplicando el resultado por 100, para obtener el porcentaje de influencia necesaria.

$$P = S * \frac{100}{ST} \quad [31, p. 145] \quad (1.19)$$

g) Predicción de rugosidad superficial óptima

Los niveles de óptimos de cada factor se determinan mediante la prueba ANOVA, basándose en estos datos según Taguchi, la rugosidad superficial óptima se obtiene mediante la ecuación 1.20.

$$R_{opt} = A + B + C + D - 3 \times R_{mean} \quad [30, p. 8] \quad (1.20)$$

Donde A, B, D, C es la menor medida de los experimentos de cualquiera de los factores y R_{mean} es la rugosidad media total de los experimentos.

El último paso del método *Taguchi* es encontrar un intervalo de confianza para la media pronosticada mediante la ecuación 1.21.

$$CI = \sqrt{F(1, DFe) \times Ve \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad [30, p. 8] \quad (1.21)$$

Donde:

$F(1, DFe)$ = Tomado de tablas estándar para un nivel de significancia de 0,05

Ve = Varianza de error

R = Número de repetición de experimentos

n_{eff} = Número efectivo de repeticiones

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t}$$

Donde:

N = Número total de ensayos

V_t = Varianza total

CAPITULO 2

PROCESO DE MECANIZADO

2.1. Maquinaria

Para la ejecución del proyecto técnico se realizó en el Centro de Mecanizado vertical controlado por Ordenador EMCO Concept Mill 260, **Figura. 2.1**, propiedad del laboratorio de CNC de la Universidad Politécnica Salesiana. En la **Tabla 2.1** se muestra las principales especificaciones del Centro de Mecanizado.

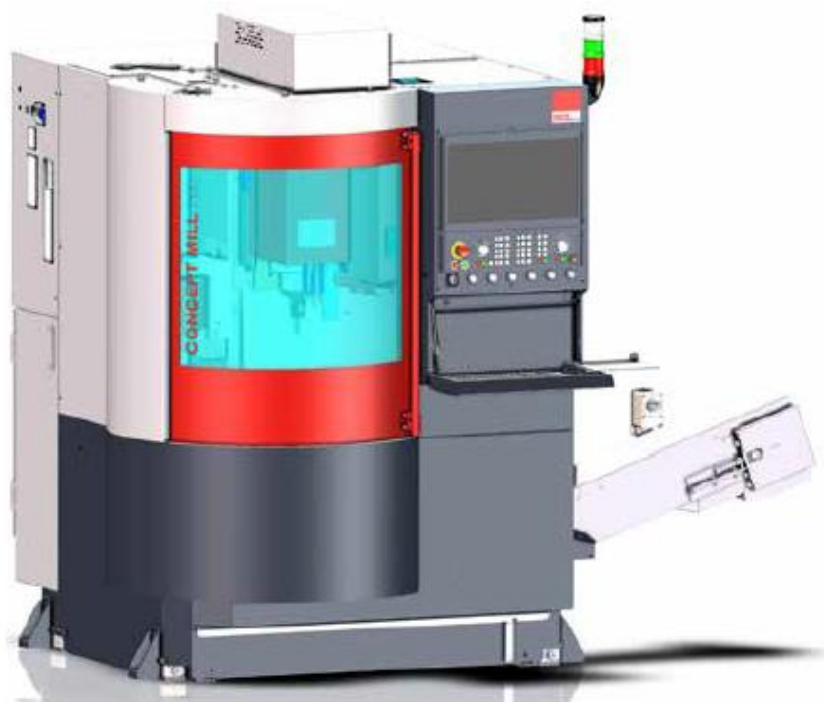


Figura. 2.1 Centro de mecanizado EMCO Concept Mill 260 [32].

Tabla 2.1 Datos técnicos de la máquina [32]

Ámbito de trabajo		
Recorrido del carro longitudinal (X)	[mm]	350
Recorrido del carro longitudinal (Y)	[mm]	250
Recorrido del carro longitudinal (Z)	[mm]	300
Distancia nariz del husillo-superficie de la mesa (min. Max)	[mm]	120 – 420
Mesa fresa		
Mesa de fundición esmerilada		
Superficie de sujeción (L*A)	[mm]	520 * 300
Altura de la superficie de la mesa sobre el suelo	[mm]	900
Carga máx. De la mesa	[kg]	100
Cantidad de ranuras en T	[1]	5
Tamaño de las ranuras en T según DIN 650	[mm]	12
Distancia de las ranuras en T	[mm]	45
Fresa husillo		
Rango de velocidad – accionamiento directo (motor asincrónico trifásico)	[min-1]	150 -10000
torque (100/40% ED)	[Nm]	23 / 34
Potencia (100/40% ED)	[KW]	4,9 / 6,8
Portaherramientas según DIN ISO 69871-A		SK 30
Pernos de apriete según DIN ISO 69872 (similar 7388/2)		M12, tipo A
Portaherramientas calibrado según DIN ISO 1940, a 10000 min-1		G2,5
Accionamiento de carro		
Fuerza de trabajo máx. En X / Y / Z	[m/min]	10
Velocidad de marcha rápida en X, Y, Z	[m/min]	24
Fuerza de avance máx. En X / Y / Z	[N]	3000
Tolerancia media de posición según VDI 3441 in X / Y / Z	[µm]	4/4/4
Torreta de herramientas		
Cambiador de herramienta según el principio brazo S		
Numero de posiciones de herramienta, tambor con lógica de operación	[1]	20
Tiempo de cambio de herramienta directo	[s]	2,5
Diámetro máx. De la herramienta	[mm]	ø63
Diámetro máx. De la herramienta con puesto vacío	[mm]	ø80
Longitud máx. De herramienta	[mm]	200
Peso máx. De herramienta	[kg]	5
Fuerza de compresión	[N]	1040
Peso máx. De equipamiento de la torreta de herramientas	[kg]	60

2.2. Rugosímetro

Para la medición de la rugosidad se hicieron una serie de tomas en los laboratorios de metrología de la Universidad Politécnica Salesiana, con el rugosímetro marca MITUTOYO SJ-210 en las probetas, como se aprecia en la **Figura. 2.2**.



Figura. 2.2 Rugosímetro marca MITUTOYO SJ - 210 [33].

Es un instrumento electrónico eficaz y exacto que sirve para medir la rugosidad de la superficie de un objeto mecanizado, este instrumento determina las estrías que se presentan en la sección transversal del elemento.

2.2.1. Propiedades del rugosímetro mitutoyo SJ-210.

- Rango de medición en eje Z: 17,5 mm; en eje X; 5,6 mm.
- Palpador de diamante.
- Radio del palpador 2 μm .
- Ángulo de la punta del palpador: 60°.
- Velocidad de medición: 0,25 / 0,5 / 0,75 mm/s [34].

Este instrumento mide en unidades expresadas en micras: 1micra = $1\mu\text{m}$ $0,000001\text{m}$ = $0,001\text{mm}$.

2.3. Herramienta

La herramienta que se usó para este proceso fueron fresas de punta esféricas de carburo diseñadas de esta manera para el trabajo en superficies curvas, como se aprecia en la

Figura. 2.3

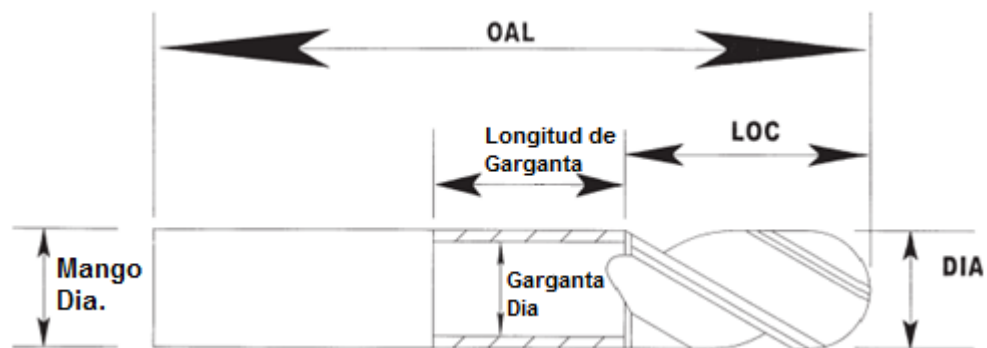


Figura. 2.3 Partes de la herramienta [35].

Fresas de carburo 4 flancos

Marca HTC TOOL

	Acabado	Desbaste
OAL:	63 mm	50 mm
LOC:	19 mm	16 mm
DIA:	8 mm	5 mm



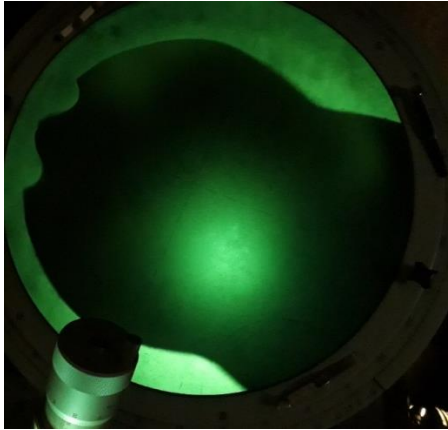


Figura. 2.4 Desgaste de la herramienta.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

En la **Figura. 2.4** se puede visualizar el perfil de la herramienta usada en el mecanizado, con un deterioro mínimo, por tener una profundidad axial baja de 0,02 mm.

2.3.1. Características de la herramienta

En la **Tabla 2.2** y **Tabla 2.3** se verifica las principales características y recomendaciones de la herramienta usada en el experimento.

Tabla 2.2 Características principales de la herramienta [35]

HTC CAPA DURA	
Elemento	AlTiN- Nitruro de titanio de Aluminio
Nano dureza (Gpa)	38
Coefficiente de Fricción	0.7
Espesor del Recubrimiento	2,2µm
Umbral térmico	900°C
Color	Negro
Características y aplicaciones principales	Alta resistencia al calor, para el mecanizado seco a alta velocidad, mecanizado duro

Tabla 2.3 Especificaciones de la herramienta para el material requerido [35]

MATERIAL	SFM	1/8"	3/16"	1/4"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	1"
MATERIALES NO FERROSOS									
ALEACIONES DE ALUMINIO :2024-T4/T6, 2014, 6061-T6/T651,7075-T6	800-2000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,01
Estas son recomendaciones básicas. Ajuste los avances y las velocidades de acuerdo con las circunstancias individuales.									
RPM = SFM X 3,82 / Diámetro de la herramienta (en pulgadas por minuto) = RPM X CTT X Cantidad de flancos.									
CTT= Espesor de la viruta por diente									
SFM= Pies de superficie por minuto									

2.4. Inventor HSM

El software Inventor HSM versión 2016 **Figura. 2.5**, cuenta con herramientas de mecanizado en 2D y 3D para 3 ejes, capaz de simular procesos de mecanizados mediante la programación de diferentes parámetros.



Figura. 2.5 Programa Inventor HSM PRO 2016.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

El Software Inventor HSM realiza avances de tecnologías para generar trayectorias de herramienta más cortas y más suaves posibles, lo que se traduce en un menor tiempo de mecanizado, una mejor calidad de superficie, menos desgaste de herramientas y una vida útil prolongada de la máquina.

Muchas estrategias de mecanizado están disponibles para adaptarse a la topología de la pieza. Inventor HSM proporciona tecnologías de mecanizado de acabado superiores que incorporan movimientos de entrada y salida de plomo lisos, tangentes que mantenga la herramienta en movimiento con suavidad, ayudando a reducir el desgaste de la máquina y de las herramientas. [36]

2.4.1. Ventajas del inventor HSM

- **Utiliza herramientas en sistemas de mecanizado** como contornos, ranurado, chaflanes, fresado de rosca, taladrado, desbaste adaptativo 3D, cajas 3D, contornos 3D, recubrimiento, fresado paralelo, horizontal, a lápiz, ondular, en espiral, radial y 3+2, contornos 3D, adaptativo 2D, así como virutas y contorno multi eje. [37]
- **Simular estrategias de mecanizado generadas en relación con el modelo de la pieza que se necesita mecanizar** con herramientas de simulación y verificación integradas por el soporte técnico. Además, incluye diferentes herramientas de medición e inspección para la reversión de trazado de estrategias y simulación con vista previa de adelante hacia atrás [37].
- **Accede a posprocesadores normalizados de distinto tipo de forma gratuita**, como Fanuc, Hurco, Okuma, Mazak y muchos más. Otros procesadores distintos se pueden configurar de acuerdo a las necesidades específicas con ayuda de asistentes técnicos de Autodesk. [37]

2.4.2. Parámetros de mecanizado

Dentro del mecanizado de una superficie suelen actuar varias operaciones importantes fundamentales para la óptima ejecución de las mismas, estas se dividen en operaciones de desbaste, semiacabado y acabado.

- **Desbaste:**

En esta operación se maximiza la cantidad de material que va a ser mecanizado, y no se controla las tolerancias ni la rugosidad [38].

- **Semiacabado:**

Las propiedades de mecanizado procuran dejar la superficie lo más posiblemente uniforme, con un exceso de 0.2 – 0.5mm y no siempre suele ejecutarse las operaciones.

- **Acabado:**

Cuando se trata del acabado el tiempo queda de lado teniendo como objetivo principal la tolerancia y la rugosidad exigidas en un proceso de mecanizado.

Es en este punto donde este proyecto técnico se va a enfocar para determinar parámetros y trayectorias que mejoren el proceso de mecanizado en superficies cóncavas y convexas que sean las más eficaces al tratarse de superficies curvas, y más aún aplicables para moldes de soplado donde las tolerancias y rugosidades son muy exigentes para poder obtener un producto final de calidad como se muestra en la **Figura. 2.6**.

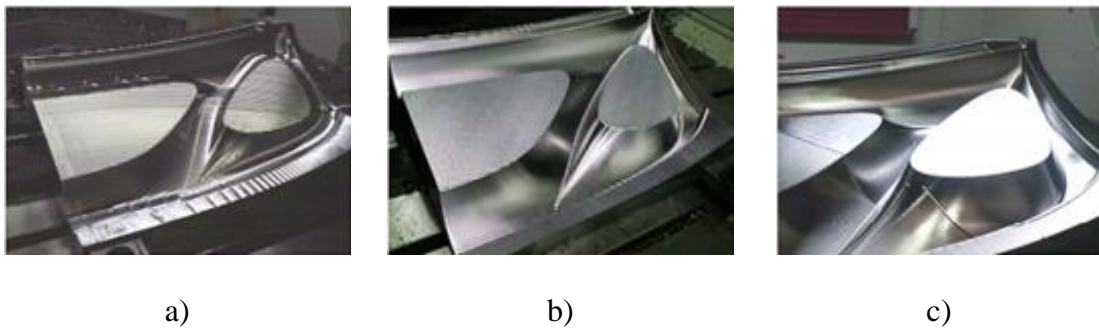


Figura. 2.6 Procesos de mecanizado, a) Desbaste, b) Semiacabado, c) Acabado [38].

2.4.3. Estrategias de mecanizado

En la actualidad existen muchas trayectorias que sirven para realizar diferentes formas de mecanizado, unas mejorando el tiempo, otras mejorando el acabado; por ello el estudio de estas es fundamental al tratarse de superficies curvas. Entre las principales que maneja el programa Autodesk Inventor HSM son las siguientes:

- Parallel
- Contour
- Horizontal Clearing
- Pencil
- Scallop/Constant Stepover
- Spiral
- Morphep Spiral
- Radial
- Pocket
- Adaptive Clearing
- 3+2 Machining

El estudio en el que se basa esta investigación es profundizar en el acabado superficial, por ello existe tres estrategias ideales que sirven para trabajar en superficies curvas, las cuales se detallan a continuación y son usadas en el proyecto técnico:

a) Parallel

La estrategia Parallel es la más utilizada. Cada pasada es paralela al plano XY y siguen la superficie en la dirección Z. Las pasadas en paralelos son más adecuadas para áreas poco profundas y para fresado descendente. Para detectar, automáticamente, áreas poco

profundas, el mecanizado puede limitarse a un ángulo máximo entre la punta de la herramienta y la superficie. Al seleccionar la opción de fresado hacia abajo, la deflexión de la herramienta puede minimizarse al mecanizar superficies complejas, la trayectoria se representa en la **Figura. 2.7** [39].

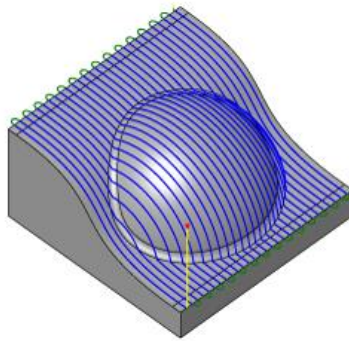


Figura. 2.7 Trayectoria Paralell [39].

b) Scallop

Scallop crea pases que están a una distancia constante el uno del otro al desplazarse hacia adentro a lo largo de la superficie. Los pases siguen paredes inclinadas y verticales para mantener el paso. Aunque el acabado *Scallop* se puede utilizar para terminar una pieza entera, se usa más comúnmente para el mecanizado en reposo, siguiendo una combinación de pasadas Contour y Parallel. Al igual que las otras estrategias de acabado. El mecanizado puede estar limitado por un rango de ángulo de contacto. La trayectoria se representa en **Figura 2.8** [39].

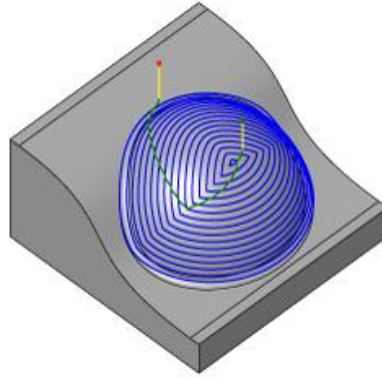


Figura. 2.8 Trayectoria Scallop [39].

c) **Morphed Spiral**

Morphed Spiral es muy similar a la estrategia Spiral. Sin embargo, una operación en Morphed Spiral genera la espiral desde el límite seleccionado en oposición a una operación en espiral que recorta los pases generados al límite de mecanizado. Esto significa que Morphed Spiral se puede usar para superficies adicionales para las cuales Spiral no es apropiado. También puede ser muy útil cuando se mecanizan superficies orgánicas y de forma libre. Aunque la estrategia *Scallop* se usa a menudo para este tipo de superficies, tanto las esquinas filudas como las transiciones entre las pasadas generadas pueden dar como resultado marcas visibles. La estrategia Morphed Spiral generalmente proporciona una trayectoria de herramienta mucho más suave al evitar estos problemas, la trayectoria se representa en **Figura 2.9** [39].

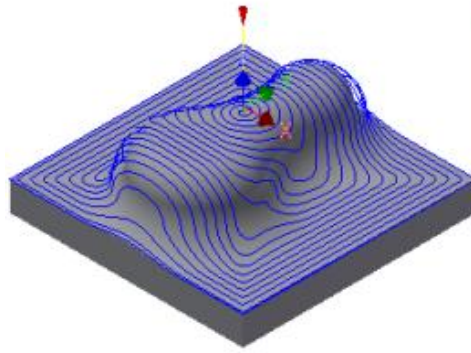


Figura. 2.9 Trayectoria Morphed Spiral [39].

2.4.4. Programación en Inventor HSM PRO

Según el método estadístico usado en una combinación ortogonal de 27 pruebas y 3 niveles con sus respectivos parámetros donde varían las estrategias, los RPM, el avance y el paso en un software estudiantil de prueba y su manufactura realizada en el centro de mecanizado EMCO Concept Mill 260, describiendo los pasos a continuación:

- a) Una vez creado el dibujo se programa el mecanizado en la pestaña CAM en el mismo Inventor, como se aprecia en la **Figura. 2.10**

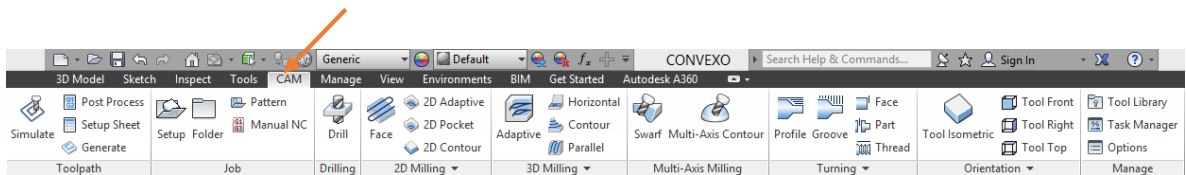


Figura. 2.10 Panel de Software Autodesk Inventor HSM.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

- b) Se selecciona una trayectoria para este caso se van a usar SCALLOP, PARALLEL Y MORPHED SPIRAL, que son las que se acoplan a la geometría del experimento, como se aprecia en las **Figura. 2.11**.

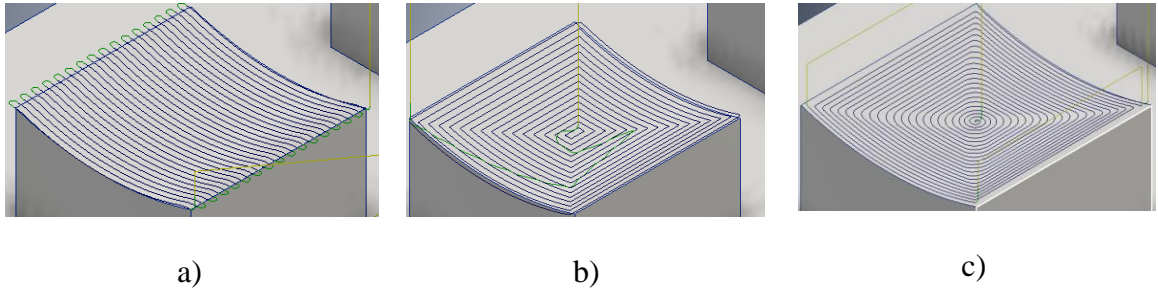


Figura. 2.11 Estegia a) Parallel, b) Scallop, c) Morphed Spiral.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

c) Se crea la herramienta:

- Fresa de punta esférica de $\varnothing 8\text{mm}$ de carburo HKS, para el desbaste.
- Fresa de punta esférica de $\varnothing 5\text{mm}$ de carburo HKS, para el acabado, como se aprecia en la **Figura. 2.12**

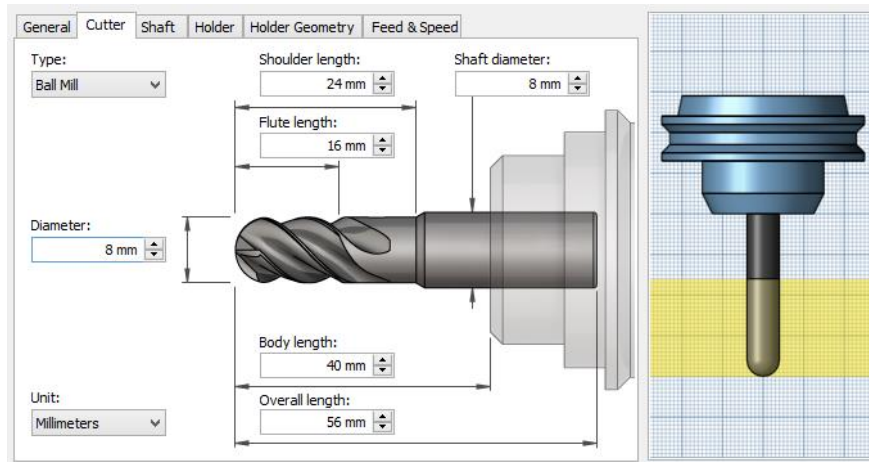


Figura. 2.12 Selección de la herramienta.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

d) Seleccionar la geometría a mecanizar modificando los parámetros según el arreglo que se tome por el método estadístico TAGUCHI, como se puede apreciar en las **Figura. 2.13**.

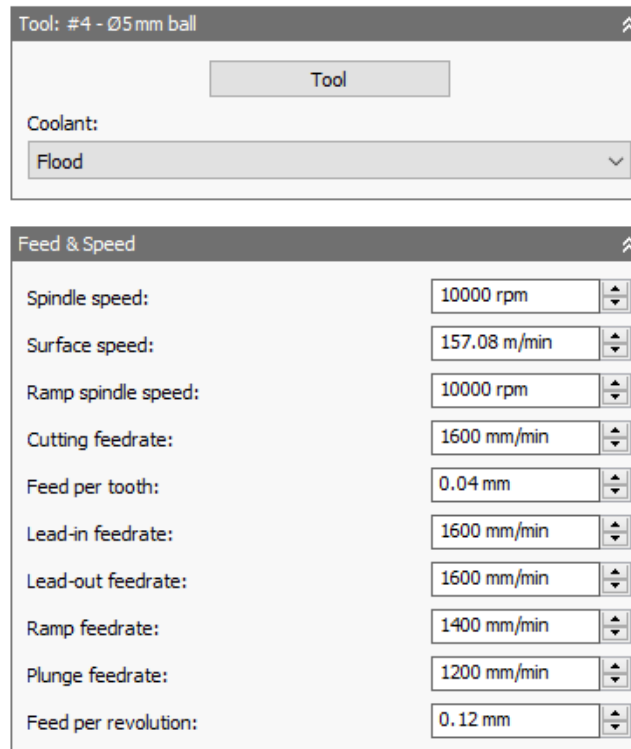


Figura. 2.13 Parametros de mecanizado.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

- e) Post-procesar al código G con la extensión Siemens-840d.cps – Siemens SINUMERIK 840D y determinar si existen errores, observar la codificación, como se aprecia en la **Figura. 2.14**

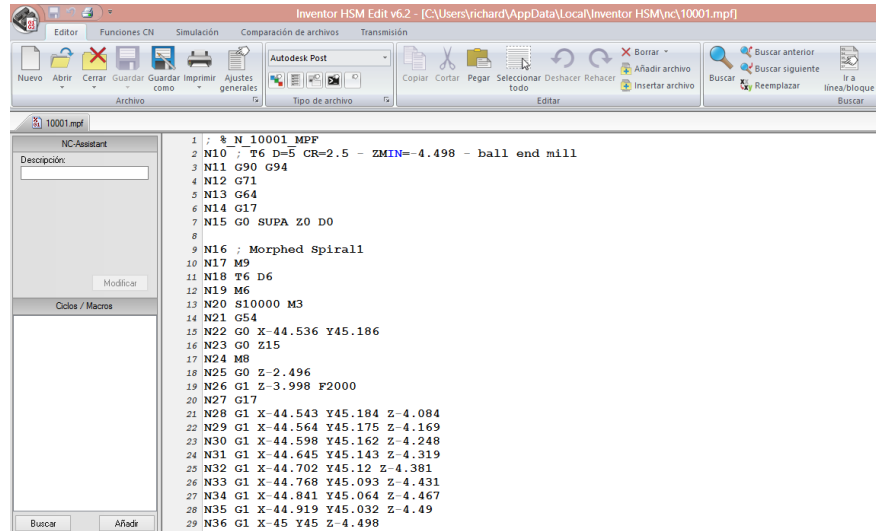


Figura. 2.14 Inventor HSM, Código G.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

- f) Pasar el código G al programa de la maquina EMCO Concept Mill 260, y seleccionar la herramienta, mandar a correr.
- g) Tomar tres datos de rugosidad para los respectivos cálculos.

2.5. Método de mecanizado

Para el desarrollo del experimento se utiliza 9 probetas para el mecanizado de superficies cóncavas y 9 probetas para el mecanizado de superficies convexas, cada probeta tiene las siguientes dimensiones: 25 mm de largo, 25mm de ancho y 25 mm de profundidad con un radio de profundidad de 2 mm, como se indica en **Figura 2.15**.

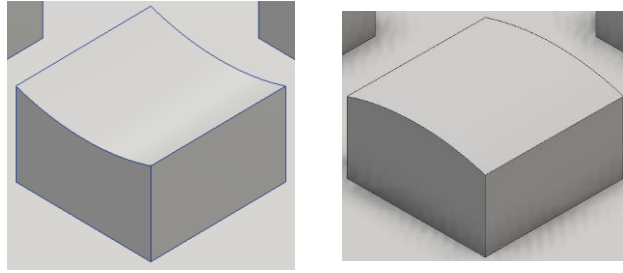


Figura. 2.15 Probetas de superficies cóncavas y convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

Según la **Tabla 1.4**, con una profundidad de corte de 1 mm se tiene una velocidad de corte de 610 m/min, para el proyecto técnico se trabaja con un valor constante de profundidad de corte de 0,2 mm, interpolando el valor teórico y práctico se obtiene una velocidad de corte de 626 m/min y Rev/min = 39852,39.

Debido a las características de la máquina Emco, se usa 10000 rpm siendo la máxima velocidad que tiene el equipo, por esa razón se usa los valores máximos de rpm para el proyecto de técnico. Para el avance mediante fórmulas se obtiene los valores de la **Tabla 2.4**.

En la industria de plásticos, para moldes de botellas tipo PET se fabrican con profundidades radiales de 0,03 – 0,1mm para obtener acabados de buena calidad. En el proyecto técnico se usan valores de profundidad axial de (0,2 – 0,7) que se encuentran dentro del rango para obtener valores de rugosidad bajos.

2.6. Determinación de factores y sus niveles para el método Taguchi

Para determinar cada uno de los factores, se toma en cuenta los parámetros más incidentes en el estudio a realizarse, en este estudio se ha tomado como factores significativamente incidentes en el mecanizado de superficies curvas la trayectoria de la herramienta, las revoluciones por minuto (RPM), avance y el paso, siendo variables que afectan

directamente en el maquinado con una profundidad de corte de 0,2 mm constante. En la **Tabla 2.4** se muestra los factores y niveles principales tomados en cuenta para el estudio.

Tabla 2.4 Factores y niveles seleccionados

Factores		Niveles		
		1	2	3
A	Estrategia	Parallel	Scallop	Morphed Spiral
B	RPM (rev/min)	10000	9000	8000
C	Avance (mm/min)	2000	1800	1600
D	Paso (mm)	0,03	0,07	0,1

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

2.6.1. Aplicación del método Taguchi

En la aplicación del método *Taguchi* es necesario determinar un arreglo ortogonal apropiado para el experimento, el primer paso es calcular los grados de libertad por medio de la ecuación 2.1.

$$DF = (n_1 - 1) \times n_f + (n_1 - 1) \times (n_1 - 1) \times n_i \quad (2.1)$$

$$DF = 20$$

Donde n_1 es el número de niveles de cada factor igual a 3, n_f es el número de factores usados en el proyecto técnico igual a 4 y n_i es el número de interacciones igual a 3. Como se tiene un $DF=20$ se busca un arreglo ortogonal que cumpla con los factores y niveles adecuados para el experimento. Se usa un arreglo ortogonal L7 con $DF = 26$, consta de 27 filas, 13 columnas y 3 interacciones como se muestra en la **Tabla 2.5**.

Tabla 2.5 Arreglo ortogonal L27 con factores e interacciones [30].

Prueba N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A	B	AXB	AXB	C	AXC	AXC	BXC	D	,----	BXC	,---	,---
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Para la construcción del arreglo ortogonal L27 del experimento se asigna como parámetros dependientes a la columna 1 factor (A) Estrategia, columna 2 factor (B) RPM, columna 3 factor (C) Avance y columna 4 factor (D) Paso; en cada columna se verifica el número de interacciones igual a tres siendo los niveles de cada factor. En la **Tabla 2.6** se verifica el arreglo ortogonal realizado en base a la **Tabla 2.5**.

Tabla 2.6 Interacciones de los niveles de cada factor para la superficie cóncava y convexa

N° Pruebas	Estrategia (A)	B (rev/min)	C (mm/min)	D (mm)
1	Parallel	10000	2000	0,03
2	Parallel	10000	1800	0,07
3	Parallel	10000	1600	0,1
4	Parallel	9000	2000	0,07
5	Parallel	9000	1800	0,1
6	Parallel	9000	1600	0,03
7	Parallel	8000	2000	0,1
8	Parallel	8000	1800	0,03
9	Parallel	8000	1600	0,07
10	Scallop	10000	2000	0,07
11	Scallop	10000	1800	0,1
12	Scallop	10000	1600	0,03
13	Scallop	9000	2000	0,1
14	Scallop	9000	1800	0,03
15	Scallop	9000	1600	0,07
16	Scallop	8000	2000	0,03
17	Scallop	8000	1800	0,07
18	Scallop	8000	1600	0,1
19	Morphed Spiral	10000	2000	0,1
20	Morphed Spiral	10000	1800	0,03
21	Morphed Spiral	10000	1600	0,07
22	Morphed Spiral	9000	2000	0,03
23	Morphed Spiral	9000	1800	0,07
24	Morphed Spiral	9000	1600	0,1
25	Morphed Spiral	8000	2000	0,07
26	Morphed Spiral	8000	1800	0,1
27	Morphed Spiral	8000	1600	0,03

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

CAPITULO 3

CÁLCULOS Y RESULTADOS

En la **Figura. 3.1** se muestra el maquinado de las probetas cóncavas y convexas con sus parámetros y niveles establecidos.

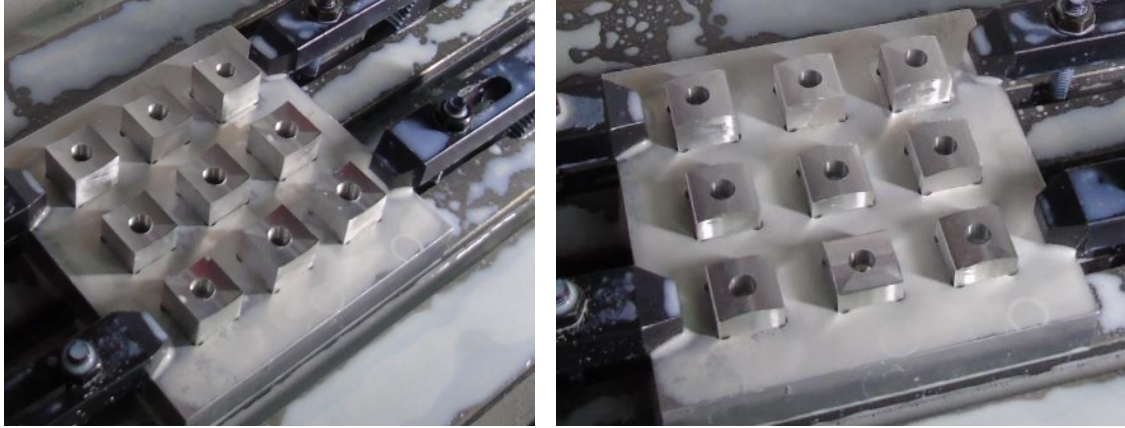


Figura. 3.1 Mecanizado de Superficies cóncavas y convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

En la **Tabla 3.1** y **Tabla 3.2** se verifica los datos obtenidos de rugosidad, con tres mediciones en cada prueba medidos con el rugosímetro Mitutoyo, calculando un valor promedio, obteniéndose un valor menor de rugosidad entre todas las pruebas.

Tabla 3.1 Datos y resultados experimentales para superficies cóncavas

N° Pruebas	A Trayectoria	B (rev/min)	C (mm/min)	D (mm)	R1	R2	R3	R promedio
1	Parallel	10000	2000	0,03	0,531	0,480	0,484	0,498
2	Parallel	10000	1800	0,07	0,560	0,578	0,578	0,572
3	Parallel	10000	1600	0,1	0,629	0,630	0,593	0,617
4	Parallel	9000	2000	0,07	1,222	1,222	1,197	1,214
5	Parallel	9000	1800	0,1	0,809	0,802	0,806	0,806
6	Parallel	9000	1600	0,03	0,575	0,584	0,613	0,591
7	Parallel	8000	2000	0,1	0,775	0,747	0,765	0,762
8	Parallel	8000	1800	0,03	0,453	0,457	0,461	0,457
9	Parallel	8000	1600	0,07	0,525	0,521	0,535	0,527
10	Scallop	10000	2000	0,07	0,613	0,624	0,600	0,612
11	Scallop	10000	1800	0,1	0,368	0,346	0,337	0,350
12	Scallop	10000	1600	0,03	0,321	0,332	0,340	0,331
13	Scallop	9000	2000	0,1	0,624	0,604	0,601	0,610
14	Scallop	9000	1800	0,03	0,364	0,364	0,358	0,362
15	Scallop	9000	1600	0,07	0,389	0,426	0,565	0,460
16	Scallop	8000	2000	0,03	0,880	0,880	0,863	0,874
17	Scallop	8000	1800	0,07	0,369	0,417	0,400	0,395
18	Scallop	8000	1600	0,1	0,404	0,399	0,393	0,399
19	Morphed Spiral	10000	2000	0,1	0,552	0,530	0,511	0,531
20	Morphed Spiral	10000	1800	0,03	0,484	0,464	0,481	0,476
21	Morphed Spiral	10000	1600	0,07	0,280	0,293	0,277	0,283
22	Morphed Spiral	9000	2000	0,03	0,514	0,516	0,463	0,498
23	Morphed Spiral	9000	1800	0,07	0,353	0,367	0,375	0,365
24	Morphed Spiral	9000	1600	0,1	0,386	0,346	0,359	0,364
25	Morphed Spiral	8000	2000	0,07	0,745	0,747	0,752	0,748
26	Morphed Spiral	8000	1800	0,1	0,472	0,540	0,540	0,517
27	Morphed Spiral	8000	1600	0,03	0,372	0,378	0,400	0,383

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

Tabla 3.2 Datos y resultados experimentales para superficies convexas.

N° Pruebas	A (Trayectoria)	B (rev/min)	C (mm/min)	D (mm)	R1	R2	R3	R PROMEDIO
1	Parallel	10000	2000	0,03	0,468	0,404	0,531	0,468
2	Parallel	10000	1800	0,07	0,280	0,284	0,286	0,283
3	Parallel	10000	1600	0,1	0,894	0,930	0,788	0,871
4	Parallel	9000	2000	0,07	0,722	0,493	0,608	0,608
5	Parallel	9000	1800	0,1	0,624	0,690	0,690	0,668
6	Parallel	9000	1600	0,03	0,299	0,288	0,587	0,391
7	Parallel	8000	2000	0,1	0,841	0,846	0,726	0,804
8	Parallel	8000	1800	0,03	0,592	0,507	0,514	0,538
9	Parallel	8000	1600	0,07	0,401	0,397	0,410	0,403
10	Scallop	10000	2000	0,07	0,510	0,484	0,650	0,548
11	Scallop	10000	1800	0,1	0,509	0,480	0,510	0,500
12	Scallop	10000	1600	0,03	0,462	0,462	0,527	0,484
13	Scallop	9000	2000	0,1	0,436	0,549	0,509	0,498
14	Scallop	9000	1800	0,03	0,436	0,525	0,471	0,477
15	Scallop	9000	1600	0,07	0,590	0,535	0,523	0,549
16	Scallop	8000	2000	0,03	0,399	0,366	0,372	0,379
17	Scallop	8000	1800	0,07	0,491	0,404	0,506	0,467
18	Scallop	8000	1600	0,1	0,666	0,484	0,331	0,494
19	Morphed Spiral	10000	2000	0,1	0,563	0,670	0,690	0,641
20	Morphed Spiral	10000	1800	0,03	0,487	0,478	0,488	0,484
21	Morphed Spiral	10000	1600	0,07	0,485	0,475	0,466	0,475
22	Morphed Spiral	9000	2000	0,03	0,417	0,403	0,394	0,405
23	Morphed Spiral	9000	1800	0,07	0,599	0,598	0,599	0,599
24	Morphed Spiral	9000	1600	0,1	0,470	0,482	0,490	0,481
25	Morphed Spiral	8000	2000	0,07	0,478	0,472	0,554	0,501
26	Morphed Spiral	8000	1800	0,1	0,588	0,577	0,572	0,579
27	Morphed Spiral	8000	1600	0,03	0,319	0,315	0,307	0,314

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

En la **Tabla 3.3** se indica los factores más influyentes en el mecanizado de superficies cóncavas y convexas para la realización de las gráficas 3D realizadas a continuación.

Tabla 3.3 Factores influyentes en el mecanizado

Factores	Cóncava	Convexa
Estrategia (A)	21,68%	-
RPM (rev/min) (B)	-	-
Avance (mm/min) (C)	34,52%	-
Paso (mm) (D)	-	33,902%

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

En la **Figura. 3.2** se verifica la gráfica de resultados de rugosidad vs RPM con la estrategia Parallel en superficies cóncavas.

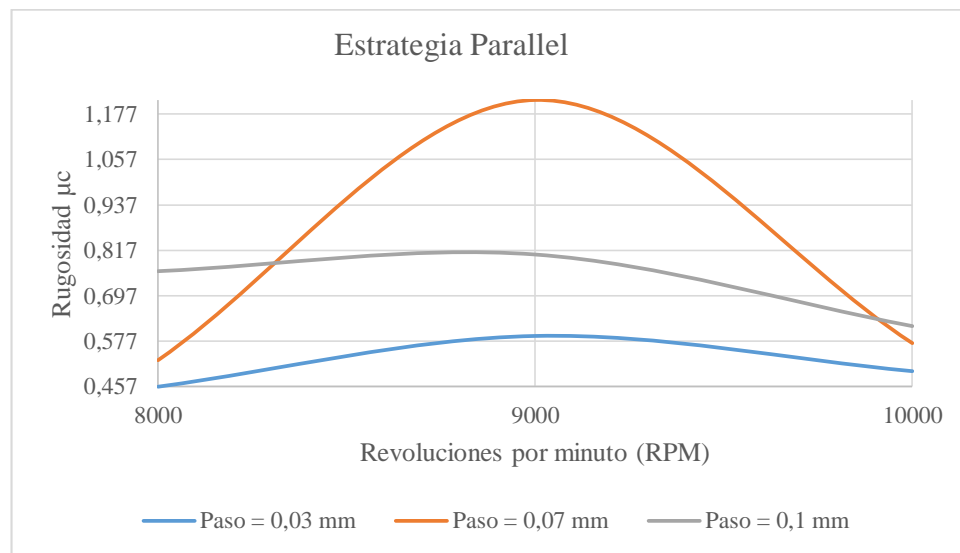


Figura. 3.2 Rugosidad vs RPM con estrategia Parallel en superficies cóncavas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

El valor de menor rugosidad es $0,457\mu\text{m}$ con la trayectoria Parallel, paso de $0,03$ y 8000 RPM. El valor de mayor rugosidad es $1,214\mu\text{m}$ con la trayectoria Parallel, paso de $0,07$ y 9000 RPM

En la **Figura. 3.3** se verifica la gráfica de resultados de rugosidad vs RPM con la estrategia Scallop en superficies cóncavas.

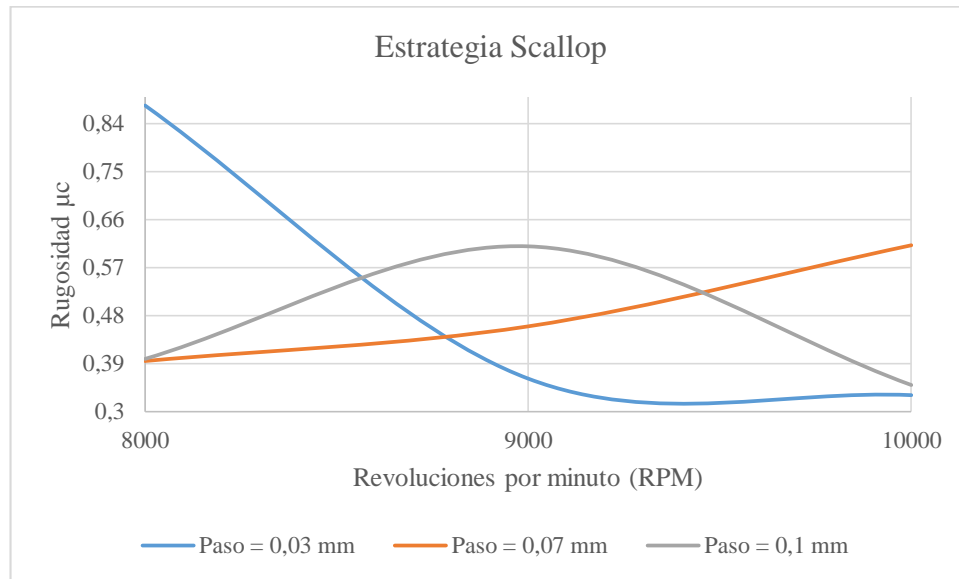


Figura. 3.3 Rugosidad vs RPM con estrategia Scallop en superficies cóncavas

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

El valor de menor rugosidad es $0,331\ \mu\text{m}$ con la trayectoria Scallop, paso de 0,03 y 10000 RPM. El valor de mayor rugosidad es $0,874\ \mu\text{m}$ con la trayectoria Scallop, paso de 0,03 y 8000 RPM.

En la **Figura. 3.4** se verifica la gráfica de resultados de rugosidad vs RPM con la estrategia Morphep Spiral para superficies cóncavas.

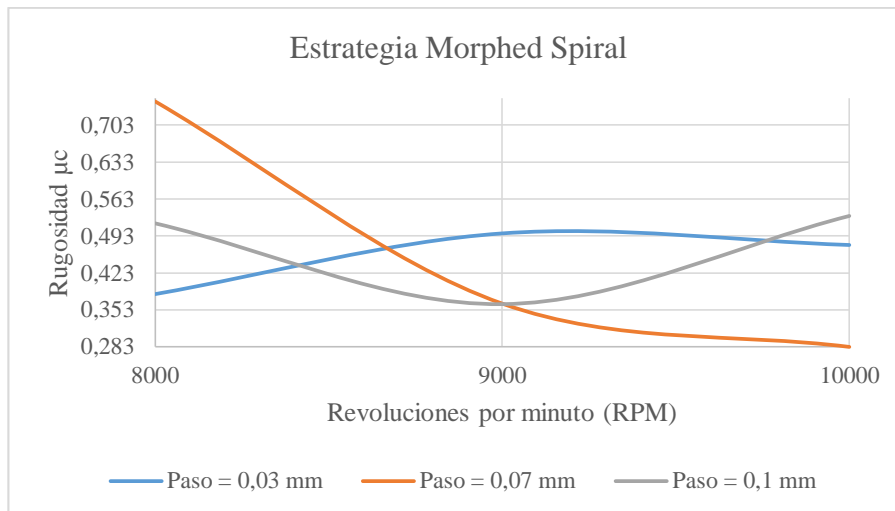


Figura. 3.4 Rugosidad vs RPM con estrategia Morphed Spiral en superficies cóncavas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

El valor de menor rugosidad es $0,283\mu\text{m}$ con la trayectoria Morphed Spiral, paso de $0,07$ y 10000 RPM. El valor de mayor rugosidad es $0,748\mu\text{m}$ con la trayectoria Morphed Spiral, paso de $0,07$ y 8000 RPM.

En un software estadístico se realiza la predicción de rugosidad con tres niveles de trayectorias y factores en superficies cóncavas obteniéndose un modelo 3D y una ecuación de regresión estadística que predice los factores de rugosidad con un rango utilizado en la investigación.

En la **Figura. 3.5** se verifica la gráfica 3D de rugosidad vs avance y RPM, en una estrategia Parallel con su respectiva ecuación de regresión aritmética en superficies cóncavas.

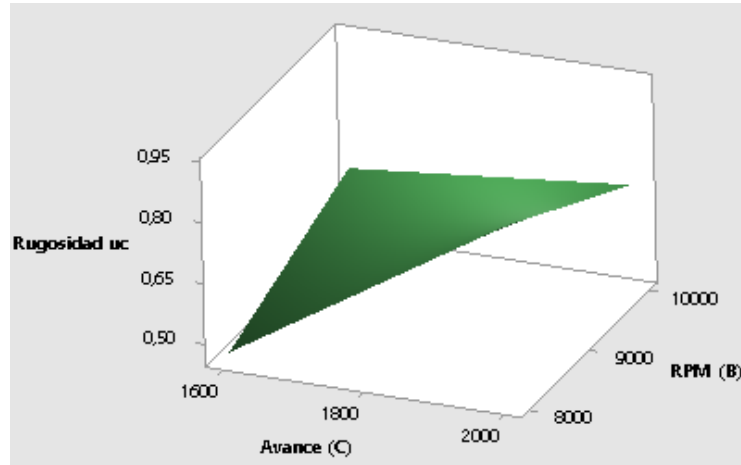


Figura. 3.5 Rugosidad vs Avance y RPM con estrategia Parallel en superficies cóncavas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

$$R_u = -7,5 + 0,00460 * C + 0,00079 * B \quad (3.1)$$

En la **Figura. 3.6** se verifica la gráfica 3D de rugosidad vs avance y RPM, en una estrategia Scallop con su respectiva ecuación de regresión aritmética en superficies cóncavas.

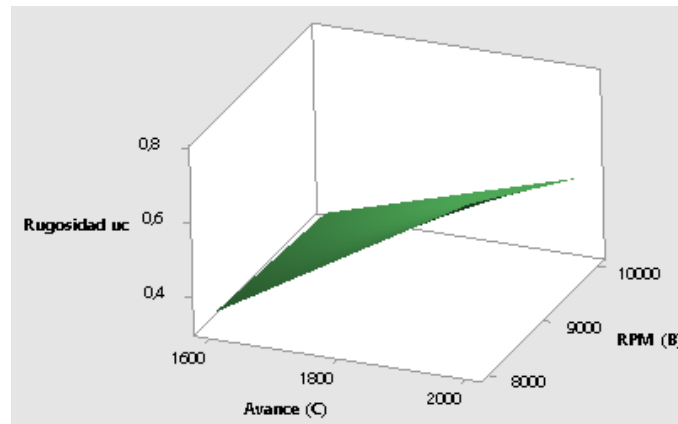


Figura. 3.6 Rugosidad vs Avance y RPM con estrategia Scallop en superficies cóncavas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

$$R_u = -4,25 + 0,00294 * C + 0,000375 * B \quad (3.2)$$

En la **Figura. 3.7** se verifica la gráfica 3D de rugosidad vs avance y RPM, en una estrategia Morphed Spiral con su respectiva ecuación de regresión aritmética en superficies cóncavas.

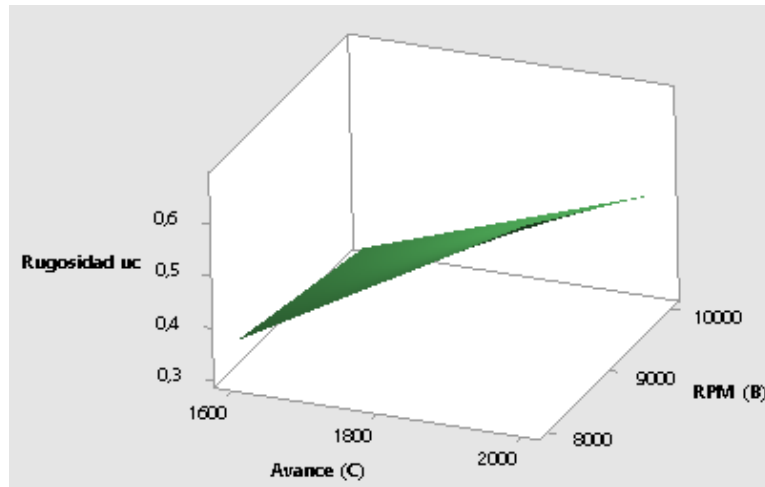


Figura. 3.7 Rugosidad vs Avance y RPM con estrategia Morphed Spiral en superficies cóncavas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

$$R_u = -2,49 + 0,00194 * C + 0,000204 * B \quad (3.3)$$

En la **Figura. 3.8** se verifica la gráfica de resultados de rugosidad vs RPM con la estrategia Parallel para superficies convexas.

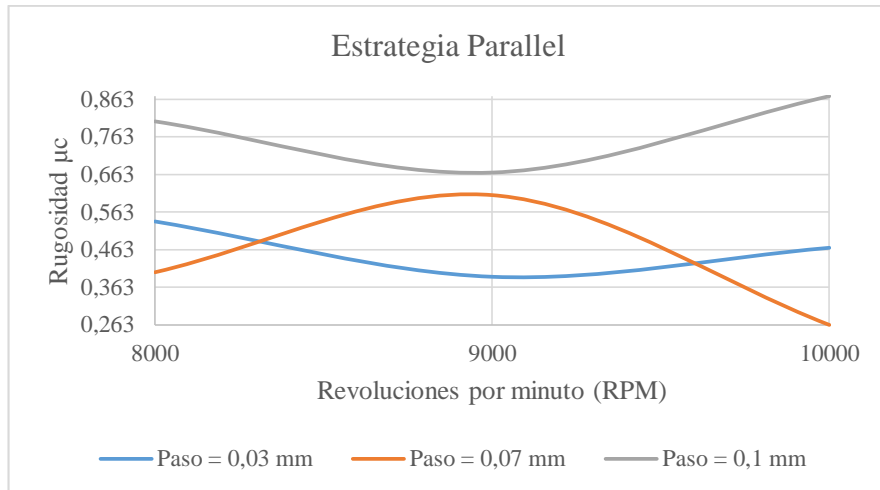


Figura. 3.8 Rugosidad vs RPM con estrategia Parallel en superficies convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

El valor de menor rugosidad es $0,263 \mu\text{m}$ con la trayectoria Parallel, paso de $0,07$ y 10000 RPM. El valor de mayor rugosidad es $0,871 \mu\text{m}$ con la trayectoria Parallel, paso de $0,1$ y 10000 RPM. En la **Figura. 3.9** se verifica la gráfica de resultados de rugosidad vs RPM con la estrategia Scallop para superficies convexas.

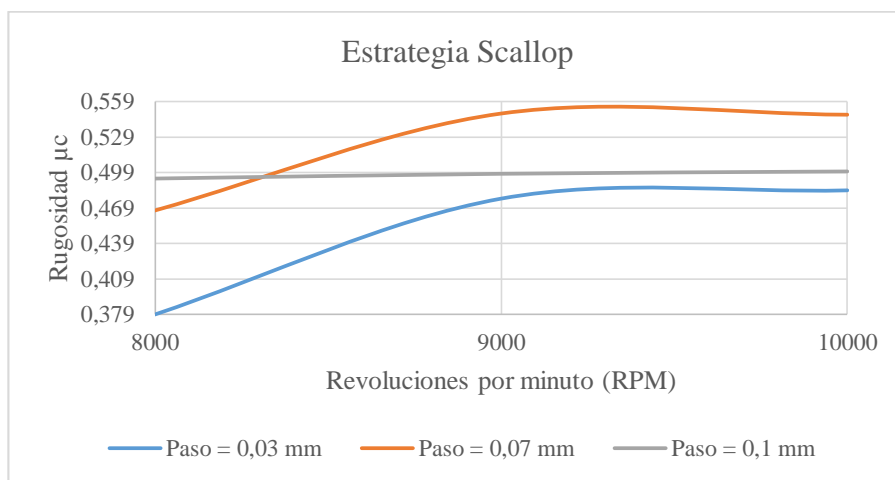


Figura. 3.9 Rugosidad vs RPM con estrategias Scallop en superficies convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

El valor de menor rugosidad es $0,379 \mu\text{m}$ con la trayectoria Scallop, paso de $0,03$ y 8000 RPM. El valor de mayor rugosidad es $0,549 \mu\text{m}$ con la trayectoria Scallop, paso de $0,07$ y 9000 RPM.

En la **Figura. 3.10** se verifica la gráfica de resultados de rugosidad vs RPM con la estrategia Morphed Spiral para superficies convexas.

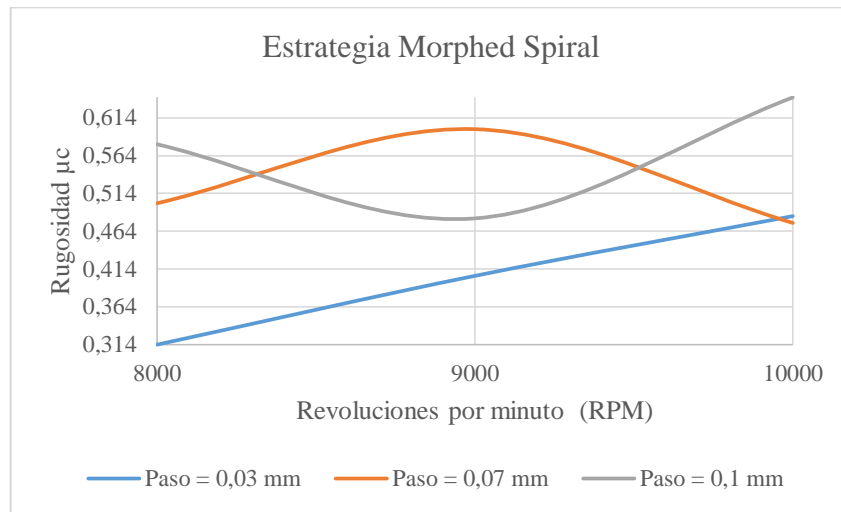


Figura. 3.10 Rugosidad vs RPM con estrategia Morphed Spiral en superficies convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

El valor de menor rugosidad es $0,314 \mu\text{m}$ con la trayectoria Morphed Spiral, paso de $0,03$ y 8000 RPM. El valor de mayor rugosidad es $0,641 \mu\text{m}$ con la trayectoria Morphed Spiral, paso de $0,1$ y 10000 RPM.

En un software estadístico se realiza la predicción de rugosidad con tres niveles de trayectorias y factores en superficies convexas obteniéndose un modelo 3D y una ecuación de regresión estadística que predice los factores de rugosidad con un rango utilizado en la investigación.

En la **Figura. 3.11** se verifica la gráfica 3D de rugosidad vs paso y avance, en una estrategia Parallel con su respectiva ecuación de regresión aritmética en superficies convexas.

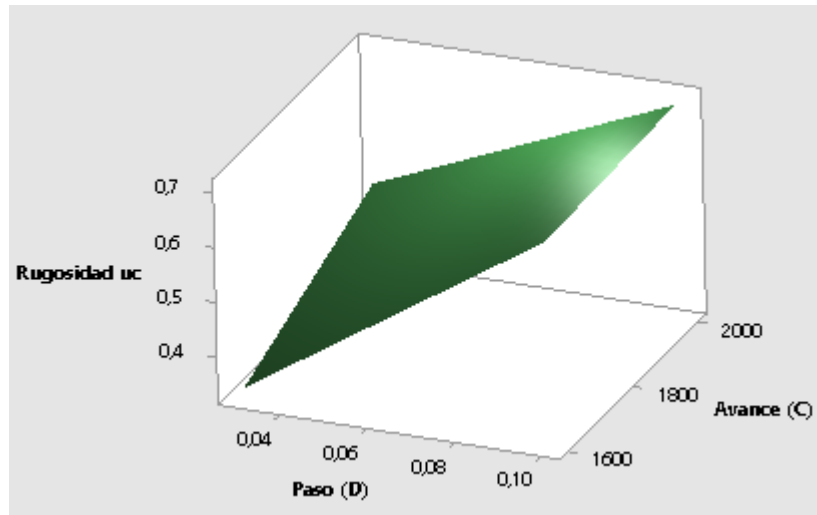


Figura. 3.11 Rugosidad vs Paso y Avance con estrategia Parallel en superficies convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

$$R_u = -0,57 + 12,1 * D + 0,000472 * C - 0,0044 * D * C \quad (3.4)$$

En la **Figura. 3.12** se verifica la gráfica 3D de rugosidad vs paso y avance, en una estrategia Scallop con su respectiva ecuación de regresión aritmética en superficies convexas.

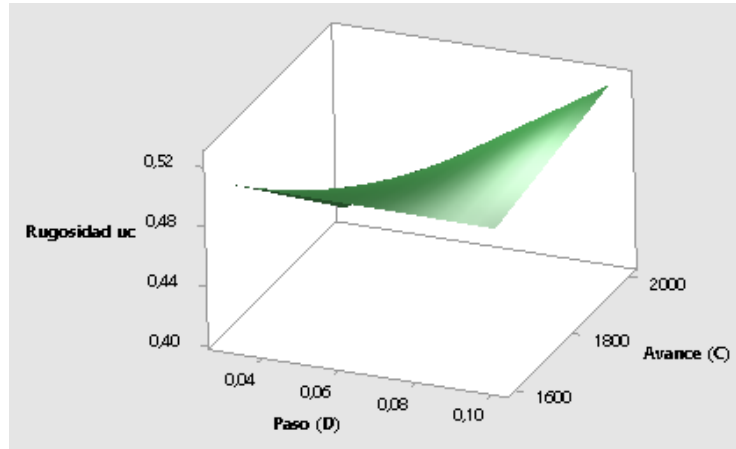


Figura. 3.12 Rugosidad vs Paso y Avance con estrategia Scallop en superficies convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

$$R_u = 1,073 - 6,47 * D - 0,000353 * C + 0,00403 * D * C \quad (3.5)$$

En la **Fig. 3.13** se verifica la gráfica 3D de rugosidad vs paso y avance, en una estrategia Morphed Spiral con su respectiva ecuación de regresión aritmética en superficies convexas.

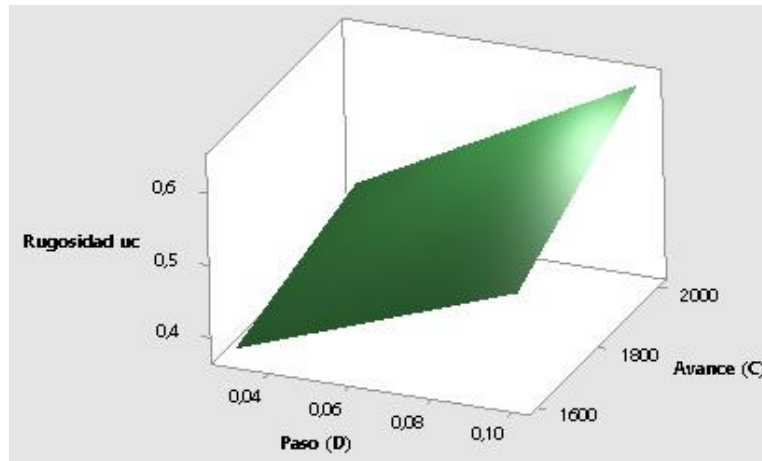


Figura. 3.13 Rugosidad vs Paso y Avance con estrategia Morhped Spiral en superficies convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

$$R_u = 0,176 - 1,41 * D + 0,00090 * C + 0,00212 * D * C \quad (3.6)$$

3.1.1. Ejemplos de cálculos

El ejemplo de cálculos se realiza con el factor A.

- Suma de cuadrados totales

$$ST = \sum_{i=1}^n Yi^2 - \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n Yi\right]^2$$

$$\sum_{i=1}^n Yi^2 = (0,498^2 + 0,572^2 + 0,617^2 + 1,214^2 + \dots + 0,383^2) = 8,973$$

$$C.F = \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n Yi\right]^2 = \frac{(0,498 + 0,572 + 0,617 + 1,214 + \dots + 0,383)^2}{27} = 7,898$$

$$ST = 8,973 - 7,898 = 1,075$$

- Varianza

$$SA = \sum_{K=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (AKi)\right]^2 - C.F$$

Donde :

L = número de niveles = 3

n = número de muestras de ensayo en los niveles del factor = 9

Nivel 1, L = 1, n = 9

$$\left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (A1i)\right]^2 = \frac{(0,498 + 0,572 + 0,617 + 1,214 + 0,806 + 0,591 + 0,762 + 0,457 + 0,527)^2}{9} = 4,059$$

Nivel 2

$$\left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (A2i)\right]^2 = \frac{(0,612 + 0,350 + 0,331 + 0,610 + 0,362 + 0,460 + 0,874 + 0,395 + 0,399)^2}{9} = 2,145$$

Nivel 3

$$\left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (AKi)\right]^2$$

$$= \frac{(0,531 + 0,476 + 0,283 + 0,498 + 0,365 + 0,364 + 0,748 + 0,517 + 0,383)^2}{9} = 1,928$$

$$SA = 0,672 + 2,14 + 1,928 - 7,898 = 0,233$$

- **Varianza del factor A (Trayectoria)**

$$VA = \frac{SA}{DF} = \frac{0,233}{2} \quad DF = \text{Grados de libertad de cada nivel}$$

$$VA = 0,117$$

- **Error**

$$e = ST - (SA + SB + SC + SD)$$

$$e = 1,075 - (0,233 + 0,061 + 0,371 + 0,029)$$

$$e = 0,379$$

SA, SB, SC, SD : Varianza de cada factor

- **Error de varianza**

$$Ve = \frac{Se}{DFe} = \frac{0,379}{18} = 0,021$$

- **Prueba F**

$$VF = \frac{VA}{Ve} = \frac{0,117}{0,021} = 5,571$$

- **Porcentaje de influencia**

$$\%P = \frac{SA \times 100}{ST} = \frac{0,233 \times 100}{1,075} = 21,684$$

Tabla 3.4 Resultados método Anova de superficies cóncavas.

Fuente	DF	S	V	Valor F	%P
Estrategia (A)	2	0,233	0,117	5,571	21,684
RPM (B)	2	0,061	0,031	1,476	5,677
Avance (C)	2	0,371	0,186	8,857	34,527
Paso (D)	2	0,029	0,014	0,667	2,699
Error	18	0,379	0,021		35,414
ST (total)	26	1,075			100

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

La **Tabla 3.4** muestra los valores F calculados de cada factor en superficies cóncavas, para realizar la prueba de hipótesis estadística, se verifica que los factores más influyentes en el proceso de mecanizado son la estrategia y el avance.

Tabla 3.5 Evaluación de la media de cada nivel según el factor en superficies cóncavas.

Nivel	A	B	C	D
1	0,672	0,475	0,705	0,497
2	0,488	0,585	0,478	0,575
3	0,463	0,563	0,439	0,551
Variación	0,209	0,111	0,266	0,078
Rango	2	3	1	4
Promedio	0,541			

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

$$\text{Variación} = \text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}$$

$$\text{Variación} = 0,672 - 0,463 = 0,209$$

La **Tabla 3.5** permite verificar los factores influyentes en el mecanizado, en las superficies cóncavas los factores más influyentes son el avance y la estrategia, mientras que los menos influyentes son las RPM y el paso, lo cual concuerda con la **Tabla 3.4** de valores porcentuales.

3.2. Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis es un análisis que permite verificar una afirmación acerca de una población o de una muestra, enunciando si la hipótesis es nula o caso contrario es una hipótesis alternativa, en base a los datos de la población se puede aceptar o rechazar cada una de las hipótesis.

3.2.1. Hipótesis nula (H_0)

La hipótesis nula determina que los parámetros de la población o una muestra cumplan con el rango establecido en la población. Esta hipótesis asegura que en toda la población no existan diferencias.

3.2.2. Hipótesis alternativa (H_1)

La hipótesis alternativa es lo opuesto a la hipótesis nula, visualiza un cambio existente en la población que el investigador espera probar sea verdadera.

3.3. Prueba de hipótesis para superficies cóncavas

Para validar los parámetros establecidos en la **Tabla 3.4**, se realiza una prueba de hipótesis usando el Valor F de cada parámetro, verificando si se acepta o rechaza cada hipótesis usando la **Tabla 3.6**.

Tabla 3.6 Distribución f (95% de confianza) [31, p. 284]

Tabla - F $F_{.05}(f_1, f_2)$, 95% confianza

f_1 = Número de grados de libertad del numerador
 f_2 = Número de grados de libertad del denominador

f_2	f_1	1	2	3	4	5	6
1		161,450	199,500	215,710	224,580	230,160	233,990
2		18,513	19,000	19,614	19,247	19,296	19,330
3		10,128	9,552	9,277	9,117	9,014	8,941
4		7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163
5		6,608	5,786	5,410	5,192	5,050	4,950
6		5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,283
7		5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866
8		5,318	4,459	4,066	3,838	3,688	3,581
9		5,117	4,257	3,863	3,633	3,482	3,374
10		4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217
11		4,845	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095
12		4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996
13		4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915
14		4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848
15		4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,791
16		4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741
17		4,451	3,592	3,197	2,965	2,810	2,699
18		4,414	3,555	3,160	2,928	2,773	2,661

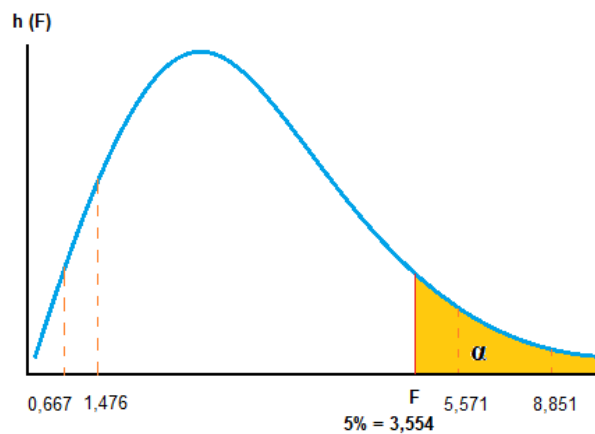


Figura. 3.14 Prueba de hipótesis para superficies cóncavas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

El valor F del factor A (Estrategia) es $VF(0,05:2:18) = 3,55$; en la **Figura. 3.14** se observa que el valor F tabulado es mayor al valor F calculado 5,57 existiendo una diferencia estadística significativa, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

El valor F del factor B (RPM) es $VF(0,05:2:18) = 3,55$; **Figura. 3.14** se observa que el valor F tabulado es menor al valor F calculado 1,476; no existe una diferencia estadística significativa, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula.

El valor F del factor C (Avance) es $VF(0,05:2:18) = 3,55$; **Figura. 3.14** se observa que el valor F tabulado es mayor al valor F calculado 8,857 existiendo una diferencia estadística significativa, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

El valor F del factor D (Paso) es $VF(0,05:2:18) = 3,55$; **Figura. 3.14** se observa que el valor F tabulado es menor al valor F calculado 0,667; no existe una diferencia estadística significativa, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula.

3.4. Prueba de hipótesis para superficies convexas

Tabla 3.7 Resultados método Anova de superficies convexas.

Fuente	DF	S	V	Valor F	%P
Trayectoria	2	0,027	0,013	0,929	6,185
RPM	2	0,004	0,002	0,143	0,916
Avance	2	0,009	0,004	0,286	2,062
Paso	2	0,148	0,074	5,286	33,902
Error	18	0,248	0,014		56,935
ST (total)	26	0,436			100

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

La **Tabla 3.7** muestra los valores F calculados de cada uno de los factores en superficies convexas para realizar la prueba de hipótesis estadística.

Tabla 3.8 Evaluación de la media de cada nivel según el factor en superficies convexas.

Nivel	A	B	C	D
1	0,559	0,528	0,539	0,438
2	0,488	0,520	0,511	0,493
3	0,498	0,498	0,496	0,615
Variación	0,071	0,031	0,043	0,177
Rango	2	4	3	1
Promedio	0,515			

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

La **Tabla 3.7** permite verificar los factores influyentes en el mecanizado, en las superficies convexas el factor más influyente es el paso, mientras que los menos influyentes son las RPM, estrategia y el avance, lo cual concuerda con la **Tabla 3.8** de valores porcentuales.

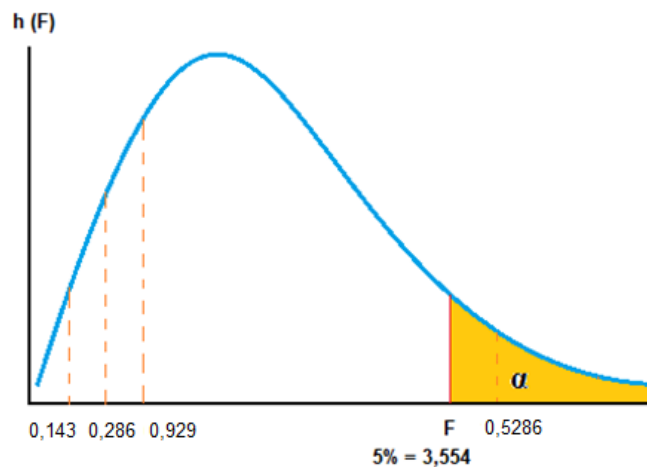


Figura. 3.15 Prueba de hipótesis para superficies convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

El valor F del factor A (Trayectoria) es $VF(0,05;2;18) = 3,55$; en la **Figura. 3.15** se observa que el valor F tabulado es menor al valor F calculado 0,929; no existe una diferencia estadística significativa, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula.

El valor F del factor B (RPM) es $VF(0,05:2:18) = 3,55$; en la **Figura. 3.15** se observa que el valor F tabulado es menor al valor F calculado 0,143; no existe una diferencia estadística significativa, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula.

El valor F del factor C (Avance) es $VF(0,05:2:18) = 3,55$; en la **Figura. 3.15** se observa que el valor F tabulado es menor al valor F calculado 0,286; no existe una diferencia estadística significativa, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula.

El valor F del factor D (Paso) es $VF(0,05:2:18) = 3,55$; en la **Figura. 3.15** se observa que el valor F tabulado es mayor al valor F calculado 5,286 existiendo una diferencia estadística significativa, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

Tabla 3.9 Valores porcentuales de factores más incidentes en el mecanizado

Factores	Cóncava	Convexa
Estrategia (A)	21,68%	-
RPM (rev/min) (B)	-	-
Avance (mm/min) (C)	34,52%	-
Paso (mm) (D)	-	33,902%

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

En la **Tabla 3.9** se verifica los valores porcentuales de los factores que más inciden en el mecanizado de superficies cóncavas y convexas, como se observa los factores más incidentes en el mecanizado de superficies cóncavas son la estrategia y el avance, mientras que el factor más incidente en el mecanizado de superficies convexas es el paso.

3.5. Predicción para la optimización de la rugosidad superficial

Con ayuda del método Anova se puede verificar los niveles óptimos para cada factor, obteniéndose el nivel apropiado de cada factor, optimizando el parámetro de rugosidad.

En la **Figura. 3.16** se verifica los niveles óptimos de cada factor en superficies cóncavas, con dos factores que influyen significativamente en el experimento, son la estrategia (A) y el avance (C). Para obtener una rugosidad óptima en superficies cóncavas se selecciona los siguientes factores y niveles; Estrategia (A) = Morphep Spiral, RPM (B) = 10000 rev/min, Avance (C) = 1600 mm/min, Paso (D) = 0,03 mm.

En la **Figura. 3.17** se verifica los niveles óptimos de cada factor en superficies convexas, con un factor que influye significativamente en el experimento, es el Paso (D). Para obtener una rugosidad óptima en superficies convexas se selecciona los siguientes factores y niveles; Estrategia (A) = Scallop, RPM (B) = 8000 rev/min, Avance (C) = 1600 mm/min, Paso (D) = 0,03 mm.

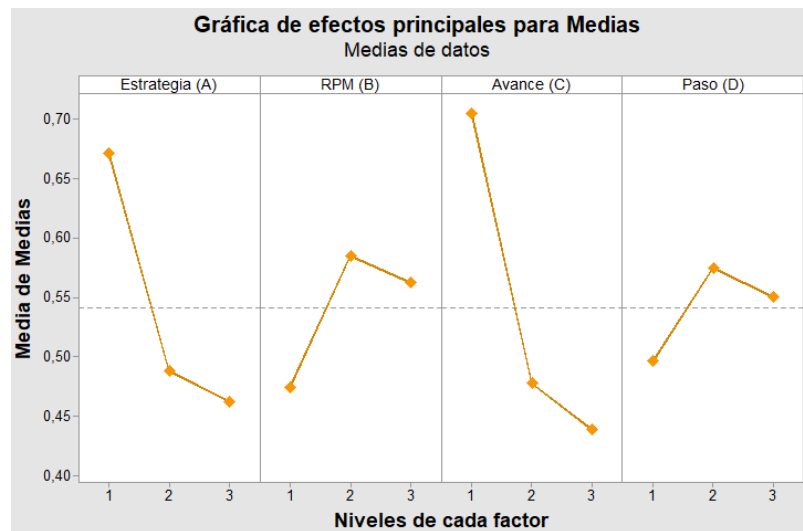


Figura. 3.16 Niveles óptimos de cada factor para superficies cóncavas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

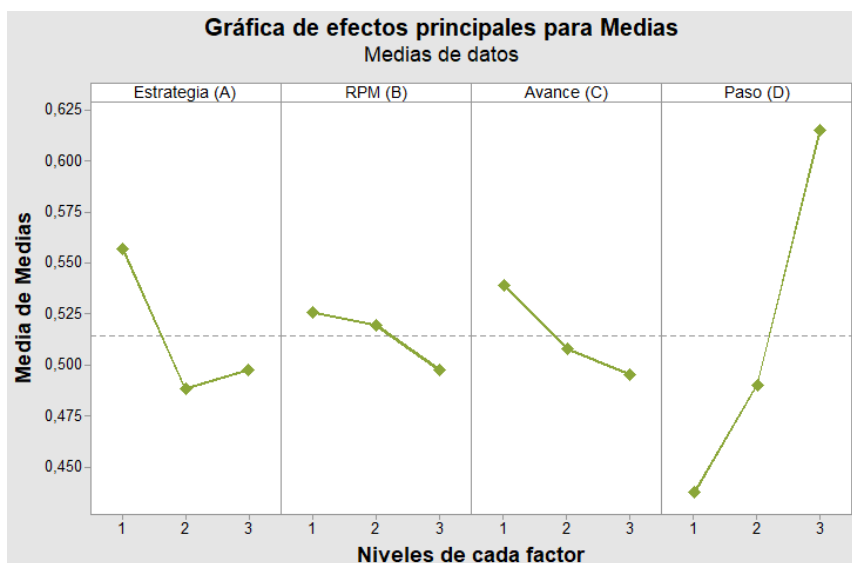


Figura. 3.17 Niveles óptimos de cada factor para superficies convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

3.5.1. Resultados de mecanizado

En la **Tabla 3.10** y **Tabla 3.11** se verifica la menor rugosidad obtenida en el mecanizado de superficies cóncavas y convexas respectivamente.

Tabla 3.10 Menor rugosidad en superficies cóncavas

N° Prueba	(A) Estrategia	(B) RPM (rev/min)	(C) Avance (mm/min)	(D) Paso (mm)	R1 (µm)	R2 (µm)	R3 (µm)	R promedio (µm)
21	Morphed Spiral	10000	1600	0,07	0,280	0,293	0,277	0,283

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

Tabla 3.11 Menor rugosidad en superficies convexas

N° Prueba	(A) Estrategia	(B) RPM (rev/min)	(C) Avance (mm/min)	(D) Paso (mm)	R1 (µm)	R2 (µm)	R3 (µm)	R Promedio (µm)
2	Parallel	10000	1800	0,07	0,280	0,284	0,286	0,283

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

En base al método Taguchi, los datos obtenidos en la **Tabla 3.10** y **Tabla 3.11** puede mejorarse la calidad superficial obteniéndose una rugosidad óptima mediante la ecuación 3.7:

$$R_{\text{óptima}} = A_1 + B_1 + C_1 + D_1 - 3 \times R_{\text{promedio}} \quad [30] \quad (3.7)$$

Donde:

A_1, B_1, C_1, D_1 : Valor medio menor de cada factor

R_{promedio} : Media total de rugosidad

La **Tabla 3.5** y **Tabla 3.8** muestran el valor medio de cada factor y sus niveles para superficies cóncavas y convexas.

$$R_{\text{ÓptimaTeórico(Cóncava)}} = 0,463 + 0,475 + 0,439 + 0,497 - 3 \times 0,541 = 0,251 \mu m$$

$$R_{\text{ÓptimaTeórico(Convexa)}} = 0,488 + 0,498 + 0,496 + 0,438 - 3 \times 0,515 = 0,375 \mu m$$

El último paso es calcular el intervalo de confianza (CI) que permite verificar un rango óptimo de rugosidad mediante la ecuación 3.8:

$$CI = \sqrt{F(1, DFe) \times Ve \times \left[\frac{1}{neff} + \frac{1}{Rp} \right]} \quad [30] \quad (3.8)$$

Donde:

DFe : Grados de libertad del error

Ve : Varianza del error

$neff$: Número efectivo de repeticiones

Rp : Número de repeticiones

Para el cálculo de los grados de libertad del error se toma los valores de la **Tabla 3.6** donde $F(1, 18) = 4,4139$, $Ve = 0,021$, $Ve = 0,014$ para superficies cóncavas y convexas respectivamente y $Rp = 3$ para cada superficie.

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad [30]$$

N : Número total de pruebas

V_t : Grados de libertad en relación a los factores que influyen en el mecanizado.

$$n_{eff\ concavas} = \frac{27}{1 + 4} = 5,4$$

$$n_{eff\ convexas} = \frac{27}{1 + 2} = 9$$

$$CI_{concavo} = \sqrt{4,4139 \times 0,021 \times \left[\frac{1}{5,4} + \frac{1}{3} \right]} = 0,22$$

$$CI_{convexa} = \sqrt{4,4139 \times 0,014 \times \left[\frac{1}{9} + \frac{1}{3} \right]} = 0,165$$

Se obtiene el valor de una rugosidad óptima teórica para superficies curvas:

$$R_{\text{ÓptimaTeórica}}(\text{cóncava}) = 0,251 \pm 0,22$$

$$R_{\text{ÓptimaTeórica}}(\text{convexa}) = 0,375 \pm 0,165$$

En la **Tabla 3.12** y **Tabla 3.13** se verifica el valor de rugosidad mejorada en superficies cóncavas y convexas, estos valores se encuentran en el rango establecido por el proceso de optimización asegurando la validez del estudio. Habiendo una mejora del 2,47 % para superficies cóncavas y 1,1% para superficies convexas.

Tabla 3.12 Valor de rugosidad mejorada en superficies cóncavas

N° Prueba	(A) Estrategia	(B) RPM (rev/min)	(C) Avance (mm/min)	(D) Paso (mm)	R1 (μm)	R2 (μm)	R3 (μm)	R Promedio (μm)
1	Morphep Spiral	10000	1600	0,03	0,270	0,282	0,278	0,276

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

Tabla 3.13 Valor de rugosidad mejorada en superficies convexas

N° Prueba	(A) Estrategia	(B) RPM (rev/min)	(C) Avance (mm/min)	(D) Paso (mm)	R1 (μm)	R2 (μm)	R3 (μm)	R Promedio (μm)
2	Scallop	8000	1600	0,03	0,279	0,280	0,281	0,280

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

Mediante la ecuación 2.4 se verifica el valor teórico de rugosidad óptimo en superficies cóncavas utilizando los valores de la **Tabla 3.12** se obtiene.

$$R_u = -2,49 + 0,00194 * C + 0,000204 * B$$

$$R_u = -2,49 + 0,00194 * 1600 + 0,000204 * 10000$$

$$R_u = 0,265 \mu m$$

Mediante la ecuación 2.6 se verifica el valor teórico de rugosidad óptima en superficies cóncavas utilizando los valores de la **Tabla 3.13** se obtiene.

$$R_u = 1,073 - 6,47 * D - 0,000353 * C + 0,00403 * D * C$$

$$R_u = 1,073 - 6,47 * 0,03 - 0,000353 * 1600 + 0,00403 * 1600 * 0,03$$

$$R_u = 0,507 \mu m$$

En la **Figura. 3.19** se verifica la microestructura de mecanizado en la probeta cóncava con rugosidad mejora usando los datos establecidos en la **Tabla 3.12**. La **Figura. 3.20** muestra la microestructura de mecanizado en la probeta convexa con rugosidad mejora usando los datos establecidos en la **Tabla 3.13**.

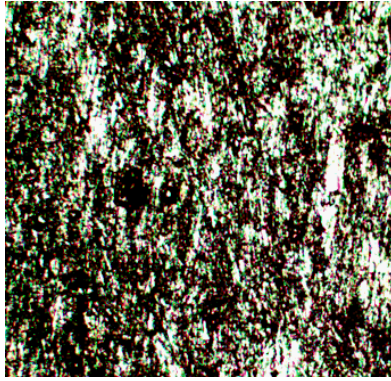


Figura. 3.18 Estructura microscópica sin mecanizar

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis

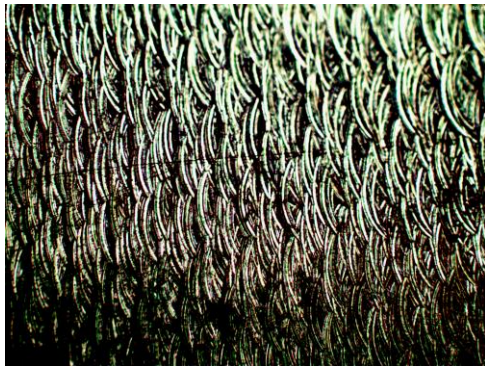


Figura. 3.19 Estructura microscópica probeta cóncava.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis



Figura. 3.20 Estructura microscópica probeta convexa.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

CONCLUSIONES

- El Aluminio EN-AW-7075 es muy utilizado en la industria metalmecánica para la elaboración de matrices de moldes plásticos por su resistencia a altas temperaturas, corrosión y buenas características al maquinarse, siendo utilizado a altas velocidades y avances de corte, con una profundidad radial menor a 0,1mm y profundidad axial menores a 0,07mm para poder obtener rugosidades bajas y mejores acabados superficiales.
- De acuerdo al método experimental *Taguchi* se determina que los valores de rugosidad más bajos son 0,283 μ m para superficies cóncavas y 0,263 μ m para superficies convexas, mediante el análisis ANOVA determina los valores influyentes en el mecanizado.
- En la parte experimental se determinó que las estrategias más adecuadas para este trabajo son Parallel, Scallop y Morphed Spiral en el Software Autodesk Inventor CAM actuando significativamente para obtener rugosidades bajas, de esta manera se evidenció que para las superficies cóncavas y convexas las estrategias más influyentes son Morphed Spiral y Scallop respectivamente.
- En las superficies cóncavas el avance y la trayectoria influyen significativamente en un 34,52% y 21,68%, respectivamente para obtener rugosidades de alta calidad, mientras que los factores menos influyentes en el mecanizado son las rev/min y el paso con un 5,6% y 2,6%, respectivamente como se aprecia en la **Tabla 3.4** mediante el análisis ANOVA. En las superficies convexas el paso que influye significativamente en un 33,902%, mientras que los factores menos influyentes en el mecanizado son las trayectorias avance y rev/min con un 5,6%, 2,017% y 0,89%, respectivamente como se aprecia en la **Tabla 3.7** mediante el análisis ANOVA.

- Los Métodos estadísticos *Taguchi* y *ANOVA* son herramientas fundamentales para la mejora de un proceso, considerando factores dependientes con sus respectivos niveles, adecuándose a un modelo ortogonal establecido por factores y niveles que busca encontrar un valor mejorado con un rango de error para la confiabilidad del proceso.
- En base al método estadístico *Taguchi* se obtiene una rugosidad óptima teórica de $0,251\mu\text{m}$ y $0,375\mu\text{m}$ para superficies cóncavas y convexas con un rango de confiabilidad de 0,22 y 0,65 respectivamente.
- Se determinó que para las superficies cóncavas la estrategia y los parámetros que mejoran la calidad superficial son: Trayectoria Morphed Spiral, 10000 RPM, Velocidad de corte de 2000 mm/min, paso de 0,03 mm y una profundidad de 0,2 mm obteniendo una rugosidad mejorada de $0,276\mu\text{m}$ mejorando en un 2,47% el acabado superficial. Se determinó que para las superficies convexas la estrategia y los parámetros que mejoran la calidad superficial son: Trayectoria Scallop, 8000 RPM, Velocidad de corte de 1600 mm/min, paso de 0,03 mm y una profundidad de 0,2 mm obteniendo una rugosidad mejorada de $0,280\mu\text{m}$ mejorando en un 1,1% el acabado superficial.
- La rugosidad teórica mejorada para superficies cóncavas usando la Ecuación 3.3 se obtiene $0,265\mu\text{m}$, comparadas con la experimental de $0,251\pm 0,22\mu\text{m}$, se tiene una variación de error de 5,28 % el cual se encuentra en los límites de confiabilidad asegurando la validez del estudio. La rugosidad teórica mejorada para superficies convexas usando la Ecuación 3.5 se obtiene $0,507\mu\text{m}$, comparadas con la experimental de $0,375\pm 0,165\mu\text{m}$, se tiene una variación de error de 26,035% el cual se encuentra en los límites de confiabilidad asegurando la validez del estudio.

RECOMENDACIONES

- Para un estudio de superficies curvas en un centro de mecanizado 3 ejes es importante tomar en cuenta el radio de curvatura en la probeta, por estar directamente relacionados con el diámetro efectivo de la herramienta debido a que son inversamente proporcionales, y pueden afectar el acabado superficial de la probeta.
- Para poder obtener mejores rugosidades se recomienda trabajar con velocidades de corte mayores a las realizadas en este estudio debido a que puede mejorar el acabado superficial, para obtener rugosidades bajas.
- Es importante realizar estudios sobre el desgaste de la herramienta debido a que puede afectar directamente al acabado superficial y rugosidad en las estrategias que se trabajen posteriormente.
- Hacer un estudio de la eficiencia del refrigerante en los procesos de mecanizado para determinar su afectación en el acabado superficial.
- Se recomienda hacer un estudio de la influencia de las fuerzas de corte en el mecanizado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. I. P. C. N. G. K. Senthil, «Study of the constitutive behavior of 7075-T651 aluminum alloy,» *International Journal of Impact Engineering*, vol. II, n° 108, pp. 171-190, 2017.
- [2] Nunes y R. , *Metals HandBook VOL 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, EEUU: ASM International, 2004.
- [3] T. Aaron, «Machining,» *ASM HANDBOOK*, vol. 16, n° 9, pp. 1-12, 1989.
- [4] T. Moriwaki, «Multi-functional machine tool,» *CIRP Ann. - Manuf. Technol*, vol. 57, n° 2, pp. 736-749, 2008.
- [5] R. L. y. Y. Koren, «Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces,» *Trans. ASME*, vol. 118, 1996.
- [6] S. Radzevich, « Kinematic Geometry of Surface Machining,» *Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis Group*, p. 508, 2008.
- [7] A. Mura, « Optimization of Process Parameters with Minimum Surface Roughness in the Pocket Machining of AA5083 Aluminum Alloy via Taguchi Method,» *Arab Journal of Science and Engineering*, n° 38, pp. 705-7014, 2013.
- [8] Y.-K. H. M.-S. C. Jenq-Shyong Chen, «A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process,» *International Journal of Machine tools and Manufacture.*, n° 45, p. 1077–1084, 2005.
- [9] M. Groover, «Fundamentals of modern manufacturing: materials processes and systems,» *Society of manufacturing engineers*, vol. II, 2004.
- [10] J. C. J. R. G. Quintana, « Surface roughness generation and material removal rate in ball end milling operations,» *Materials and Manufacturing Processes*, vol. I, n° 25, pp. 386-398, 2010.
- [11] J. Yang y J. Chen, «A systematic approach for identifying optimum surface roughness in finish milling operations,» *Technol*, vol. II, n° 15, pp. 76-84, 2001.
- [12] P. S. a. R. Pinner, «The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and Its Alloys,» pp. 1-10, 2001.
- [13] «ALACERMAS,» 02 Junio 2013. [En línea]. Available: http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_7075_aluminio.pdf. [Último acceso: 30 Marzo 2017].

- [14] N. B. V. T. A. Attar, «Manufacturing in blow molding: Time reduction,» *journal of materials processing technology* 204, pp. 284-289, 2008.
- [15] MACHINING, TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK, EEUU: McGraw-Hill, 1959.
- [16] A. SpecialReport 702, «Machining of Aluminum and Aluminum Alloys,» *ASM HANDBOOK*, vol. XVI, p. 44, 1978.
- [17] A. Lasemi, P. Gu y D. Xue, «Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review,» *Computer-Aided Design ELSEVIER*, n° 42, p. 641–654, 2010.
- [18] H. T. F. O. S. S. Bernard W. Ikua, «Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces -I theoretical analysis,» *Precision Engineering, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology ELSEVIER*, vol. II, n° 25, pp. 266-273, 2001.
- [19] Y.-K. H. M.-S. C. Jenq-Shyong Chen, «A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, n° 45, p. 1077–1084, 2005.
- [20] A. D. A. M. D. D. M. Fontaine, «Predictive force model for ball-end milling and experimental validation with a wavelike form machining test,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , n° 46, p. 367–380, 2006.
- [21] DORMER, «Technical Handbook,» *INNOVATION STARTS*, pp. 1-148.
- [22] SANDVIK, «SANDVIK COROMANT,» 26 MARZO 2016. [En línea]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas. [Último acceso: 09 JUNIO 2017].
- [23] Y. K. Rong-Shine Lin, «Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces,» *Department of MEAM*, , vol. 118, pp. 20-28, 1996.
- [24] Wordpress, «Lenguaje de Ingenieria,» 05 Febrero 2013. [En línea]. Available: <https://lenguajedeingenieria.files.wordpress.com/2013/02/introduccion-al-cad-cam.pdf>. [Último acceso: 12 03 2017].
- [25] A. H. Comite, *ASM Handbook Volume 16 - Machining*, EEUU: ASM International, 2005.
- [26] D. J. C. C. & D. C. M. L. Dr. Mike S. Lou, «Surface Roughness Prediction Technique For CNC End-Milling,» *Journal of Industrial Technology*, vol. 15, n° 1, 1998.

- [27] G. F. D. S. F. Q. Elssawi Yahya, «Optimization of Machining Parameters Based on Surface Roughness Prediction for AA6061 Using Response Surface Method,» *American Journal of Science and Technology*, vol. 2, n° 5, pp. 220-231, 2015.
- [28] D.-H. Lee, «3-Dimensional profile distortion measured by stylus type surface profilometer,» *Measurement*, n° 46, pp. 803-814, 2013.
- [29] Soraya, «Microsoft PowerPoint - T17 - Metrología del acabado superficial.ppt,» 08 07 2013. [En línea]. Available: http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/745_ca.pdf. [Último acceso: 10 04 2017].
- [30] A. M. Pinar, «Optimization of Process Parameters with Minimum Surface Roughness in the Pocket Machining of AA5083 Aluminum Alloy via Taguchi Method,» *Arab J Sci Eng*, n° 38, p. 705–714, 2013.
- [31] R. K. Roy, *A PRIMER ON THE TAGUCHI METHOD*, EEUU, 2010.
- [32] M. E. MAIER, «EMCO Concept Mill 260, Centro de Mecanizado vertical controlado por PC,» vol. II, n° 1, pp. 1-82, 2015.
- [33] MITUTOYO, «Direct Industry,» 23 Julio 2015. [En línea]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/mitutoyo/product-4906-12095.html>. [Último acceso: 22 Octubre 22].
- [34] M. SJ-210, «Portable Surface Roughness Tester,» 01 Marzo 2014. [En línea]. Available: <https://www.inspec-inc.com/docs/default-source/individual-equipment-brochures/surftest-sj-210.pdf?sfvrsn=2>. [Último acceso: 22 Octubre 2017].
- [35] H. T.-C. & MFG, «HTC MASTER CATALOG,» 18 Agosto 2014. [En línea]. Available: <http://www.htcmfg.com/htccatalog2015/13699EA4878413FE3900F694FCE4D50F/HTC%202014%20MASTER%20CATALOG.pdf>. [Último acceso: 26 Octubre 2017].
- [36] A. I. HSM, «Take control of your manufacturing,» 19 Mayo 2015. [En línea]. Available: https://www.cadstudio.cz/dl/Inventor_HSM_Brochure.pdf. [Último acceso: 29 Octubre 2017].
- [37] A. Inventor, «Inventor HSM Pro,» 10 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://www.asidek.es/inventor-hsm-pro-la-solucion-de-cad-cam/>. [Último acceso: 23 Octubre 2017].
- [38] A. L. Mentxaka, «FABRICACIÓN ASISTIDA POR ORDENADOR,» 14 Marzo 2011 . [En línea]. Available:

http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/24_ca.pdf. [Último acceso: 29 Octubre 2017].

- [39] A. I. HSM, «AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK,» 23 Agosto 2017. [En línea]. Available:
<http://help.autodesk.com/view/INVHSM/2018/ENU/?guid=GUID-16189902-F8F4-4854-BEE6-46E49F5671E0>. [Último acceso: 29 Octubre 2017].
- [40] J. A. A. S. A. Rafael Nunes, «Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special- Purpose Material,» *ASM HANDBOOK*, vol. II, n° 104, pp. 17-23, 1992.

ANEXO 1:



Fotografía: Mecanizado de superficies cóncavas y convexas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

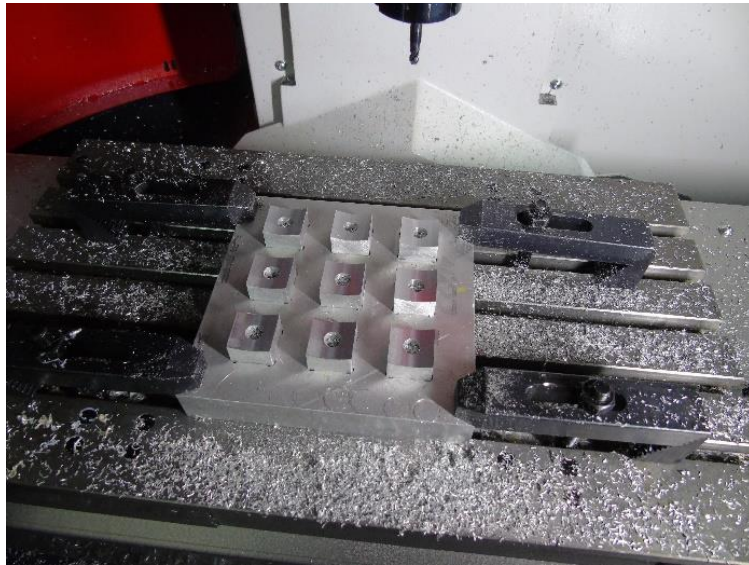
ANEXO 2:



Fotografía: Medición de rugosidades.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

ANEXO 3:



Fotografía: Mecanizado de superficies curvas.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

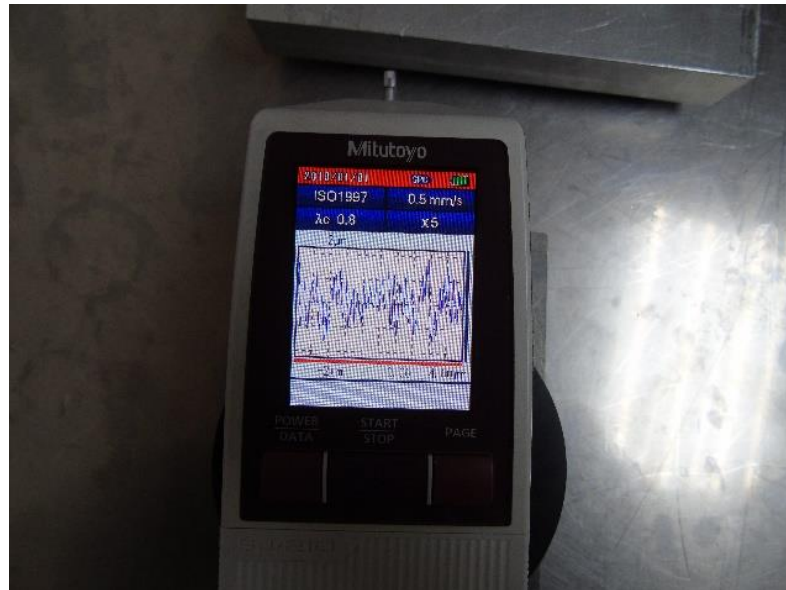
ANEXO 4:



Fotografía: Superficies convexas

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

ANEXO 5:



Fotografía: Rugosímetro marca Mitutoyo.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.

ANEXO 6:



Fotografía: Equipo de mecanizado marca EMCO.

Fuente: Juan Chanataxi y Richard Villacis.