



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA.**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA.

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.**

TEMA:

**RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CORTE Y
RUGOSIDAD EN OPERACIONES DE ACABADO PARA
SUPERFICIES CÓNCAVAS Y CONVEXAS PARA ALUMINIO
EN-AW-7075 APLICANDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI**

AUTOR: CASTRO VERA KLEBER LEONARDO

DIRECTOR: ING. SEGURA SANGUCHO LUIS JAVIER.

SANGOLQUÍ- ECUADOR

2016



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: "RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CORTE Y RUGOSIDAD EN OPERACIONES DE ACABADO PARA SUPERFICIES CÓNCAVAS Y CONVEXAS PARA ALUMINIO EN-AW-7075 APLICANDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI", realizado por el señor Kleber Leonardo Castro Vera, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio PlagScan, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la " Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ", por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor Kleber Leonardo Castro Vera, para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 22/08/16.

Anexo: Hojas de verificación

Ing. Luis Segura.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo Kleber Leonardo Castro Vera, con cédula de identidad N° 1715685945, declaro que este trabajo de titulación 'RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CORTE Y RUGOSIDAD EN OPERACIONES DE ACABADO PARA SUPERFICIES CÓNCAVAS Y CONVEXAS PARA ALUMINIO EN-AW-7075 APLICANDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI' ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangoquí, 28/ 07/2016

Kleber Leonardo Castro Vera

CI: 1715685945



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo **Kleber Leonardo Castro Vera**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación, "**RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CORTE Y RUGOSIDAD EN OPERACIONES DE ACABADO PARA SUPERFICIES CÓNCAVAS Y CONVEXAS PARA ALUMINIO EN-AW-7075 APLICANDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI**" cuyo contenido ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 24/08/2016

Kleber Leonardo Castro Vera

Ci: 1715685945

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CORTE Y RUGOSIDAD EN OPERACIONES DE ACABADO PARA SUPERFICIES CÓNCAVAS Y CONVEXAS PARA ALUMINIO EN-AW-7075 APLICANDO LA METODOLOGÍA TAGUCHI”

ELABORADO POR:



Kleber Castro

Sangoiquí, 24 de agosto del 2016

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a las personas más importantes en mi vida, mis padres Mercy Vera y Klever Castro que con su amor y esfuerzo me impulsaron a culminar mi carrera con éxito y son mi ejemplo de vida a seguir.

KLEBER CASTRO

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas por el apoyo en la investigación.

Agradecimiento al Laboratorio de Procesos de Manufactura, quién facilitó la maquinaria para el desarrollo de este trabajo de grado.

Al Ingeniero Luis Segura, por la dirección del trabajo de investigación y el esfuerzo dedicado a realizar este trabajo.

Al PhD. Jorge Lino, profesor de la Universidad de Porto, por la dirección del trabajo de investigación.

Al Jefe de laboratorio de Metrología, Ing. Emilio Tumipamba y laboratorista Lcd.Edwin Tayupanta, por los servicios de medición realizados a las probetas mecanizadas.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	III
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	IV
AUTORIZACIÓN.....	V
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
AGRADECIMIENTO.....	VIII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABLAS.....	XV
NOMENCLATURA.....	XVI
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XVIII
CAPÍTULO 1 : GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.3. OBJETIVOS	1
1.3.1. GENERAL.....	2
1.3.2. ESPECÍFICOS.....	2
1.4. ALCANCE.....	2
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.	2
CAPÍTULO 2 : ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	3
2.1. ALUMINIO.	3
2.1.1. PROPIEDADES ALUMINIO EN-AW-7075.....	3
2.1.2. DUREZA BRINELL.....	4
2.2. MECANIZADO.	7
2.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES EN EL MECANIZADO.	8
2.2.1.2. Geometría inicial.....	8
2.2.1.3. Proceso específico de mecanizado.....	8
2.2.1.4. Proceso de formación de viruta.	8
2.2.1.5. Maquinado abrasivo.	9
2.2.1.6. Herramientas de corte.	9
2.2.1.7. Parámetros de corte.	9
2.2.1.8. Geometría de la herramienta.....	10
2.2.1.9. Fluido de corte.....	10

2.2.2.	VARIABLES DEPENDIENTES.....	10
2.2.2.1.	Fuerza de corte y potencia.....	11
2.2.2.2.	Medida y propiedades del producto terminado.....	11
2.2.2.3.	Acabado superficial.....	11
2.2.2.4.	Desgaste y falla de la herramienta de corte.	12
2.2.2.5.	Chatter (Traqueteo).	12
2.3.	MECANIZADO DEL ALUMINIO	13
2.3.1.	TEMPERATURA DE CORTE.....	13
2.3.2.	FUERZAS DE CORTE AL MECANIZAR EL ALUMINIO.	14
2.4.	FRESADO	14
2.4.1.	VELOCIDAD DEL HUSILLO, VELOCIDAD DE CORTE Y DIÁMETRO DE LA FRESA.	15
2.4.2.	AVANCE, NÚMERO DE DIENTES Y VELOCIDAD DEL HUSILLO.....	16
2.4.3.	OPERACIONES DE FRESADO	17
2.4.4.	FRESADO RADIAL.	18
2.5.	PARÁMETROS DE FRESADO EN EL MECANIZADO DEL AL.	21
2.5.1.	VELOCIDAD DE CORTE Y AVANCE PARA EL ALUMINIO AW- EN-7075.....	21
2.5.2.	PROFUNDIDAD DE CORTE.	25
2.5.3.	PROFUNDIDAD RADIAL DE CORTE.....	26
2.6.	ACABADO SUPERFICIAL.....	26
2.6.1.	RUGOSIDAD SUPERFICIAL PRODUCIDA EN EL PROCESO DE MANUFACTURA.	30
2.6.2.	RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y TOLERANCIAS DIMENSIONALES.....	31
2.6.3.	GRÁFICAS DE RUGOSIDAD EN EL FRESADO DE ACABADO. .	32
2.7.	SUPERFICIES CURVAS O LIBRES	33
2.8.	GENERACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE.....	35
2.9.	PARÁMETROS DE LA TRAYECTORIA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE.....	36
2.9.1.	MAQUINADO CON ESTRATEGIA PARALELA.	37
2.9.2.	MECANIZADO SCALLOP.....	38
2.9.3.	PARÁMETROS DE LA TRAYECTORIA DE MECANIZADO.....	39
CAPÍTULO 3 : APLICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE MATERIALES Y HERRAMIENTAS.....		42
3.1.	APLICACIÓN.....	42
3.2.	DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE.....	43

3.2.1.	TEMPERATURA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE EN LA ZONA DE DESGASTE.....	43
3.3.	HERRAMIENTA DE PUNTA ESFÉRICA.	45
3.4.	FRESA NO INCLINADA, FRENTE A FRESA INCLINADA.....	47
3.5.	HERRAMIENTA DE CORTE.	49
3.6.	FLUIDO DE CORTE.	49
3.7.	MECANIZADO DE SUPERFICIES CÓNCAVAS Y CONVEXAS.....	51
3.8.	TRAYECTORIA DE MECANIZADO.....	53
3.9.	INTEGRIDAD SUPERFICIAL.....	53
3.10.	FORMACIÓN DE VIRUTA.	54
3.11.	MECANIZADO CON HERRAMIENTA DE PUNTA ESFÉRICA.....	55
3.12.	METROLOGÍA.....	57
3.13.	MÉTODO TAGUCHI.	59
3.13.1.	VARIABLES Y FACTORES PARA EL METODO TAGUCHI.....	60
3.13.2.	EJEMPLO DE CÁLCULO.	62
3.13.3.	APLICACIÓN DEL MÉTODO TAGUCHI.....	63
	CAPÍTULO 4 : MAQUINADO	68
4.1.	MATERIALES	68
4.1.1	MAQUINARIA.....	68
4.2	HERRAMIENTA.....	71
4.3	MÉTODOS.....	74
4.4	SIEMENS NX.....	75
4.4.1.	CAPACIDADES AVANZADAS DE PROGRAMACIÓN	76
4.5.	PROGRAMACIÓN DEL MAQUINADO EN NX.....	77
4.6.	MAQUINADO DE LAS PROBETAS	79
4.7.	ANOVA.	82
4.8.	PREDICCIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL ÓPTIMA.	94
4.10.	RESULTADOS	96
	CAPÍTULO 5 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
5.1.	CONCLUSIONES.	99
5.2.	RECOMENDACIONES.	101
6.	REFERENCIAS.....	102

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Símbolos que describen la dureza brinell.	5
Figura 2. Medición dureza brinell, aleación de aluminio 7075.	6
Figura 3. Fresado en centro de mecanizado vertical FANUC 3016	14
Figura 4. Velocidad de la herramienta de corte y geometría de la fresa.	15
Figura 5. Avance número de dientes y velocidad del husillo.	16
Figura 6. Operaciones de Fresado.	18
Figura 7. Fresado radial en Aluminio 7075.	18
Figura 8. Esquema de los principales parámetros que influyen en el fresado radial.	20
Figura 9. Altura del vértice (scallop).....	20
Figura 10. Profundidad de corte radial y axial.....	25
Figura 11. Procesos para un acabado.	27
Figura 12. Esquema de la rugosidad y ondulaciones en una superficie, en una dirección y altura de ondulación.....	28
Figura 13. Medida aritmética Ra.	29
Figura 14. Acabado superficial en modelos de fresado con herramientas de punta redonda.	30
Figura 15. Influencia de la velocidad de corte en función de los parámetros de rugosidad.	33
Figura 16. Mecanizado de superficies libres, molde cuchara.	33
Figura 17. Interferencia en el maquinado, (a) Local (b) Posterior (c) Global.....	34
Figura 18. Trayectoria de la herramienta de corte para el mecanizado en una superficie convexa.	36
Figura 19. Tipos de trayectorias.....	37
Figura 20. Tipos de recorrido de herramienta (a) Dirección paralela (b) Espiral (c) Curvas adaptivas.	38
Figura 21. Estrategia de mecanizado-Scallop.	38
Figura 22. Recorrido e intervalos de avance en el mecanizado con una herramienta de corte de punta esférica.....	39
Figura 23. Ejemplo de aplicación de superficies libres molde de cucharas. 42	
Figura 24. Material de herramientas de corte, esfuerzo como función de la temperatura. Acero rápido, tungsteno y carbono.	44
Figura 25. Contacto parcial del filo de corte de una herramienta de punta esférica.	45
Figura 26. Mecanizado de una superficie cóncava con herramienta de punta esférica en dirección transversal.....	46
Figura 27. Mecanizado de una superficie convexa con herramienta de punta esférica en dirección transversal.....	47
Figura 28. Fresado tridimensional, fresa inclinada.....	48
Figura 29. Fresado tridimensional, fresa inclinada.....	48
Figura 30. Aplicación de refrigerante soluble oil D.....	51

Figura 31. Mecanizado de superficies libres en centro de mecanizado vertical 5 ejes.	52
Figura 32. Programación de trayectoria ZIG-ZAG , en probeta cóncava. ...	53
Figura 33. Filo de corte herramienta MASTERCUT de punta esférica.	56
Figura 34. Generación de mecanizado con punta esférica.	56
Figura 35 Laboratorio de metrología "Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE"	58
Figura 36. Aplicación del método Taguchi en las tres partes principales de un diseño.	60
Figura 37. Aplicación gráfica lineal del L27 AO.	65
Figura 38. FADAL VMC 3016.	69
Figura 39. Rugosímetro Taylor Surf	69
Figura 40. Esquema del proceso de medición.	71
Figura 41. Revestimiento.	73
Figura 42. Diseño de Probetas.	74
Figura 43. Patrón para comprobación de rugosímetro.	75
Figura 44. Siemens NX, modelado CAM.	76
Figura 45. Desbaste de perfil.	78
Figura 46. Desbaste de probetas.	78
Figura 47. Fresado de acabado.	78
Figura 48. Superficie cóncava mecanizada.	79
Figura 49 Superficie convexa mecanizada.	79
Figura 50. Medición de la rugosidad superficial.	82
Figura 51. Prueba gráfica de confirmación de hipótesis.	89
Figura 52. Distribución F.	89
Figura 53. Principales efectos de los factores para las probetas con superficie cóncava.	95
Figura 54. Principales efectos de los factores para las probetas con superficie convexa.	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Características mecánicas Aluminio EN-AW-7075.	4
Tabla 2	Composición química de los elementos aleados Aluminio EN-AW-7075.	7
Tabla 3	Velocidades y avance recomendado en proceso face milling, (planeado) de aleaciones ferrosas y no ferrosas con herramientas de acero rápido y carburo.	22
Tabla 4	Velocidades recomendadas y avance para slab milling (desbaste) de aleaciones ferrosas y no ferrosas con herramientas de acero rápido y carburo.	23
Tabla 5	Velocidades y avances para el fresado de acabado para el aluminio 7075 con herramientas de acero rápido y carburo.....	23
Tabla 6	Composición de herramientas de acero rápido.....	24
Tabla 7	Aplicación de herramientas de carburo.....	25
Tabla 8	Relación entre altura del vértice y rugosidad superficial.	26
Tabla 9.	Rugosidad superficial producida por diferentes métodos de producción. Los rangos que muestran son típicos de los procesos listados. Los altos y bajos valores se obtienen bajo condiciones especiales.	31
Tabla 10	Clasificación de acabado superficial.	32
Tabla 11	Guía de selección de fluidos para corte.	50
Tabla 12.	Materiales y herramientas.....	61
Tabla 13	Factores escogidos y sus niveles.	61
Tabla 14.	Selección de viruta por diente en función del diámetro de la herramienta y material.	63
Tabla 15	Arreglo ortogonal con factores e interrelaciones asignados a las columnas.....	66
Tabla 16	Combinación de niveles y factores para la superficie cóncava y convexa.....	67
Tabla 17	Datos técnicos principales FADAL VMC 3016.	68
Tabla 18	Valores de magnificación dependiendo del valor máximo de Ra.	70
Tabla 19	Valores de recorrido cut off dependiendo del valor de Ra.	70
Tabla 20.	Descripción de la herramienta de corte.....	72
Tabla 21.	Revestimiento Power A.....	72
Tabla 22.	Materiales óptimos para trabajar con la herramienta.	73
Tabla 23.	Valores de velocidad recomendada para aleaciones de aluminio.....	73
Tabla 24	Datos experimentales para superficies Cóncavas.	80
Tabla 25	Datos experimentales para superficies Convexas.	81
Tabla 26	ANOVA resultados de los datos de la superficie cóncava.	85
Tabla 27.	ANOVA resultados de los datos de la superficie convexa.	90
Tabla 28.	Tabla de evaluación de los niveles según sus factores para probetas de acabado cóncavo de los resultados.	91

Tabla 29. Tabla de evaluación de los niveles según sus factores para probetas de acabado convexo.	92
Tabla 30 F- Distribución (95% confianza).	93
Tabla 31. Resultados de influencia y porcentaje.	94

NOMENCALTURA

CNC: Control numérico computarizado	Zc: Número efectivo de dientes
CAD: Diseño asistido por computador	R: Radio de la herramienta de corte.
CAM: Manufactura asistida por computador	ap: Profundidad axial
CAE: Ingeniería asistida por computador.	ae: Profundidad radial
HB: Dureza brinell.	rpm: Revoluciones por minute.
HV: Dureza vickers.	HC: Altura de vértice
DH: Diámetro de bola en mm.	ISO: Sistema de estandarización internacional
FH: Es la carga aplicada en kgf.	mm: Milímetros
Dh: Diámetro medio de indentación en mm	in: Pulgadas
Pa: Pascales[N/m ²]	Ra: Rugosidad superficial promedio
HRC: Dureza rockwell	µm: micras de metro
N: Velocidad de rotación del husillo rpm	Df: Grados de libertad
Vc: Velocidad de corte (m/min)	C.F: Factor de corrección
Dc: Diámetro de herramienta (mm)	V: Varianza promedio de raíces
De: Diámetro efectivo (mm)	S: Suma de cuadrados.
Vf: Avance de mesa(mm/min)	E: Error
Fz: Avance por diente	F: prueba F.
Zn: Número de dientes de la fresa	

A: Velocidad de corte

B: Avance

C: Trayectoria

ATC: Cambiador
automático de
herramientas.

VMC: Centro de
mecanizado vertical.

W: Watt

Sfm: Surface feet per
minute

Rp: Suavizado profundo.

Ra: Rugosidad media.

CPU: Unidad central de
procesamiento

D: Profundidad de corte

N: grados totales de
libertad.

Min: minutos.

CSB: Punto cero de
pieza.

H0: Hipótesis nula.

H1: Hipótesis alternativa.

ASTM: American Society
for testing materials.

Wt: porcentaje de peso.

RESUMEN

Este estudio describe la metodología para optimizar los parámetros de maquinado utilizado en una máquina de fresado vertical 3 ejes, (FADAL VMC 3016, control FANUC 18 im) para minimizar la rugosidad superficial en una muestra de aluminio EN-AW-7075 en superficies cóncavas y convexas. Velocidad de corte (A), avance (B), trayectoria de la herramienta (C), y profundidad de corte (D) estos parámetros son considerados para este análisis. El método Taguchi y análisis de varianza fueron aplicadas como parte del diseño de los experimentos y análisis. Un arreglo ortogonal L27, con tres niveles, fue llevado a cabo para los experimentos. Acorde a este estudio, el factor (C) es estadísticamente significativa para la rugosidad superficial en superficies cóncavas y los factores (A) y (C) para las superficies convexas. Los modelos predichos dan como resultado 0,230 μm para el caso de superficie cóncava y 0,242 μm para el caso de la superficie convexa. Después de la confirmación de las pruebas, estas pueden evidenciar una mejora de 6,88 % y 9,03% en la rugosidad superficial, que fue logrado para la superficie cóncava y convexa respectivamente. Estas son comparadas con los mejores resultados obtenidos en el experimento, los cuales son la prueba 13 para la superficie cóncava y la prueba 1 para la superficie convexa.

Palabras clave:

- **MÉTODO TAGUCHI.**
- **PARÁMETROS DE FRESADO.**
- **RUGOSIDAD, ANÁLISIS DE VARIANZA.**
- **ARREGLO ORTOGONAL.**

ABSTRACT

This research describes the methodology to optimize the machining parameters utilized in a 3-Axis milling machine (FADAL VMC 3016, control FANUC 18i-m) in order to minimize the surface roughness of the EN-AW-7075 in convex and concave machined specimens. Cutting speed (A), feed rate (B), tool path pattern (C) and depth of cut (D) were the parameters considered for this analysis. Taguchi Methods, analysis of variance were applied as part of the design of the experiments and analysis. An orthogonal array L27 at three levels was conducted for the experiments. According to this study, factor (C) is statistically significant towards the final surface roughness for the concave-case, and factors (A) and (C) for the convex-case. The predicted models give as results 0,230 μm for the convex-case and 0,242 μm for concave-case. After confirmation tests, it could be evidenced that an improvement of 6,88 % and 9,03 % was achieved for the convex and concave cases respectively; this compared to the best result obtained in each orthogonal array, which is trial number 13 for the first case and trial number 1 for the second case.

Index Terms:

- **TAGUCHI METHODS.**
- **MILLING PARAMETERS.**
- **ROUGHNESS.**
- **ANALYSIS OF VARIANCE.**
- **ORTHOGONAL ARRAY.**

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio son el segundo metal más usado en el mundo, la razón de esto es la atractiva combinación de características con una baja densidad, una alta conductividad, dureza y un fácil reciclaje. Las aplicaciones del aluminio se han visto incrementando en la industria automotriz, marina, aviación y aeroespacial ya que da oportunidad de reducir el peso en maquinaria (Nunes, 1992, pág. 17).

La facilidad de las aleaciones de aluminio de maquinado en las operaciones de fresado, hace que se incremente las innovaciones en los programas, CAD (Diseño asistido por computador) /CAM (Manufactura asistida por computadora) /CAE(Ingeniería asistida por computador), centros de mecanizado, herramientas de corte de alta velocidad y el estudio del material de remoción (Aaron, 1995, pág. 12).

El control numérico computarizado(CNC), origino que las máquinas herramientas sean más versátiles en su uso y aplicación para la industria e investigación; hasta el punto de tener máquinas de 5 o más ejes de trabajo así como máquinas combinadas para una mejor desempeño. Lo anterior facilita la generación superficies curvas en una pieza de trabajo con diversidad de materiales, como es el caso del aluminio (Blanco, 2013).

En la investigación del acabado superficial, existen variables que influyen en la calidad geométrica y rugosidad de una superficie curva ya sea cóncava o convexa. La velocidad de corte, el avance de la herramienta, la profundidad de corte y la estrategia de mecanizado o recorrido de la herramienta, son algunas de ellas. Por tal motivo, este trabajo evalúa estas variables para determinar su influencia en la calidad geométrica de la superficie mecanizada.

(Murat, 2013) investigo el mecanizado del aluminio AA5083 usando el criterio de la rugosidad superficial por el método Taguchi para superficies planas, como resultado se obtuvo que el avance es el valor más significativo que afecta a la rugosidad de la superficie, mientras que la trayectoria tiene un bajo efecto sobre la rugosidad superficial, la profundidad de corte así como el avance se relacionan positivamente con la rugosidad superficial.

(Vakondios D. , 2014) Estudió la optimización del uso de fresas con punta esférica en procesos de acabado para superficies libres. El resultado muestra que un fresado de acabado de una superficie perpendicular al eje de la herramienta de corte, conduce a la formación de una baja calidad de la superficie mecanizada.

(Lasemi, 2010) Determinó que la orientación de la herramienta de corte para el acabado, juega un papel importante para lograr una alta calidad de mecanizado de superficies de forma libre. La trayectoria de la herramienta es un factor importante ya que de ello depende la rugosidad superficial. Para el mecanizado en 5 ejes, la selección de la herramienta para el acabado está estrechamente ligada con la orientación de la herramienta, la topología de la trayectoria de la herramienta y los parámetros de ruta.

(Shyong Chen & Huang, 2005) Determinan que en un proceso de corte con herramientas de punta esférica el scallop en el avance es más importante para la rugosidad superficial que el scallop en la trayectoria. En general la inclinación de la herramienta de 10° , mejora la rugosidad de la superficie y es suficiente para diferentes diámetros de herramientas de corte con punta esférica.

(Yang & Chen, 2001) estudiaron los efectos de la profundidad de corte, velocidad de corte, tasa de avance y diámetro de la herramienta en el fresado superficial del AA6061 mediante el método Taguchi, como resultado se determinó que todos los factores excepto el diámetro de la herramienta fueron significativos para el acabado superficial.

(Oktem & Erzurumlu, 2006) estudiaron la rugosidad superficial por mecanizado del AA7075-T6 con una herramienta de acabado con recubrimiento de AlTiN. Los efectos de la velocidad de corte, avance por diente, y tolerancia de mecanizado fueron evaluados por el método Taguchi. Como resultado se observó que la tolerancia de mecanizado es el factor más dominante (96%), seguido de la profundidad de corte (1,5%), avance por diente (0,177%) y la velocidad de corte (0,09%).

En relación a lo anterior, con este trabajo se quiere determinar la influencia de la velocidad de corte, ángulo de inclinación de la herramienta de corte, avance por diente, estrategia de mecanizado y profundidad de

corte, sobre la calidad geométrica de la superficie mecanizada. Además, se busca determinar si variables como la geometría de la superficie, cóncava o convexa tienen influencia en la calidad geométrica de la superficie mecanizado

Capítulo 1 : GENERALIDADES.

1.1. ANTECEDENTES

Este estudio hace parte de una serie de trabajos del grupo de investigación del laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” cuya labor está orientada hacia el desarrollo de investigación en el área de Manufactura, robótica, diseño, soldadura y CAD/CAM. Dentro de estos trabajos, el estudio de la influencia de los parámetros de mecanizado sobre la calidad geométrica es de gran importancia porque de ello dependen muchas aplicaciones industriales. . El laboratorio de procesos de manufactura se encuentra realizando investigación en este campo en conjunto con la Universidad de Porto, Portugal.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los parámetros de mecanizado; velocidad de corte, profundidad de corte, avance y trayectoria de la herramienta, afectan a la rugosidad (acabado superficial), forma y precisión dimensional del aluminio para aplicaciones industriales?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. GENERAL

Encontrar la influencia de los parámetros de corte (velocidad de corte, avance, trayectoria y profundidad de corte) en el fresado, para superficies cóncavas y convexas para el aluminio EN-AW-7075.

1.3.2. ESPECÍFICOS.

-Evaluar estadísticamente el efecto de; velocidad de corte, avance, trayectoria y profundidad de corte sobre la rugosidad superficial.

-Relacionar los factores de maquinado que presenten efectos estadísticamente significativos con las características de calidad superficial y de forma, consideradas como respuesta experimental.

-Desarrollar un método de optimización de acabado superficial y validarlo experimentalmente.

1.4. ALCANCE.

Mecanizado de probetas cóncavas y convexas con la optimización de los factores para obtener una rugosidad de mejor calidad, con sus diferentes parámetros de corte, para el aluminio EN-AW-7075.

1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.

El estudio teórico en CAD (Diseño asistido por computador) /CAM (Manufactura asistida por computador), sistemas flexibles y procesos de manufactura, se debe complementar con la aplicación práctica de estos, desarrollando investigación que aporte al campo de la manufactura, optimización de procesos, reducción de costos, recursos y ayuda social.

Capítulo 2 : ESTADO DEL CONOCIMIENTO.

2.1. ALUMINIO.

El aluminio se ha convertido en un competidor económico en aplicaciones de ingeniería desde el final del siglo IX. La aparición de importantes desarrollos industriales haría que la demanda del material aumente por sus características con sus cualidades únicas del aluminio y sus aleaciones, se beneficien en gran medida del crecimiento de la producción y el uso del nuevo metal. (Nunes, 1992, pág. 17).

La industria del aluminio fue creciendo sin límite, a la par con los desarrollos en la industria. Las primeras aplicaciones comerciales del aluminio eran artículos como marcos de espejos, números de casas y utensilios de cocina. Con el tiempo, el aluminio creció en diversidad de aplicaciones en medida en que prácticamente todos los aspectos de la vida. (Nunes, 1992, pág. 18).

2.1.1. PROPIEDADES ALUMINIO EN-AW-7075.

Entre las más sorprendentes características del aluminio es la versatilidad. El rango de las propiedades físicas y mecánicas que pueden desarrollarse a partir de la alta pureza del aluminio a las aleaciones más complejas es notable. (Nunes, 1992, pág. 17).

Las propiedades del aluminio que hacen que este metal y sus aleaciones sean el más económico y atractivo para una amplia variedad de usos son la apariencia, peso ligero, maquinabilidad, propiedades físicas, propiedades mecánicas y resistencia. (Nunes, 1992, pág. 18).

El aluminio típicamente muestra una excelente conductividad eléctrica y conductividad térmica. Estas aleaciones son útiles en motores eléctricos de alto par. El aluminio es a menudo seleccionado por su conductividad

eléctrica, que casi es el doble que la del cobre sobre una base de peso equivalente. (Nunes, 1992, pág. 18).

Tabla 1
Características mecánicas Aluminio EN-AW-7075.

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS		
Resistencia última de 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

Fuente: (Nunes, 1992).

2.1.2. DUREZA BRINELL.

Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material a resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (identador ó penetrador) . (Aaron, 1995)

El estándar ASTM E 10-78 define la dureza Brinell como un método de ensayo por indentación, Figura 1; por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza una bola endurecida, bajo condiciones específicas, contra la superficie del material a ensayar y se mide el diámetro de la impresión resultante luego de remover la carga.

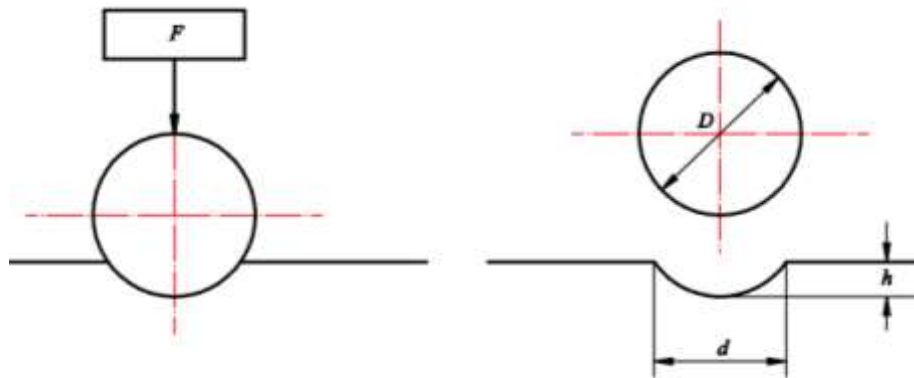


Figura 1 Símbolos que describen la dureza brinell.

Fuente: (Aaron, 1995).

La prueba de dureza brinell no se recomienda para materiales que tengan una dureza superior a 650 HBW (Dureza brinell realizada con bola de carburo de tungsteno).

Ateniéndonos a la definición, el número de dureza Brinell (como esfuerzo de contacto), es la relación de la carga (F) que efectúa el indentador esférico de diámetro Dh, al área de la superficie de la huella (A):

$$HBS \text{ O } HBW = \frac{F}{A} = \frac{(Fh)}{\frac{\pi * (Dh)}{2} * \{(Dh) - \sqrt{[(Dh) - (dh)^2]}\}} \quad (1) \text{ (Aaron, 1995)}$$

HBS para los casos en que se utilice bola de acero.

HBW para cuando se utilice bola de carburo de tungsteno.

Donde:

Dh= es el diámetro de la bola en (mm).

Fh= es la carga aplicada en (kgf).

dh= es el diámetro medio de la indentación en (mm).

El método estándar como tal, se realiza bajo las siguientes condiciones:

Diámetro de la bola (Dh): 10 (mm).

Carga (Fh): 3000 (kgf).

Duración de la carga (t): 10...15 s

En caso de realizarse el ensayo bajo estas condiciones el número de dureza Brinell se denota sin ningún sufijo. Ejemplo: 10HB.

2.1.2.1. ENSAYO DE DUREZA BRINELL.

El ensayo se realizó en el laboratorio de Metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", con el durómetro marca Wilson. De acuerdo al material, aleación de aluminio, se usa una pre carga de 3kg y una carga de 100 kg, con un indentador de acero de 1/16" pulgadas de diámetro, con un tiempo de aplicación de 4-8 segundos, la prueba se la realizó tres veces **Figura 2**. Por lo cual se obtuvo las siguientes medidas.

Prueba	Valor
1	78,1
2	78,1
3	78,1
Media	78,1



Figura 2 Medición dureza brinell, aleación de aluminio 7075.

Fuente: Propia

Tabla 2
Composición química de los elementos aleados Aluminio EN-AW-7075.

Composición,wt%	
Si	0.4
Fe	0.5
Cu	1.2-2
Mg	0.3
Cr	2.1-2.9
Ni	..
Zn	5.1-6.1
Ga	..
V	..
Ti	0.20
Otros no especificados	0.15

Fuente: (Nunes, 1992).

2.2. MECANIZADO.

El mecanizado es un término que converge en una gran colección de procesos de manufactura designados a la remoción de material no deseado. El maquinado es usado para convertir la fundición, forja o preformado de bloques de material en formas, medidas y acabado superficial deseado a los requerimientos de un diseño necesitado.

A menudo muchos productos manufacturados requieren una gran precisión geométrica. Por tanto esta colección de procesos es una de las más importantes en los procesos básicos de la manufactura porque es el valor agregado al producto final. (Aaron, 1995, pág. 18).

La mayoría de las aplicaciones industriales de maquinado son en metales y estas están muy extendidas en el mundo industrial. Los procesos de maquinado son realizados en una amplia variedad de máquinas herramientas. Algunas de las máquinas más usadas son fresadoras, tornos, taladros, amoladoras, y sierras.

Con la evolución de la tecnología muchas máquinas herramientas como los tornos y fresadoras tienen ahora un control numérico computarizado (CNC), para trabajos en los que se requiere una alta precisión y forma. (Aaron, 1995, pág. 18)

2.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES EN EL MECANIZADO.

El proceso de mecanizado requiere de varias variables independientes de entrada, en la cual el operador de la máquina herramienta tiene control directo sobre estas variables y pueden especificar o configurar el proceso de mecanizado.

2.2.1.1. Material de trabajo.

La metalurgia y química de la pieza de trabajo pueden estar especificadas o ya se conocen. A menudo, el material es seleccionado para una aplicación en particular. (Aaron, 1995, pág. 14)

2.2.1.2. Geometría inicial.

La medida y forma de la pieza de trabajo puede ser dictaminada por el proceso y la máquina herramienta que se vaya utilizar. Usualmente esta variable influye directamente en el proceso de mecanizado. (Aaron, 1995, pág. 14)

2.2.1.3. Proceso específico de mecanizado.

La selección del proceso de maquinado requerido a convertir el material en bruto en un producto terminado debe ser basado en la geometría de la pieza, el requerimiento del acabado y tolerancias, y la cantidad del producto que se va trabajar.

2.2.1.4. Proceso de formación de viruta.

Hay siete formas básicas de formación de viruta las cuales son: Torneado, fresado, perforado, conformado, corte por sierra, rectificado y maquinado abrasivo.

2.2.1.5. Maquinado abrasivo.

Es el proceso básico por el cual la viruta es formada por muy pequeños bordes de corte que son parte de partículas abrasivas. Este maquinado corta materiales frágiles sin dañarlos o cambiar sus características. También se usa este maquinado para remoción de óxidos en superficies metálicas, grabado de modelos, taladro y corte de secciones final de metal. (Aaron, 1995, pág. 15)

2.2.1.6. Herramientas de corte.

Los tres materiales de las herramientas de corte más utilizados para procesos en operaciones de producción son: acero de alta velocidad (HSS), carburo, titanio. Las herramientas de (HSS) se utilizan para fines generales de mecanizado, diseño complejo y para uso de velocidades modestas. (Aaron, 1995, pág. 15)

Las herramientas de carburo se usan para materiales en los cuales la herramienta de corte puede trabajar a velocidades de corte más rápido.

El uso de las herramientas de titanio son muy comunes, esta puede resistir el desgaste a velocidades de corte más rápidas. La selección adecuada de un material para la herramienta de corte que proporcione un servicio fiable sin dejar de cumplir los requisitos funcionales sigue siendo un arte.

2.2.1.7. Parámetros de corte.

Para cada operación de maquinado es necesario seleccionar una velocidad de corte, un avance, trayectoria y profundidad de corte. Muchos factores para la selección de los valores de estos parámetros afectan en estas decisiones porque todas las variables dependientes están influenciadas por ellas. (Aaron, 1995, pág. 15)

La selección de variables también depende de otras variables de entradas que han sido seleccionadas, como la cantidad total de material a retirar, los materiales de las piezas de las herramientas, y el proceso de mecanizado. Estas tienen que ser seleccionadas antes de elecciones preliminares para la velocidad, el avance, trayectoria y la profundidad de corte.

2.2.1.8. Geometría de la herramienta.

Las herramientas de corte son usualmente diseñadas para cumplir operaciones específicas y así la geometría de la herramienta (ángulos de corte, alivio y salida) es seleccionada para cumplir con funciones específicas de maquinado.

2.2.1.9. Fluido de corte.

La selección correcta del fluido de corte para una combinación particular de trabajo, material y herramienta puede significar una diferencia entre una buena operación o el fracaso de todos los procesos de producción.

Los fluidos de corte sirven para enfriar las piezas de trabajo, herramientas y viruta, además reducen la fricción por medio de lubricación, ayudan a mejorar el acabado superficial y proporcionan protección a la superficie de la pieza de trabajo. (Aaron, 1995, pág. 16)

2.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES.

Las variables dependientes están determinadas por el proceso basado en las variables independientes. Por tanto, el control de estas variables por parte de los ingenieros y diseñadores de manufactura suele ser indirecta.

2.2.2.1. Fuerza de corte y potencia.

En una máquina, a una velocidad, avance, trayectoria, profundidad de corte, con un lubricante especificado, al cortar material con la herramienta de corte, genera fuerzas de corte y consume energía. Un cambio en cualquiera de las variables altera estas fuerzas generadas, pero el cambio es indirecto, el ingeniero no especifica estas fuerzas, sólo los parámetros que la generan. (Aaron, 1995, pág. 16)

Las fuerzas son importantes porque influyen en las desviaciones en las herramientas de corte, las piezas de trabajo y la porta piezas, que a su vez afectará el tamaño de la pieza final. Estas fuerzas juegan un rol en la vibración de fenómenos comunes en el mecanizado.

2.2.2.2. Medida y propiedades del producto terminado.

El objetivo del mecanizado es obtener un maquinado superficial deseado y la geometría con las propiedades mecánicas deseadas. Debido a que el mecanizado está localizado en la zona plástica, en el proceso de deformación, cada superficie mecanizada tendrá alguna deformación residual que queda en ella. (Aaron, 1995, pág. 16).

Estas tensiones residuales por lo general interactúan con defectos en la superficie para producir el fallo de una pieza a la fatiga o para causar corrosión. Por lo tanto, el ingeniero de manufactura debe tratar de seleccionar los niveles adecuados de entrada y las variables para producir un producto, que está dentro de la tolerancia especificada por el diseñador y las propiedades superficiales requeridas.

2.2.2.3. Acabado superficial.

El acabado final en un maquinado superficial es una función de la geometría de la herramienta, material de la herramienta, material de la pieza de trabajo,

proceso de maquinado, velocidad, avance, trayectoria, profundidad de corte y fluido de corte.

El acabado superficial también está relacionado con la variabilidad del proceso. Las superficies rugosas tienen mayor variabilidad que las superficies lisas. A menudo es necesario la especificación de cortes múltiples, para lograr el acabado superficial deseado o especificar otros procesos como el rectificado en fin de obtener el acabado deseado.

2.2.2.4. Desgaste y falla de la herramienta de corte.

La deformación plástica y la fricción en el mecanizado generan un calor considerable, que eleva la temperatura de la herramienta y reduce su resistencia al desgaste. El problema es sutil pero significativo. A medida que la herramienta se usa, esta cambia tanto en geometría y tamaño. (Aaron, 1995, pág. 16)

Un filo de corte deteriorado y un cambio en la geometría de la herramienta pueden resultar en el incremento de las fuerzas de corte que a su vez incrementan las deflexiones en la pieza de trabajo y que pueden crear una condición de vibración inadecuada.

El ingeniero tiene control indirecto sobre estas variables, este puede seleccionar velocidades bajas las cuales producen menos incremento de temperatura y menor tasa de desgaste, pero esto disminuye la tasa de producción debido a que la tasa de remoción de material disminuye.

2.2.2.5. Chatter (Traqueteo).

Chatter es una condición en la cual la herramienta de corte y la pieza de trabajo vibran en resonancia a una frecuencia usualmente determinadas por la frecuencia natural de uno o más elementos de la máquina.

El chattering afecta a la tolerancia, acabado, y la vida de la herramienta. Las herramientas de carburo son susceptibles al chattering y usualmente fallan por astillamiento.

2.3. MECANIZADO DEL ALUMINIO

El mecanizado del aluminio y sus aleaciones, en máquinas herramientas de arranque de viruta, es fácil y rápido. El aluminio tiene unas excelentes características de conductividad térmica, lo cual es una importante ventaja, dado que permite que el calor generado en el mecanizado se disipe con rapidez.

Principales problemas a tener en cuenta en el mecanizado de aluminio.

- Marcas y estrías en la superficie de la pieza mecanizada, cuando no se selecciona un método de evacuación de viruta.
- Los criterios dominantes de desgaste son el filo de aportación / empastamiento en los filos, estos provocan formación de rebabas y problemas de acabado superficial

Recomendaciones.

- Una selección de velocidad de corte alta suele mejorar el rendimiento y no afecta negativamente a la vida útil de la herramienta.
- Siempre se debe utilizar refrigerante en el mecanizado de aluminio para evitar el emplastamiento sobre los filos de la plaquita y para mejorar el acabado superficial.
- Comprobar que no se supere el valor máximo de rpm permitidos por la máquina a usar.

2.3.1. TEMPERATURA DE CORTE.

El coeficiente de fricción entre el aluminio y los metales de corte son, comparativamente elevados con respecto a otros metales, esto unido a su

baja resistencia hace que se comporte como plastilina, pudiendo causar el embotamiento de los filos de corte, deteriorando la calidad de la superficie mecanizada a bajas velocidades de corte e incluso a elevadas velocidades con refrigeración insuficiente.

2.3.2. FUERZAS DE CORTE AL MECANIZAR EL ALUMINIO.

Durante el arranque de viruta, las fuerzas de corte que tienen lugar son menores en comparación con el acero (la fuerza necesaria para el mecanizado del aluminio es aproximadamente un 30% de la necesaria para mecanizar el acero).

2.4. FRESADO

El fresado es un proceso de maquinado en el cual el material es removido por la rotación de múltiples dientes de corte, como se puede ver en la **Figura 3**, estos dientes de corte remueven una pequeña cantidad de material con cada revolución del husillo. La herramienta y el material pueden moverse en más de una dirección al mismo tiempo.



Figura 3
Fresado en centro de mecanizado vertical FANUC 3016

Fuente: Propia.

El fresado en máquinas herramientas, se produce con el útil de corte rotativo, el cual dispone de varios filos de corte y diferente geometría, esta herramienta cumple con movimientos de avance planificados contra el material de trabajo en la dirección requerida por el operador o programador. (Sanvick, 2014)

2.4.1. VELOCIDAD DEL HUSILLO, VELOCIDAD DE CORTE Y DIÁMETRO DE LA FRESA.

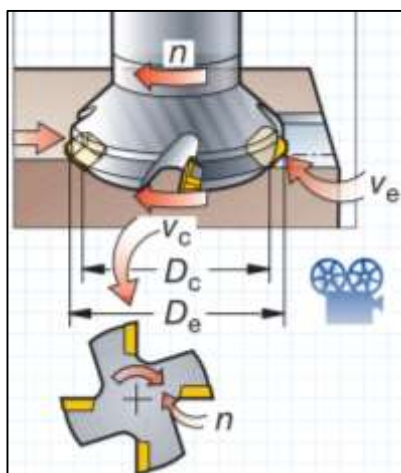


Figura 4 Velocidad de la herramienta de corte y geometría de la fresa.

Fuente: (Sanvick, 2014)

Donde:

- $n = N_r =$ Velocidad del husillo, rpm (revoluciones por minuto).
- $V_c =$ Velocidad de corte (m/min) (metros por cada minuto).
- $D_c =$ Diámetro de la fresa (mm) (milímetros).
- $D_e =$ Diámetro de corte o diámetro efectivo, (mm) (milímetros).

La **Figura 4** muestra un proceso de fresado en el cual indica partes de la geometría y parámetros de corte como, la velocidad del husillo (N), que es el número de revoluciones que realiza la herramienta de corte cada minuto, esta se expresa en (rpm). La velocidad de corte (V_c), muestra la velocidad

lineal a la que el filo de la herramienta de corte mecaniza el material de trabajo a mecanizar esta expresada en (m/min). El diámetro de fresa (D_c), tiene un diámetro de corte eficaz (D_e), este es la base de cálculo de la velocidad de corte (V_c) o la velocidad de corte efectiva (V_e).

2.4.2. AVANCE, NÚMERO DE DIENTES Y VELOCIDAD DEL HUSILLO.

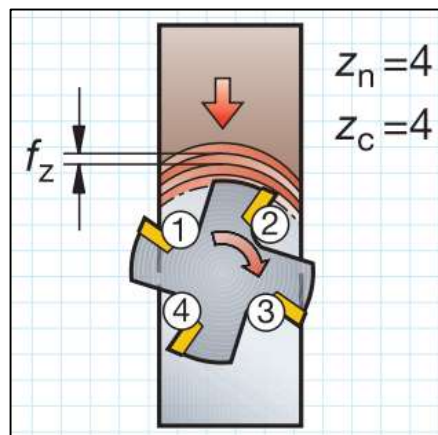


Figura 5 Avance número de dientes y velocidad del husillo.

Fuente: (Sanvick, 2014).

Donde:

v_f = Avance o avance de mesa (mm/min)

f_z = Avance por diente (mm/diente)

z_n = Número de dientes de la fresa (unidades)

z_c = Número efectivo de dientes (unidades)

$v_f = f_z \times z_c \times N_r$

El avance por minuto (v_f), expresado en (mm/min), conocido también como velocidad de avance, es el avance de la herramienta respecto a la pieza en distancia por unidad de tiempo y se calcula en función del avance por diente y del número de dientes efectivos de la fresa.

El avance por diente (f_z) expresado en (mm/diente), se utiliza para calcular el avance. El valor del avance por diente se calcula en base del valor de espesor máximo de viruta sugerido por el fabricante.

El número de dientes en la fresa (z_n) varía considerablemente y se aplica para determinar el avance de mesa, mientras que el número efectivo de dientes (z_c) es el número de dientes que actúan en el proceso de corte.

Todos estos parámetros de corte se los puede apreciar en la **Figura 5**.

2.4.3. OPERACIONES DE FRESADO

La permanente evolución de máquinas herramientas de control numérico y desarrollo industrial ha generado que el fresado genere un procedimiento de mecanizado muy amplio, debido al desarrollo de nuevos materiales para piezas de trabajo y herramientas de corte, así como de nuevas geometrías en herramientas y filos de corte, produciendo un método que permite mecanizar una gran variedad de materiales con diferentes parámetros en pro de la mejora del mecanizado. (Sanvick, 2014)

Las máquinas de control numérico con múltiples ejes, brindan una variedad de métodos de mecanizado esto transforma al fresado en una fuerte herramienta para la manufactura así se pueden producir una gran variedad de procesos como se puede ver en la **Figura 6**.

La investigación y producción de las herramientas de corte, como plaquitas intercambiables, nuevos diseños de fresas y materiales de las herramientas, propone nuevas y desconocidas posibilidades de productividad y confianza de la calidad del mecanizado.

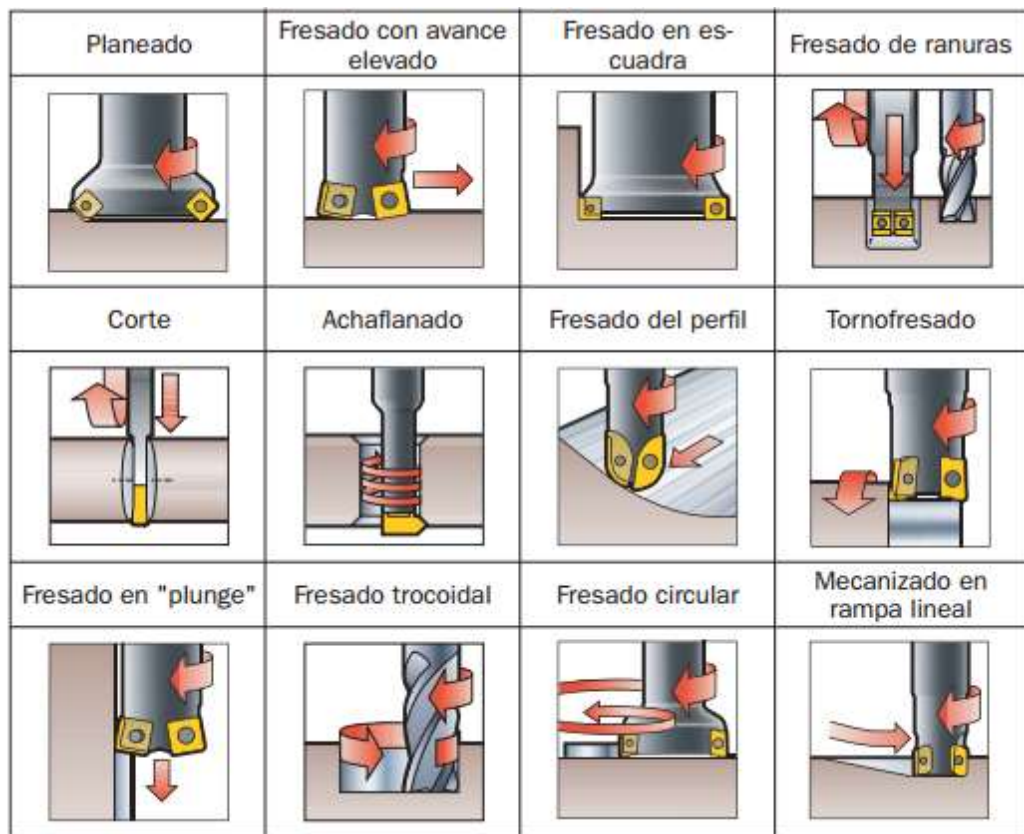


Figura 6. Operaciones de Fresado.

Fuente: (Sanvick, 2014).

2.4.4. FRESADO RADIAL.



Figura 7. Fresado radial en Aluminio 7075.

Fuente: Propia

La **Figura 7**, muestra un ejemplo de mecanizado radial, para este tipo de fresado el diámetro efectivo (De), es el factor principal usado en el cálculo de la velocidad de rotación requerida. El diámetro efectivo es definido como el diámetro real de la fresa. El diámetro efectivo está influido por los parámetros: radio de la herramienta (R), y la profundidad de corte axial (Ap). El diámetro efectivo reemplaza el diámetro de la fresa en el cálculo de la velocidad de rotación efectiva (Nr), en revoluciones por minuto (rpm), para una fresa radial. (DORMER, 2013)

Fórmulas para el fresado con herramientas de punta esférica.

De= Diámetro efectivo.

R= Radio de la herramienta.

Ap= Profundidad de corte axial.

$$De = 2 * \sqrt{R^2 - (R - Ap)^2} \quad (1) \text{ (DORMER, 2013)}$$

Vc = velocidad de corte (m/min)

Nr = Velocidad de rotación (rpm)

$$Nr[rpm] = \frac{Vc[\frac{m}{min}] * 1000[\frac{mm}{m}]}{\pi * De[mm]} \quad (2) \text{ (DORMER, 2013)}$$

Avance

$$\mathbf{Avance} = Nr * zc * fz \quad (3) \text{ (DORMER, 2013)}$$

zc = Número de dientes efectivos.

fz = Avance por diente.

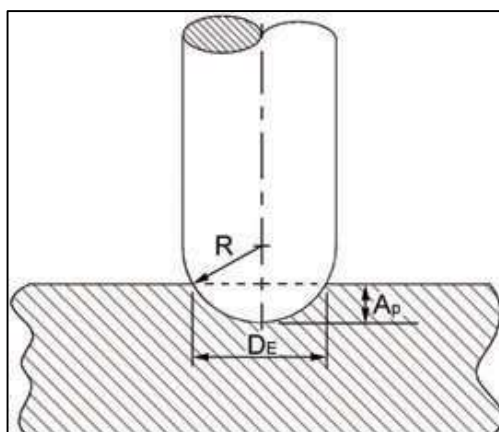


Figura 8.Esquema de los principales parámetros que influyen en el fresado radial.

Fuente: (DORMER, 2013)

Cuando las fresas de punta radial, se usan para cortar en una superficie de trabajo, el corte preferentemente se lo realiza en forma paralela o zig-zag, de esta forma se crea una tira que no se corta entre las dos pasadas de corte. La altura de estas tiras no cortadas es llamada altura vértice o scallop. La **Figura 9**, muestra los principales parámetros que intervienen en el proceso de fresado radial.

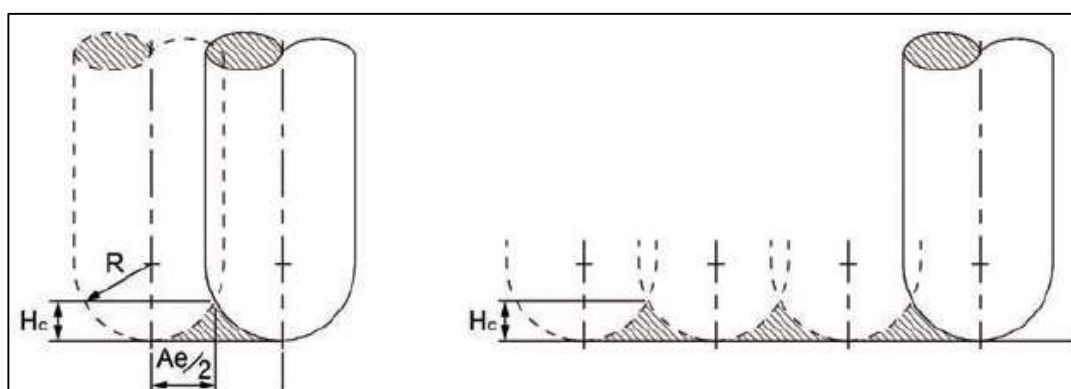


Figura 9. Altura del vértice (scallop).

Fuente: (DORMER, 2013)

La altura del vértice (scallop) puede ser calculada de la siguiente forma:

H_c = Altura de vértice (mm)

Ae= Valor del paso entre dos pasadas de corte (mm)

$$Hc = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{Ae}{2}\right)^2} \quad (4) \text{ (DORMER, 2013)}$$

$$Ae = 2 * \sqrt{R^2 - (R - Hc)^2} \quad (5) \text{ (DORMER, 2013)}$$

2.5. PARÁMETROS DE FRESADO EN EL MECANIZADO DEL ALUMINIO.

Los parámetros de fresado para el estudio de la relación de estos, con la rugosidad superficial son:

- Velocidad de corte.
- Avance
- Profundidad de corte
- Trayectoria.

Para que estos parámetros cumplan con su función, no se debe permitir que se detenga la herramienta de corte, durante el maquinado con la pieza de trabajo, ya que este paro influye en el acabado superficial de la pieza mecanizada, como puede hacer que la herramienta de corte pierda el filo en la punta de la herramienta, resultando así un mecanizado no deseado.

2.5.1. VELOCIDAD DE CORTE Y AVANCE PARA EL ALUMINIO AW-EN-7075.

Varias directrices deben ser consideradas en el fresado de aluminio y sus aleaciones, ya que sus propiedades físicas, como mecánicas, hacen que este material se comporte de forma específica para cada proceso de maquinado.

El estudio del avance por diente en el maquinado debe ser analizado con minuciosidad en la especificación de las condiciones de mecanizado para

aleaciones de aluminio, para cada tipo de mecanizado y tipo de herramienta.

Al emplear fresado con herramienta de punta plana para mecanizar aluminio, se puede considerar, que una velocidad de corte adecuada para acabado oscila entre 260 – 380 o 500- 630m/min, con un avance de 5mm/min y una profundidad de corte de 1mm. (Larburu, 1990)

Velocidades nominales para el fresado de aleaciones de aluminio, para herramientas de acero rápido y carburo, para operaciones face milling (fresado de cara) se dan en la **Tabla 3** para el proceso de slab (desvaste) **Tabla 4** y en la **Tabla 5** para proceso de acabado.

Tabla 3
Velocidades y avance recomendado en proceso face milling, (planeado) de aleaciones ferrosas y no ferrosas con herramientas de acero rápido y carburo.

Material (Dureza)	Profundidad de corte (mm)	Herramienta de acero rápido			Herramienta de carburo		
		Velocidad de corte (m/min)	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,S2	550	0,5	K10,M20
	8	200	0,5	S4,S2	365	0,65	K20,M30

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 701)

Tabla 4

Velocidades recomendadas y avance para slab milling (desbaste) de aleaciones ferrosas y no ferrosas con herramientas de acero rápido y carburo.

Material	Dureza	Condición	Profundidad de Corte		Velocidad		Avance por diente	
			(mm)	(in)	(m/min)	(sfm)	mm	in
7075	30-80	En frío	1	0	365	1200	0,3	0,012
			4	0,2	320	1050	0,4	0,014
			8	0,3	260	850	0,4	0,02

Sfm: Surface feet por minute, Pies por cada minuto.

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 704)

Tabla 5

Velocidades y avances para el fresado de acabado para el aluminio 7075 con herramientas de acero rápido y carburo.

Material (Dureza)	Profundidad de corte radial (mm)	Herramienta de acero rápido					Material de la herramienta
		Velocidad de corte (m/min)	Avance mm/diente, respecto al diámetro de la herramienta (mm/diente)				
7075 (30-80HB)			10 (mm)	12 (mm)	18 (mm)	25-50 (mm)	
	0,5	245	0,075	0,102	0,13	0,18	S4,S5,S2
	1,5	185	0,102	0,15	0,2	0,25	S4,S5,S2
	diámetro/4	150	0,075	0,102	0,15	0,2	S4,S5,S2
	diámetro/2	120	0,05	0,075	0,13	0,15	S4,S5,S2

Material (Dureza)	Profundidad de corte radial (mm)	Herramienta de carburo					Material de la herramienta
		Velocidad de corte (m/min)	Avance mm/diente, respecto al diámetro de la herramienta (mm/diente)				
7075 (30-80HB)			10 (mm)	12 (mm)	18 (mm)	25-50 (mm)	
	0,5	395	0,075	0,102	0,13	0,18	K20, M20
	1,5	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

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 707)

La velocidad de corte está influenciada por el avance. Si la estabilidad de la tasa de avance es alta, a menudo es necesario reducir la velocidad porque la potencia es insuficiente. Y a la inversa, si se establece una velocidad alta, puede ser necesario disminuir el avance por diente o disminuir el número de dientes para mantenerse dentro de los límites de potencia disponible. (Machining, 1983)

La herramienta de corte adecuada para el maquinado de aluminio 7075 en el proceso de acabado puede ser de acero rápido y carburo. Para acero rápido el material de la herramienta será AISI: M2, M3. Para las herramientas de carburo el material será ISO: K20, M20.

Tabla 6
Composición de herramientas de acero rápido.

AISI	Composición %							Dureza HRC
	C	Cr	V	W	Mo	Co	S	
M2	1	4,5	2	6,4	5	0,27	64-66
M3	1,3	4	6,25	5	3	0,27	65-67

Fuente: (Machining, 1983).

Tabla 7
Aplicación de herramientas de carburo.

DESIGNACIÓN	GRUPOS DE APLICACIÓN	
	Material a maquinar	Uso y condiciones de trabajo
M20	Acero, Acero de fundición, Acero austenítico, hierro gris	Torneado, fresado, velocidades medias de corte
K20	Hierro gris por arriba de 220 HB, materiales no ferrosos: Cobre, latón, aluminio	Torneado, fresado, planeado.

Fuente: (Machining, 1983).

2.5.2. PROFUNDIDAD DE CORTE.

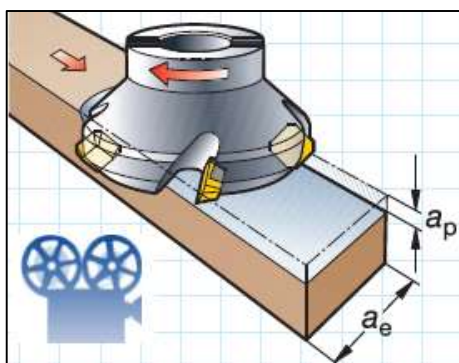


Figura 10. Profundidad de corte radial y axial.

Fuente: (Sanvick, 2014)

a_e = Profundidad de corte radial (mm) (empane).

a_p = Profundidad de corte axial (mm).

La profundidad de corte axial (a_p) en (mm), es la distancia por debajo de la parte superior del material, así también es la porción de material mecanizado, que la herramienta de corte quita de la superficie del material en el proceso de corte. (Sanvick, 2014).

En el mecanizado de radial, la correlación entre Hc (Altura del vértice) y Ra (rugosidad superficial) es aproximadamente.

Tabla 8
Relación entre altura del vértice y rugosidad superficial.

Hc(mm)	0,2	0,4	0,7	1,25	2,2	4	8	12,5	25	32
Ra(μm)	0,03	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	8

Fuente: (DORMER, 2013).

(DORMER, 2013), expresa que la profundidad axial de corte, la que generará la altura de vértice, y esta debe ser inferior a 0,15 *el diámetro de la herramienta (De).

2.5.3. PROFUNDIDAD RADIAL DE CORTE.

La profundidad radial de corte (a_e), expresada normalmente en milímetros (mm) para el sistema internacional, es la distancia del material de trabajo, sobre la que ejecuta un corte el diámetro efectivo de la herramienta.

Para la aleación 7075 en el fresado de acabado para una herramienta de acero rápido o carburo, la profundidad radial máxima será de 0,5 mm como máximo según la **tabla 5**. Al utilizar un diámetro máximo de 10mm de una herramienta de corte.

2.6. ACABADO SUPERFICIAL.

El acabado superficial por el proceso de fresado depende del material de trabajo su condición y composición, así como de la velocidad de corte, avance, herramienta de corte, y fluido de corte.

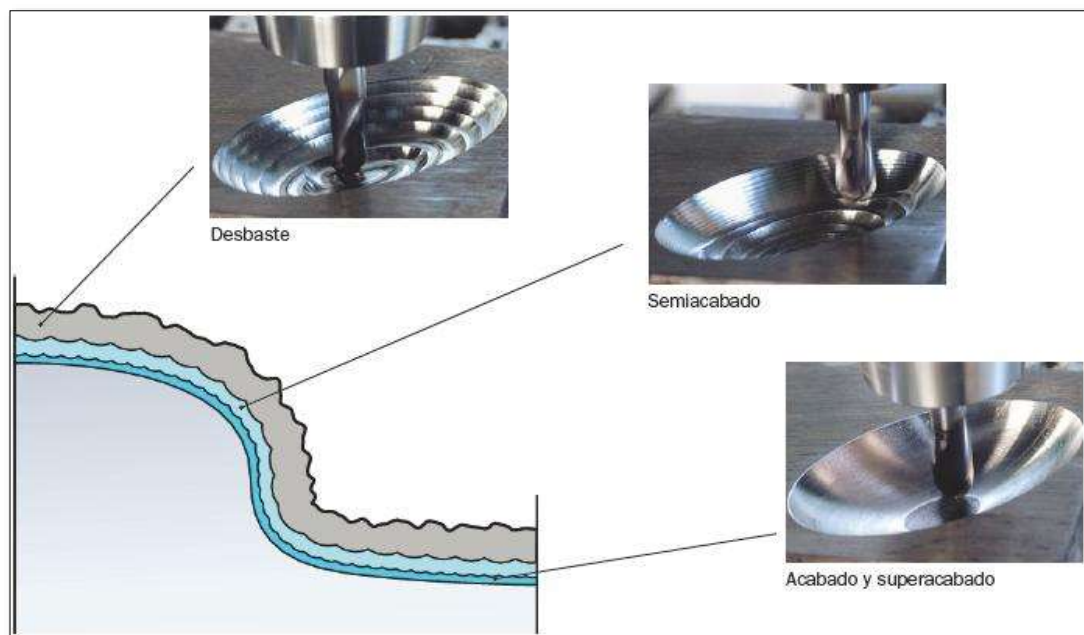


Figura 11. Procesos para un acabado.

Fuente: (Sandvik, 2010)

Para lograr un acabado en la superficie a mecanizar, se tiene que generar dos operaciones previas los cuales son, el desbaste y semi acabado para alcanzar la máxima productividad en estas operaciones, es importante adaptar el tamaño de las fresas a cada operación, **Figura 11**.

Estas operaciones previas se crean para generar una tolerancia de trabajo distribuida uniformemente, y reducir los cambios de carga y dirección de cada herramienta.

La mejor calidad de acabado superficial se logra cuando las operaciones previas dejan crestas pequeñas y constantes.

La superficie de una pieza tiene dos aspectos importantes que deben ser definidos y controlados. El primer aspecto es la irregularidad de la superficie y segundo la alteración metalúrgica en la superficie y la capa superficial. (Aaron, 1995, pág. 44)

- La rugosidad superficial consiste en pequeñas irregularidades en la textura de la superficie, usualmente estas irregularidades influyen para la producción de procesos durante el maquinado.
- Las ondulaciones (waviness) en la textura son componentes espaciados más ampliamente en la superficie y pueden ser resultado de factores tales como máquina de trabajo o deflexiones, vibración y traqueteo.
- (Lay) es la dirección del patrón de superficie predominante.
- Los defectos (flaw) son creados involuntariamente, e inesperados como grietas o crestas.
- (Peaks), picos de la superficie mecanizada.
- (Valleys), valles de la superficie mecanizada.

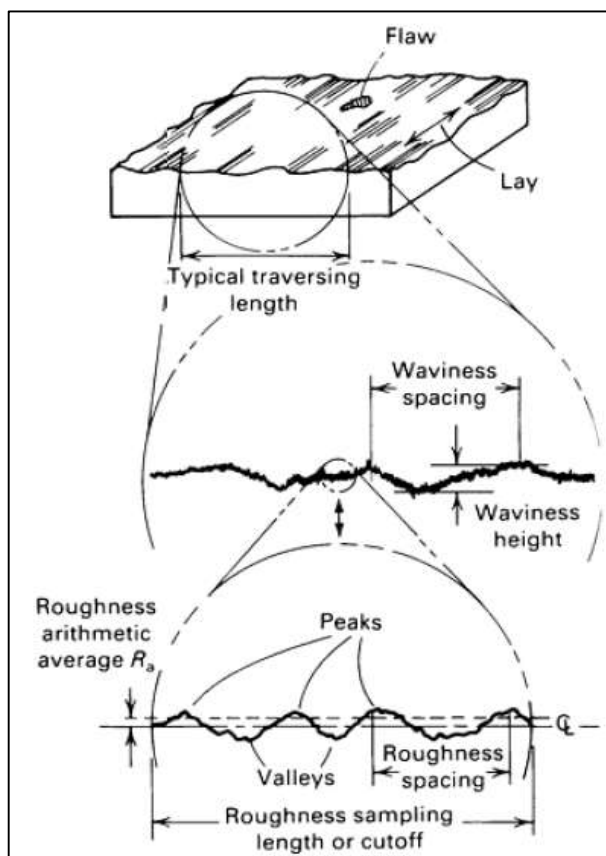


Figura 12.Esquema de la rugosidad y ondulaciones en una superficie, en una dirección y altura de ondulación.

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 44).

La rugosidad superficial y las ondulaciones **Figura 12**, pueden ser medidas por una variedad de instrumentos. La técnica más usada para medir la rugosidad de una superficie es con un lápiz óptico de tipo de contacto, este instrumento proporciona un valor numérico para la rugosidad superficial.

Estos instrumentos pueden proporcionar generalmente una indicación de la rugosidad en función de la medida aritmética Rugosidad promedio (Ra).

Figura 13.

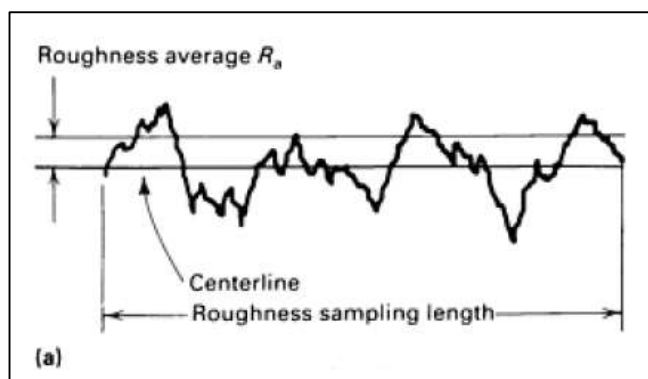


Figura 13. Medida aritmética Ra.

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 45).

Ecuación Rugosidad promedio Ra:

$$Ra = \frac{1}{L} * \int_{x=0}^{X=L} |y| dx \quad (6) \text{ (Aaron, 1995, pág. 45).}$$

Donde:

L= Longitud a medir

y= Ordenada del perfil desde la línea central.

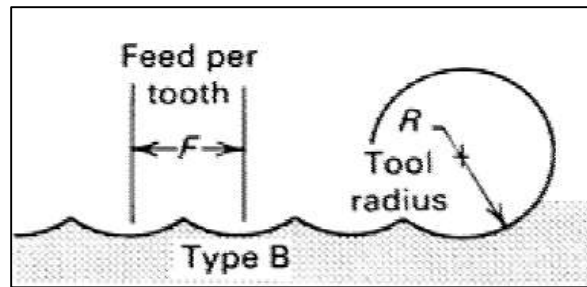


Figura 14. Acabado superficial en modelos de fresado con herramientas de punta redonda.

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 52).

Feed per tooth: Avance por diente.

Tool radius: Radio de la herramienta.

2.6.1. RUGOSIDAD SUPERFICIAL PRODUCIDA EN EL PROCESO DE MANUFACTURA.

El método predominante de producción para superficies es por el proceso de maquinado, a pesar de que algunos acabados superficiales resultan de técnicas primarias tales como extrusión, forjado o fundición.

Cada método de producción superficial tiene diferentes características y rangos de rugosidad superficial, algunos se muestran en la **Tabla 9**. Un acabado fino es generalmente producido por técnicas de maquinado.

Tabla 9.
Rugosidad superficial producida por diferentes métodos de producción. Los rangos que muestran son típicos de los procesos listados. Los altos y bajos valores se obtienen bajo condiciones especiales.

Proceso	Promedio de rugosidad (Ra), μm												
	50	25	13	6	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,03	0,01
Oxicorte	Menos frecuente	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente									
Acerrado	Menos frecuente	Promedio	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente								
Cepillado	Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente						
Perforado			Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente						
Fresado químico			Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente						
Maquinado eléctrico			Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente						
Fresado		Menos frecuente	Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente					
Brochado				Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente						
Escariado				Menos frecuente	Promedio	Promedio	Menos frecuente						
Laser				Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente					
Electroquímico			Menos frecuente	Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente			
Torneado		Menos frecuente	Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente	Menos frecuente	Menos frecuente	Menos frecuente	Menos frecuente	
Pulido							Menos frecuente	Promedio	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente	Menos frecuente	Menos frecuente
Lapeado							Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente	Menos frecuente
Súper acabado							Menos frecuente	Menos frecuente	Promedio	Promedio	Promedio	Menos frecuente	Menos frecuente

Promedio	Promedio
Menos frecuente	Menos frecuente

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 50).

2.6.2. RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y TOLERANCIAS DIMENSIONALES.

La rugosidad superficial está estrechamente ligada a la exactitud o tolerancia de la máquina y proceso a utilizar **Tabla 10**. Una estrecha tolerancia de dimensión requiere un acabado muy fino, y el acabado de un componente a un valor muy bajo de rugosidad puede requerir múltiples operaciones de mecanizado incrementando así el costo de producción.

Tabla 10
Clasificación de acabado superficial según el tipo de maquinado.

Clase	Rugosidad, Ra	Tolerancia adecuada	Típico método de producción de acabado	Costo relativo aproximado
	μm	mm		
Súper acabado	0,1	0,0125	Lustrado, micro afilado, lapeado	40
Pulido	0,2	0,0125	Lustrado, afilado, lapeado	35
Lustrado	0,4	0,025	Lustrado, lapeado	25
Desbaste	0,8	0,05	Lustrado, fresado	18
Fino	1,6	0,075	Fresado, lustrado, escariado	13
Semi fino	3,2	0,1	Lustrado, fresado, torneado	9
Medio	6,3	0,175	Conformado, fresado, Torneado	6
Semi áspero	12,5	0,33	Fresado, torneado	4
áspero	25	0,635	Torneado	2
Limpieza	50	1,25	Torneado	1

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 51).

2.6.3. GRÁFICAS DE RUGOSIDAD EN EL FRESADO DE ACABADO.

En el proceso de fresado, se han realizado varios estudios sobre la influencia de los parámetros de corte. Así pues se presenta la relación de la velocidad de corte en función de los parámetros de rugosidad, en el acabado superficial, para lo cual se muestra la **figura 15**. (Blanco, 2013):

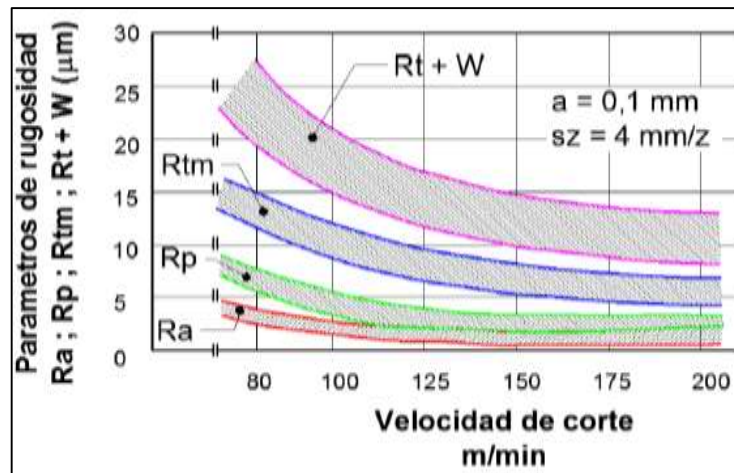


Figura 15. Influencia de la velocidad de corte en función de los parámetros de rugosidad.

Fuente: (Blanco, 2013)

a = Profundidad de corte.

s_z = avance por diente.

Siendo, (R_a), desviación media del perfil. (R_p), suavizado profundo. (R_{tm}), promedio de rugosidad y (R_{t+W}), Rugosidad más rizado.

2.7. SUPERFICIES CURVAS O LIBRES

Estas superficies son diseñadas para cumplir o mejorar una necesidad que no sea estética sino más bien funcional y aplicable.



Figura 16. Mecanizado de superficies libres, molde cuchara.

Fuente: Propia.

Al realizar el mecanizado de una superficie libre es necesario controlar la máxima altura de scallop (cúspide), y el gauge (interferencia). Para una superficie libre a mecanizar, la altura del scallop no debe exceder la máxima tolerancia permitida por los requerimientos del acabado requerido y en generación de la trayectoria de la herramienta la pieza de trabajo debe estar libre de interferencias, por esta razón son utilizadas las herramientas de punta esférica. (Lasemi, 2010)

Los gouges o interferencias que causan problemas en el maquinado se las puede clasificar en, **Figura 17**:

-Gouge Local: cuando el radio efectivo de la curvatura de la herramienta de corte en el punto de corte de contacto es mayor que la superficie.

-Gouge posterior: cuando la parte inferior de la herramienta interfiere con la superficie en los puntos diferentes al punto de contacto.

-Gouge global: cuando la pieza de trabajo y áreas de no corte de la herramienta se chocan, como el husillo, eje de la herramienta de corte o el porta herramienta.

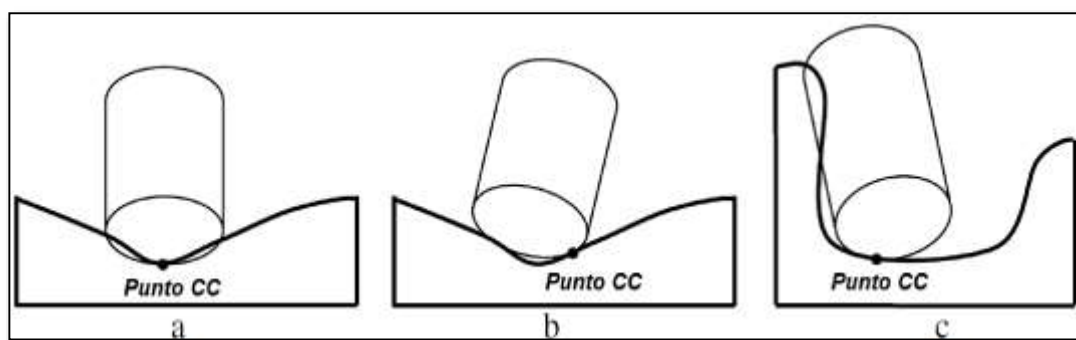


Figura 17. Interferencia en el maquinado, (a) Local (b) Posterior (c) Global.

Fuente: (Lasemi, 2010).

2.8. GENERACIÓN DE LA TRAYECTORIA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE.

La planificación, generación y evaluación del recorrido de la herramienta de corte para el mecanizado de superficies curvas, **Figura 18** es una labor importante del programador de CAM (manufactura asistida por computador). Se deben aplicar parámetros y restricciones a zonas de seguridad específicas del recorrido de la herramienta para cada una de las etapas del mecanizado, para generar una calidad óptima de la superficie mecanizada y confianza al mecanizar.

La programación de la trayectoria de la herramienta de corte en el mecanizado, está definido por un patrón de movimiento de la herramienta, para cortar el material y generar la superficie deseada. Así como también se define el paso lateral entre cada pasada del recorrido.

El uso adecuado de una trayectoria de corte beneficia a resultados como:

- Tiempo de mecanizado considerablemente más corto.
- Mejor utilización de máquina y herramienta.
- Mejora de la calidad superficial.
- Menos trabajo de acabado y pulido manual, muy laborioso.
- Mayor productividad.
- Vida útil de la herramienta de corte.

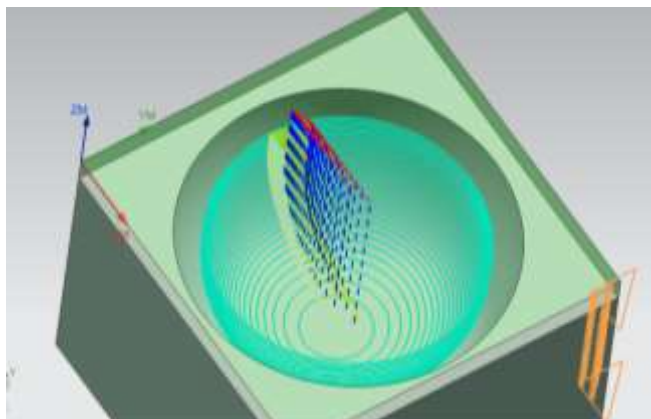


Figura 18. Trayectoria de la herramienta de corte para el mecanizado en una superficie convexa.

Fuente: propia.

2.9. PARÁMETROS DE LA TRAYECTORIA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE.

En cada corte generado en la pieza de trabajo, la trayectoria que recorre la herramienta esta generada en un programa CAM, con parámetros de recorrido específicos para cada aplicación y acabado superficial según la necesidad del diseñador.

En el mecanizado, los trazos de corte son una secuencia de puntos de contacto de corte a lo largo del patrón de recorrido de la superficie curva.

El tiempo de mecanizado varía con el tipo de recorrido de la herramienta de corte, el método utilizado y el tipo de máquina de herramienta utilizada.

Para el fresado de acabado, en superficies curvas, los recorridos más utilizados son un vía y dirección paralela.

Existen varios parámetros como:

- Método de corte : acabado, semi acabado, acabado final.
- Trayectoria, **Figura 19.**

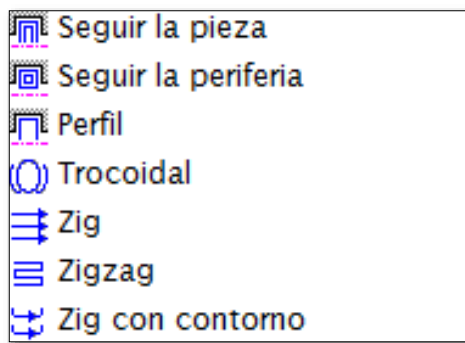


Figura 19. Tipos de trayectorias.

Fuente: Propia.

- Profundidad radial.
- Distancia de seguridad
- Demasía, Stock.
- Movimientos de entrada, retroceso, movimiento en vacío.

2.9.1. MAQUINADO CON ESTRATEGIA PARALELA.

En el diseño de la trayectoria de mecanizado paralela, cada pasada del recorrido generado, está en paralelo con referencia con una línea predefinida. **Figura 20 a.** Esta línea predefinida adecuada es paralela a un límite superficial o paralela al eje de un sistema de coordenadas generadas en el diseño del maquinado. El recorrido zig-zag es un recorrido de dirección paralela. **Figura 20a.**

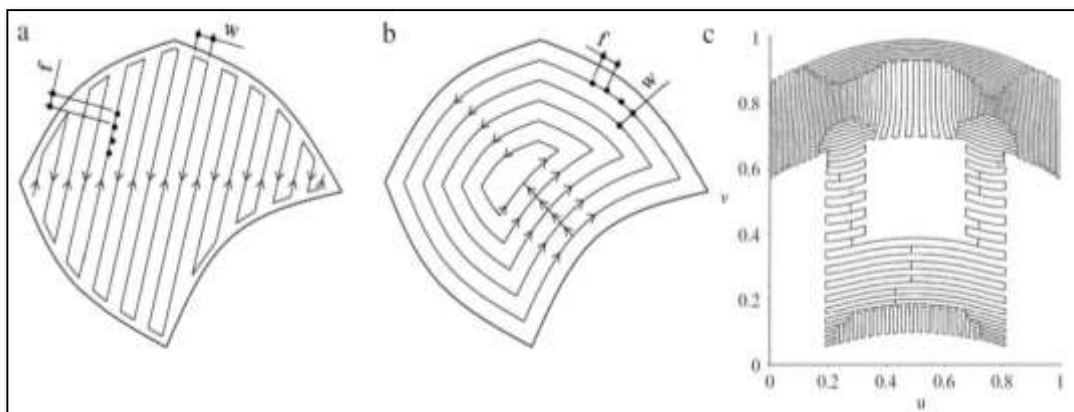


Figura 20. Tipos de recorrido de herramienta (a) Dirección paralela (b) Espiral (c) Curvas adaptivas.

Fuente: (Lasemi, 2010).

2.9.2. MECANIZADO SCALLOP.

La estrategia Scallop genera una altura constante por toda la superficie mecanizada, indistintamente de las características de forma de la superficie, si esta cambia o va cambiando su forma. **Figura 21.** La altura de los scallops (cúspide), son permanentes sobre el conjunto de superficies a mecanizar .

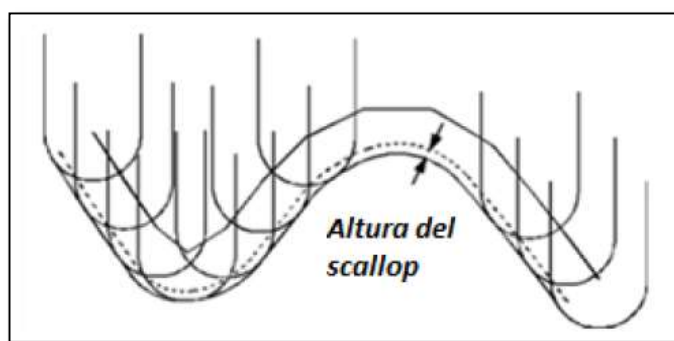


Figura 21. Estrategia de mecanizado-Scallop.

Fuente: (Lasemi, 2010).

2.9.3. PARÁMETROS DE LA TRAYECTORIA DE MECANIZADO

Los patrones de recorrido de la herramienta de corte, tienen parámetros que permiten especificar el paso lateral y el paso hacia adelante, según la necesidad del diseñador. La diferencia en efecto del resultado de mecanizado, está vinculado con estos parámetros .

El paso lateral en una trayectoria de mecanizado, es definido por la altura de scallop, el estado y geometría de la superficie a mecanizar así como la geometría de la herramienta. El planteamiento del paso lateral y el paso hacia adelante, esta relacionado con la cantidad de puntos de contacto de corte en la estrategia de mecanizado. Un considerable número de puntos de contacto de corte,hará que la superficie parezca más precisa pero esto generará más tiempo del proceso.

Cuando el eje de la herramienta de corte no tiene inclinación, la velocidad de corte en el pico de una herramienta de punta esférica es nulo, esta circunstancia de corte es perjudicial y conduce a cualidades defectuosas en la superficie de la pieza a mecanizar y el desgaste de la herramienta de corte. (Shyong Chen & Huang, 2005).

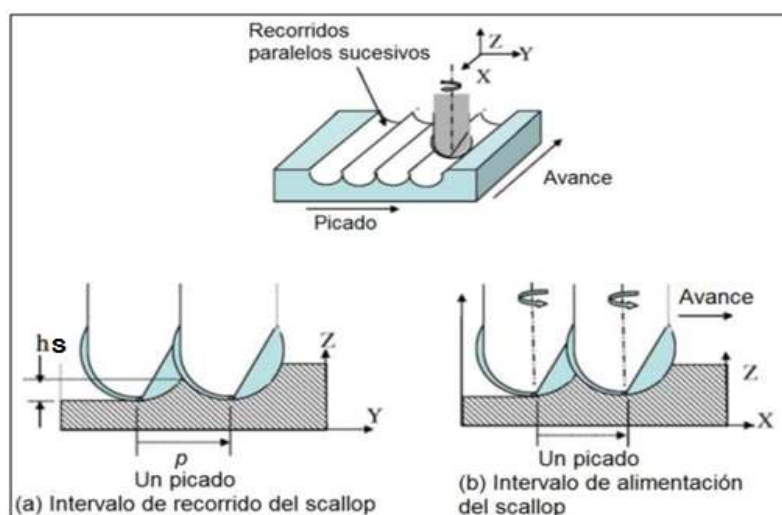


Figura 22. Recorrido e intervalos de avance en el mecanizado con una herramienta de corte de punta esférica.

Fuente: (Shyong Chen & Huang, 2005)

Donde h_s : es la altura de scallop o cúspide

En la **Figura 22 (a)**, se manifiesta el recorrido scallop, con paso lateral, de una herramienta de corte con punta esférica, debido a esta geometría esférica, se observa la generación de la trayectoria de mecanizado, en la pieza de trabajo. Acorde a la forma esférica de la punta de la herramienta de corte, otro tipo de intervalo de avance del scallop se genera en el avance por diente; **Figura 22 (b)**.

A lo largo de una trayectoria de corte generada, el fresado con herramienta de punta esférica hace que el borde de corte de la herramienta, cambie frecuentemente durante el giro del husillo.

Los principales parámetros que determinan una estrategia de mecanizado, desde la perspectiva de la geometría son:

- La dirección del mecanizado.
- El paso lateral.
- El paso hacia adelante.

La importancia de la calidad geométrica en una superficie mecanizada procede de la relación entre los parámetros de mecanizado, como el cálculo del paso lateral, paso hacia delante y el movimiento de corte primario. El diseñador, al generar la trayectoria de la herramienta, une un conjunto de puntos específicos en la programación y luego al controlador numérico de la máquina herramienta de control numérico computarizado (CNC) (Quinsat & Sabourinb, 2008).

El recorrido de herramienta de corte formado, puede ser calificado por los criterios de calidad y eficiencia:

- Calidad: la programación del recorrido de la herramienta de corte debe estar libre de interferencias y la altura del scallop o cúspide debe estar dentro de la tolerancia especificada por el diseñador.

- Eficiencia: Eficiencia en la simulación basada en el tiempo que demora en el procesamiento de la unidad central de procesamiento (CPU) y el programa CAM además eficiencia en el tiempo real de mecanizado.

Capítulo 3 : APLICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE MATERIALES Y HERRAMIENTAS

3.1. APLICACIÓN.

Las aleaciones de aluminio, como lo indica (Shnihirova, 2016), son muy usadas en la industria aeronáutica, en vehículos, matrices, motores utensilios y herramientas, en los últimos años se han creado nuevos conceptos para diseñar y fabricar piezas de aleaciones de aluminio y materiales de auto curación con revestimientos inteligentes para protección de la corrosión, generando así una mayor vida útil de las piezas de aluminio que tengan formas libres.



Figura 23. Ejemplo de aplicación de superficies libres molde de cucharas.

Fuente: Propia.

(Wang, 2016), Se enfoca en la producción más limpia y la sostenibilidad ya que estas son de vital importancia en el campo de los procesos de mecanizado donde se consume gran cantidad de energía. La reducción del consumo de energía durante el proceso de mecanizado puede mejorar significativamente el rendimiento medioambiental y económico de los

sistemas de producción, para esto se requiere determinar los parámetros de corte adecuados para el proceso.

3.2. DESGASTE DE LA HERRAMIENTA DE CORTE.

El desgaste de las herramientas de corte es generado por las altas cargas normales en la superficie de la pieza de trabajo. La acción de corte y fricción en estas superficies de contacto aumentan la temperatura del material de la herramienta, lo que acelera aún más los procesos físicos y químicos asociados con el desgaste de la herramienta.

Con el fin de eliminar el material no deseado, estas fuerzas y movimientos son necesarios; por tanto, el desgaste de la herramienta de corte es un problema de producción para las industrias manufactureras.

El diseñador o ingeniero de mecanizado debe establecer un sistema que:

- Seleccione las máquinas herramientas adecuadas y herramientas de corte para producir las características geométricas de un material particular.
- Asegurar los sistemas de distribución de la herramienta para lograr la calidad que tiene la geometría requerida.
- Especificar la velocidad correcta de corte y avance de la herramienta.
- Tener en cuenta el coste de la máquina herramienta, y la herramienta de corte que permite una idea clara del objetivo económico para el sistema de mecanizado.

3.2.1. TEMPERATURA DE LA HERRAMIENTA DE CORTE EN LA ZONA DE DESGASTE.

La diferencia entre la tasa de liberación de energía térmica y la energía térmica de disipación, determina la tasa de disipación de la temperatura de los materiales en la zona de desgaste. (Wang, 2016) La disipación de

energía térmica es una función de las propiedades de conductividad térmica del material para herramientas y la pieza de trabajo. El fluido de corte juega un papel importante en la transferencia de calor así como en la vida útil de la herramienta de corte (Wright, 2016).

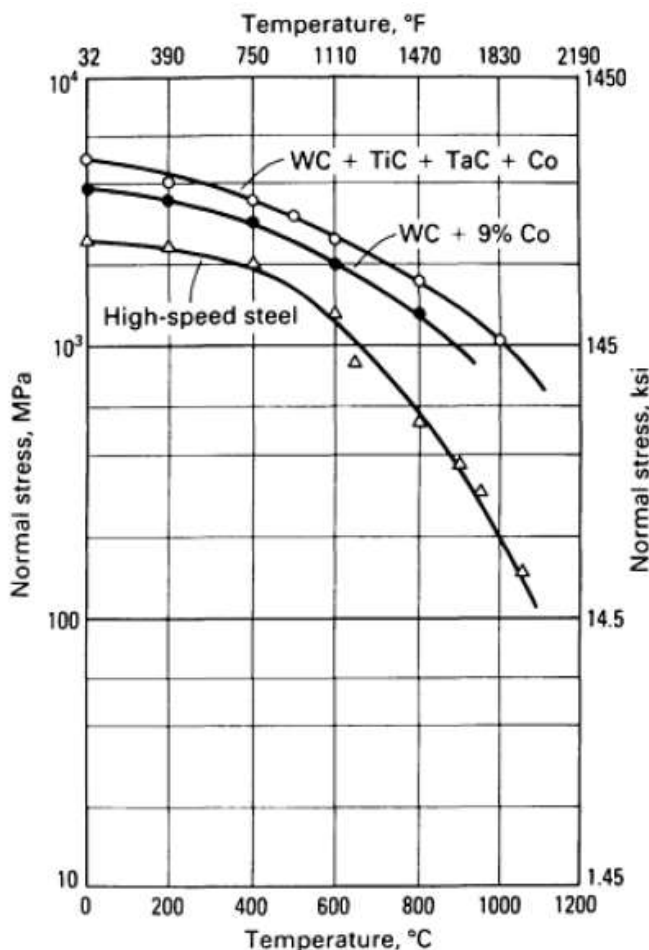


Figura 24. Material de herramientas de corte, esfuerzo como función de la temperatura. Acero rápido, tungsteno y carbono.

Fuente: (Wright, 2016).

El criterio del límite de desgaste o fallo, es una decisión importante que debe hacerse en el proceso de desarrollo del modelo de la vida de la herramienta.

(Yuefeng, Wuyi, & Liansheng, 2010), en su investigación, relaciona los vínculos estadísticos de los parámetros de corte en el fresado, como el desgaste inicial de las herramientas y periodos de desgaste uniforme de la

herramienta en el maquinado. En consecuencia el informe expone la relación entre el desgaste durante un periodo inicial y el desgaste en un periodo uniforme.

3.3. HERRAMIENTA DE PUNTA ESFÉRICA.

Las fresas radiales, también conocidas como fresas de punta redonda, tienen una semiesfera en el extremo de la herramienta.

Las fresas radiales son usadas en el mecanizado de moldes, matrices y piezas de trabajo muy complejas para la industria aeroespacial y otros campos industriales. El filo de corte y la geometría de la herramienta, en el proceso de maquinado al contacto con la pieza de trabajo, puede ser analizado mediante geometría, cuando este se ha establecido **Figura 25**.

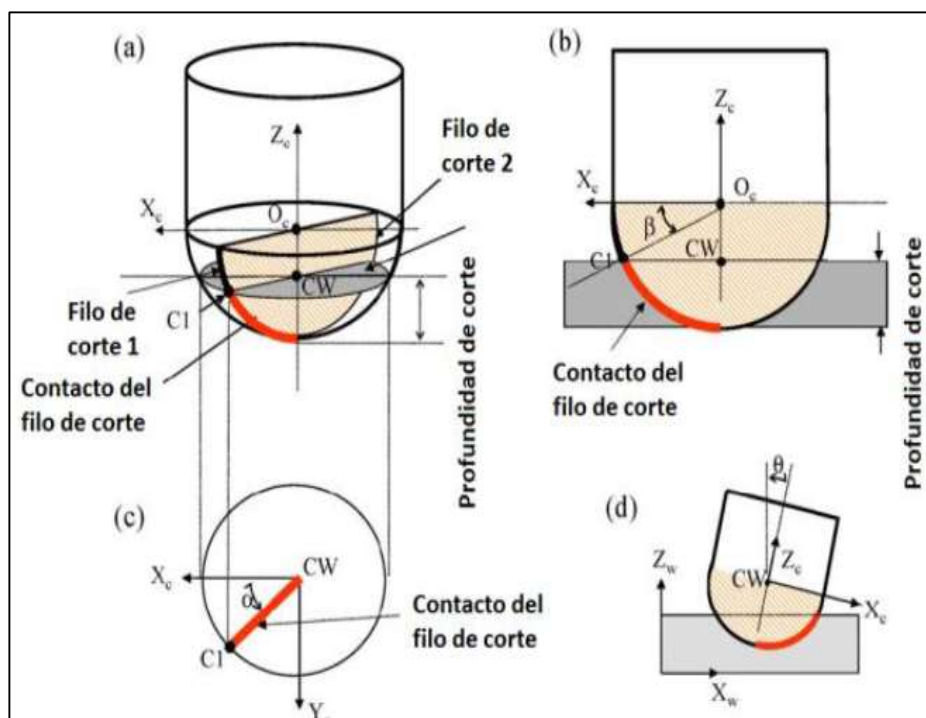


Figura 25. Contacto parcial del filo de corte de una herramienta de punta esférica.

Fuente: (Yang & Chen, 2001)

(Radzevich, 2002) sugiere en su estudio las condiciones para mecanizar una superficie compleja o libre:

- La superficie libre a ser mecanizada no debe presentar interferencias en el punto de contacto ni sus bordes, para generar una condición de contacto apropiada.
- Se debe evitar la interferencia global, de la superficie a mecanizar con la herramienta de corte .
- Es necesario una tolerancia de precisión en la superficie mecanizada, para que los scallops o cúspides permanezcan dentro del margen permitido.

La **Figura 26** y **Figura 27** muestran una superficie cóncava y convexa mecanizada con una herramienta de punta redonda mediante una trayectoria y la **ecuación 7** y **ecuación 8**, calculan aproximadamente los puntos de contacto de corte para estas superficies, para un “scallop” constante y un ángulo de inclinación de 0° . (Lin & Koren, 1996).

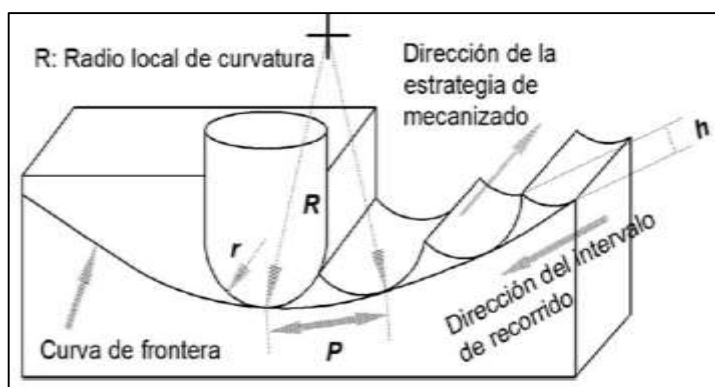


Figura 26. Mecanizado de una superficie cóncava con herramienta de punta esférica en dirección transversal.

Fuente: (Lin & Koren, 1996).

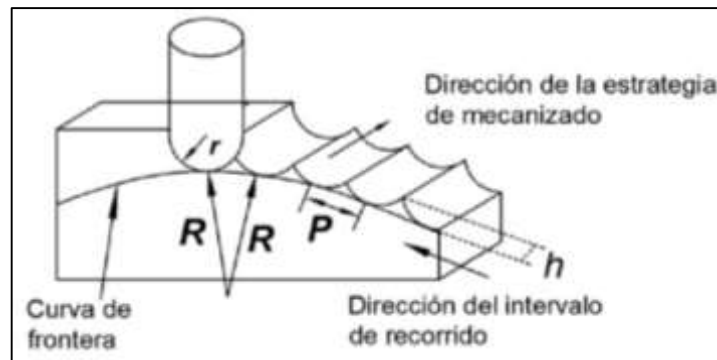


Figura 27. Mecanizado de una superficie convexa con herramienta de punta esférica en dirección transversal.

Fuente: (Lin & Koren, 1996).

Donde :

P= Paso entre pasada de corte, (picado)

R= Radio de superficie.

h= Altura de scallop o cúspide.

r= Radio de la herramienta

Para superficie cóncava:

$$P = \sqrt{\frac{8 * h * r * R}{R - r}}$$

(7) (Lin & Koren, 1996)

Para superficie convexa:

$$P = \sqrt{\frac{8 * h * r * R}{R + r}}$$

(8) (Lin & Koren, 1996)

3.4. FRESA NO INCLINADA, FRENTE A FRESA INCLINADA.

Cuando se utiliza una fresa de punta esférica, el área más crítica del filo es el centro de la herramienta, donde la velocidad de corte se aproxima a cero,

dato muy poco beneficioso para el proceso de mecanizado **Figura 28**. (Sandvik, 2010) La evacuación de la viruta en el centro de la herramienta es crítico, debido al espacio tan estrecho que presenta el bisel. Por tanto, se recomienda inclinar el husillo o la pieza entre 10 y 15 grados, para desplazar la zona de corte del centro de la herramienta y garantizar así el número de filos eficaces, obteniendo:

- Velocidad de corte mínima más alta.
- Optimización de la vida útil de la formación de viruta.
- Mejor acabado superficial.

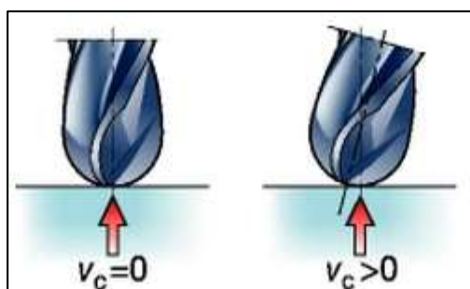


Figura 28. Fresado tridimensional, fresa inclinada.

Fuente: (Sandvik, 2010)

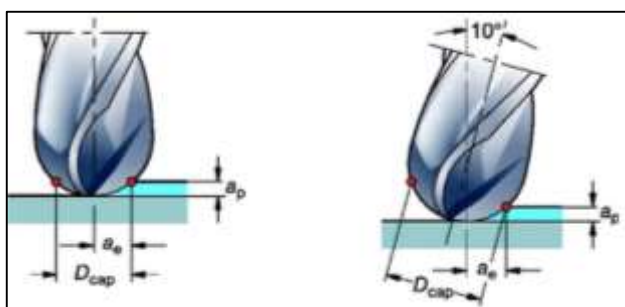


Figura 29 Fresado tridimensional, fresa inclinada.

Fuente: (Sandvik, 2010)

Donde:

D_{cap} = Diámetro efectivo.

a_e =Profundidad radial

a_p =Profundidad axial.

Al inclinar la herramienta va cambiar el diámetro efectivo ya que tendrá más área de corte, pero mantendrá constante la profundidad radial y la profundidad axial.

3.5. HERRAMIENTA DE CORTE.

(Sette, Diniz, & Pederiva, 2010), investigan la geometría de la herramienta de punta esférica, en el cual expone la influencia del ángulo de entrada de la herramienta en el mecanizado, la investigación expone que ángulos de entrada, de 8° a 15°, suministran un corte estable y ayudan a conservar la vida útil de la herramienta.

(Ribeiro, Moreira, & Ferreira, 2003), examinan que la variedad de avances y velocidades de corte, que ofrecen una vida útil de la herramienta, están fundamentados en los materiales apropiados, geometría, revestimiento y fluido de corte, los cuales son significativos en el proceso de corte.

Por otro lado, (Lopez de la calle, Préz, & Llorente, 2000), buscan y analizan una mejora en la productividad en el proceso de fresado, investigando las propiedades y la influencia de la herramienta de corte, material de recubrimiento, forma y geometría de esta, en función a los parámetros del proceso. Los parámetros para el proceso de corte, que fueron analizados y probados experimentalmente generan notoriamente un aumento de la eficiencia en el proceso de fresado.

3.6. FLUIDO DE CORTE.

El fluido de corte se utiliza normalmente con herramientas, para mecanizado de alta velocidad como es el caso de acero inoxidable, cobre y aleaciones resistentes al calor. Aluminio y aleaciones de magnesio y hierro gris pueden

ser cortados en seco con una óptima aplicación de parámetros de corte, el fluido de corte se utiliza más para el hierro maleable y nodular. (Aaron, 1995, pág. 244)

La selección del líquido para el corte de metales depende de varios factores interrelacionados, algunos de estos factores también no tienen que ver con el corte de metales en particular sino se basa en la limpieza después del mecanizado, efectos adversos sobre la salud y la seguridad del operador y costo del fluido.

Sin embargo los criterios técnicos para una selección del fluido de corte dependen del material, tolerancia deseada, vida de la herramienta, acabado de la superficie la **tabla 11** da unas directrices generales para la elección de fluidos de corte según el material a trabajar y de la operación de mecanizado.

Tabla 11
Guía de selección de fluidos para corte.

MATERIAL	Operación
	Fresado, perforado.
Aleaciones de aluminio	E2c,d;S2c, d; O4d

Para utilizar una operación de fresado en el aluminio 7075.

E2c, d; Emulsión, presión extrema, concentrado o diluido.

S2c, d; Solución, presión extrema, diluida.

O4d; Aceite mineral + grasa+ cloro.

Fuente: (Aaron, 1995, pág. 253).

Para el experimento se utilizó refrigerante “SOLUBLE OIL D”, este es un aceite compuesto emulsionante para el enfriamiento y lubricación de las herramientas de corte, hecho bajo especificaciones muy exactas para asegurar una emulsión estable con el agua **Figura 30** y cumple con las especificaciones para el mecanizado de aluminio 7075, con una mezcla de 25:1, el primer número indica partes de agua y el segundo número indica partes soluble Oil D, sus características y hoja técnica se dan en el **anexo 1**.



Figura 30. Aplicación de refrigerante soluble oil D.

Fuente: Propia

3.7. MECANIZADO DE SUPERFICIES CÓNCAVAS Y CONVEXAS.

(Jiang, Scott, & Whitehouse, 2007) dispone que diseños geométricos difíciles o complejos de superficie para mecanizar, se designan como libres o curvas. En la mayor parte de los casos, estas superficies están comprometidas a poseer precisión de forma y topografía. Complementariamente, (Wei & Lin, 2005) muestran que superficies libres o curvas se emplean considerablemente en sistemas CAD (Diseño asistido por computador)/CAM (manufactura asistida por computador), para diseñar y detallar la superficie de piezas complejas, la producción como por ejemplo moldes de inyección o soplado, así como de matrices, para este tipo de superficies, es necesario el uso de un centro de mecanizado CNC (Control numérico computarizado) con

múltiples ejes **Figura 31**, utilizando para la generación del perfil herramientas de punta esférica y punta plana. En el desarrollo y la optimización con relación a la fabricación de superficies curvas o libres, (Chen & Song, 2006), exhiben que la trayectoria de la herramienta y el tiempo de mecanizado, es de vital importancia para obtener resultados de calidad en la manufactura de partes con superficies curvas, en centros de mecanizado vertical.



Figura 31. Mecanizado de superficies libres en centro de mecanizado vertical 5 ejes.

Fuente: Propia.

Para este tipo de mecanizado es necesario estudiar minuciosamente el perfil de la pieza con objeto de seleccionar las herramientas correctas y encontrar el método más adecuado por lo cual se debe tener en cuenta las siguientes indicaciones.

- Estimar la cantidad de material que va ser devastado.
- El mecanizado debe realizarse las máquinas específicas para conseguir una buena precisión y acabado superficial.
- Se debe tratar de conseguir ahorros importantes en tiempo y procesos en programas CAM.
- Se debe considerar dos procesos previos desbaste y semi acabado, antes de generar un acabado.

3.8. TRAYECTORIA DE MECANIZADO.

En el mecanizado de superficies libres o curvas la trayectoria de mecanizado es un parámetro significativo para la calidad superficial. (Wei, Wang, & Zhu, 2011), explican con encuestas en industrias manufactureras, que la estrategia más empleada en el mecanizado, es la trayectoria de zig-zag **Figura 32**. Complementariamente, (Quinsata, Lavernhe, & Lartigue, 2011) en su investigación presentan que la rugosidad de las superficies curvas o libres tienen una influencia directa con la trayectoria de la herramienta y parámetros de corte.

La finalidad de una estrategia de mecanizado, ya sea una vía, zig-zag o espiral, es sostener en el mecanizado de la pieza a una altura de scallop adecuada. (Feng & Huiwen, 2002) señala que en el mecanizado, menor número de trayectorias generan una altura del scallop constante, alcanzando así una precisión de mecanizado determinada.

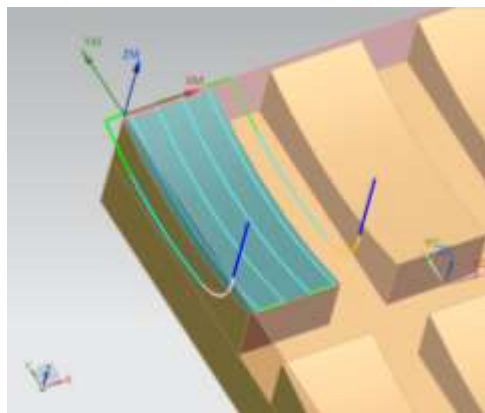


Figura 32. Programación de trayectoria ZIG-ZAG , en probeta cóncava.

Fuente: Propia.

3.9. INTEGRIDAD SUPERFICIAL.

El acabado superficial durante el mecanizado de alta velocidad influye sobre la exactitud dimensional así como en las propiedades de la pieza mecanizada, por ejemplo la resistencia a la corrosión y la fatiga. Los esfuerzos residuales, transformaciones de fase, agrietamiento superficial,

son factores que influyen sobre la integridad superficial en este proceso, para Puerta Velásquez et al (Puerta, Tibu, Bolle, & Chevrier, 2010), identifican el principal efecto de la velocidad de corte sobre la integridad superficial pues este influye en la microestructura de la superficie de la pieza de trabajo al mecanizar.

Otros parámetros que influyen en la calidad superficial, en el proceso de mecanizado como la profundidad de corte y la tasa de avance hacen que el valor de la rugosidad superficial incremente.

Otro tipo de parámetros que influyen en la integridad superficial son la geometría de la herramienta y el recubrimiento de esta.

En consecuencia el efecto de estos parámetros, y el uso de los valores adecuados generan que las condiciones en el proceso de corte estudiadas sean exitosas y amplían la eficacia en el fresado.

3.10. FORMACIÓN DE VIRUTA.

El material que se desprende de un material en un proceso de maquinado como el fresado, torneado o máquinas similares se lo nombra como viruta, este tipo de viruta es de tres tipos y esta genera por diferentes parámetros.

- Viruta discontinua.
 - ✓ Material de trabajo frágil.
 - ✓ Baja velocidad de corte.
 - ✓ Vibración excesiva de la máquina.
 - ✓ Avance grueso.
- Viruta continua.
 - ✓ Material dúctil de trabajo.

- ✓ Avances finos.
 - ✓ Ángulo de ataque de la herramienta de corte grande.
 - ✓ Altas velocidades de corte.
 - ✓ Bordos en perfecto estado.
- Viruta continúa con borde acumulado.

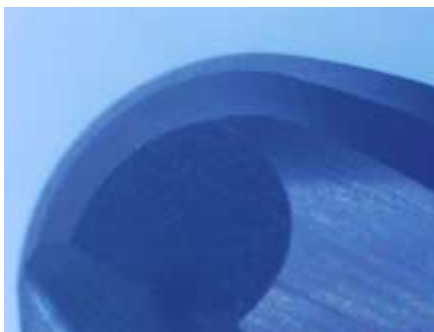
Este tipo de viruta se genera al mecanizar una pieza en condiciones poco óptimas como por ejemplo el mecanizado de una pieza a baja velocidad con una herramienta de corte de alta velocidad sin la utilización de refrigerante. Esta genera que se incremente la temperatura en el filo de corte y se empiece a formar una acumulación de material sobre los bordes del elemento.

(Sun & Guo, 2008) proporciona en su investigación, un análisis orientado a determinar los atributos, la estructura y elementos de la viruta. Este estudio expone, que el material retirado al momento de mecanizar muestra incrementos de dureza dependiendo del material de su composición.

(Fontaine & Moufki, 2007) estudian la generación de la viruta y fuerzas de corte para herramientas de punta esférica, producidas por el corte de la herramienta en superficies libres. La aplicación de este modelo de estudio, es para trayectorias rectas, pero en superficies libres.

3.11. MECANIZADO CON HERRAMIENTA DE PUNTA ESFÉRICA.

La herramienta de corte con punta esférica, **Figura 33**, tiene una gran influencia en la calidad generada en superficies libres o complejas. El procesos de fresado con herramienta de punta esférica es utilizado en la manufactura de moldes, prótesis, implantes, álabes entre otros. Este tipo de piezas se caracterizan por su forma compleja y sus exigentes requerimientos de calidad superficial y forma.



**Figura 33. Filo de corte herramienta MASTERCUT de punta esférica.
Fuente: Propia.**

El control numérico computarizado de múltiples ejes es el proceso más utilizado para obtener piezas complejas con herramientas de punta esférica, pues se puede controlar las combinaciones de superficies con curvaturas y demás exigencias como el ángulo de inclinación de la herramienta para su total eficiencia en el corte. El uso de herramientas de punta esférica es más complejo y sensible por su planificación y verificación del proceso de maquinado.

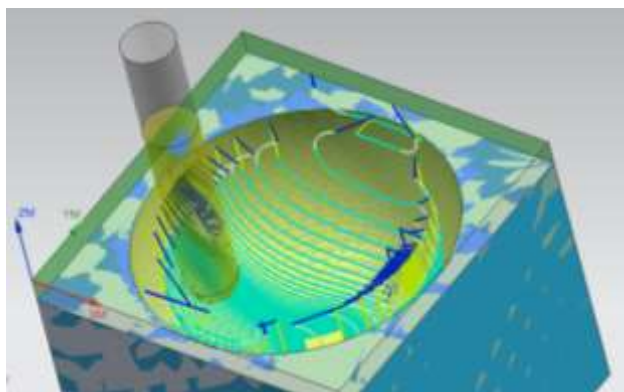


Figura 34. Generación de mecanizado con punta esférica en superficie libre.

Fuente: Propia.

En las máquinas virtuales se puede realizar una simulación del proceso de maquinado, generando más confianza en el operador y pudiendo detectar colisiones o procesos no adecuados esto es muy beneficioso para todo

proceso especial para el mecanizado de superficies libres con herramienta de punta esférica.

(Vakondios, Kyratsis, & Yaldiz, 2012) hace un estudio de las estrategias de fresado, con herramienta de punta esférica, en el cual expone que las estrategias afectan y están relacionadas con la calidad de la superficie realizada.

(Salami, 2007) analizan y describen geoméricamente la herramienta de corte con punta esférica con todos los ángulos y formas de esta los cuales influyen en el proceso de corte. (Mukherjee, 2006), hace un análisis de la importancia del mecanizado de superficies complejas para la industria, expone el gran crecimiento de las industrias manufactureras, y la optimización de parámetros para los procesos de corte, pues estos generan un aumento en la productividad, reducción de costos, tiempo y aumento de la calidad de productos.

3.12. METROLOGÍA.

La metrología es la rama de la física que estudia las mediciones de las magnitudes, certificando su normalización mediante la trazabilidad, esta disminuye la inseguridad en las medidas, generando un rango de tolerancia, que incluye el estudio y aplicación de pesos y medidas (DECEN, 2017).

El conocimiento de la metrología y su práctica en la industria e investigación es de gran importancia para el desarrollo de la ingeniería de producción como el control de calidad, si estamos al control y mejoramiento de procesos de manufactura ya que estos procesos requieren rigurosos requerimientos de diseño, lo que necesitan ser estudiados y medidos.



Figura 35. Laboratorio de metrología "Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE".

Fuente: (DECEM, 2017)

La metrología cubre tres actividades principales:

- La definición de las unidades de medida por métodos científicos.
- La realización de las unidades de medida por métodos científicos
- El establecimiento de las cadenas de trazabilidad, determinando y documentando el valor y exactitud de una medición.

El desarrollo del mecanizado de superficies libres, impulsa a nuevos métodos de medición y precisión para la investigación y optimización del proceso, por tal motivo, (Zhao, Li, & Wang, 2006) exhiben un método para la medición de superficies libres pequeñas, mediante un sensor de fibra óptica.

Los resultados de las mediciones aportan un diseño para la medición de rugosidad en superficies curvas.

Los modelos de superficies libres, son significativos para cuantiosos estudios de tipos estadísticos de superficies rugosas, en base a los picos generados en el mecanizado. Por otra parte, (Weckenmann, Jiang, & Sommer, 2009) indican que el desarrollo industrial con lleva al uso de superficies curvas en el mecanizado, de nuevos prototipos y estos a su vez deben cumplir requisitos de precisión y complejidad con lo cual, la metrología dimensional están aumentando.

Para reducir la incertidumbre en la medición de superficies libres y generar una confianza en la tolerancia de medición se usan métodos de fusión de datos multi-sensor.

3.13. MÉTODO TAGUCHI.

El método propuesto por el Dr. Taguchi en 1960 es extensamente usado en la industria y estudios científicos, desde que se aplica no se requiere cálculos matemáticos complejos y se puede determinar fácilmente la optimización de un proceso. Taguchi desarrollo un método para el diseño de experimentos el cual investiga, como diferentes parámetros afectan la media y la varianza en el desempeño de un proceso. El análisis de investigaciones con el método estadístico Taguchi es la más efectiva herramienta para analizar los resultados de un experimento. El método es aplicado en tres partes principales como el diseño del sistema, parámetros de diseño y tolerancia de diseño **Figura 36.**

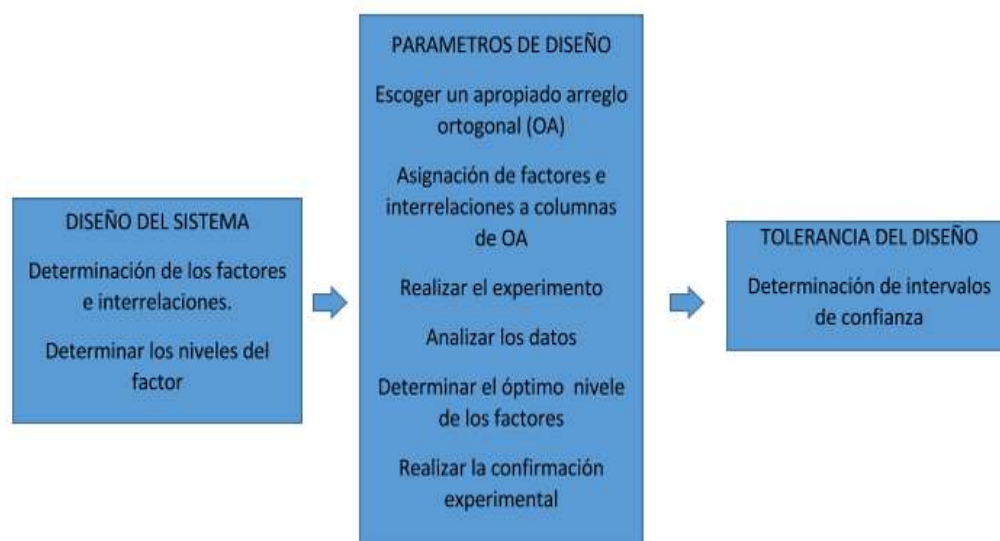


Figura 36. Aplicación del método Taguchi en las tres partes principales de un diseño.

Fuente: Propia.

En el diseño del sistema, es donde se determinan los factores que afectan el experimento y sus niveles de aplicación, determinando a estos con conocimientos de ciencia e ingeniería.

Los parámetros de diseño son la parte más importante del método Taguchi ya que estos parámetros van a confirmar y predecir los resultados del experimento. La tolerancia del diseño determina el rango de aceptación, si la medida de las pruebas se encuentra dentro de este rango, se acepta el método y consigue la optimización con suficiente exactitud (Murat, 2013).

3.13.1. VARIABLES Y FACTORES PARA EL METODO TAGUCHI.

Los parámetros de corte que afectan a la rugosidad superficial tales como la velocidad de corte, avance, profundidad y la trayectoria de la herramienta de corte, son determinados aplicando el sistema de diseño. Para el experimento se debe determinar todas las variables directas a utilizar, las cuales se dan

en la **tabla 12**. Los factores elegidos y sus niveles se dan en la **tabla 13**, una velocidad de corte constante para aleaciones de aluminio, con una herramienta de carburo con 5 mm de diámetro y una profundidad radial de 0,025 mm, así se sugiere una velocidad de corte de (60,50,40) m/min, a esta velocidad no excederemos el límite de la maquinaria para las revoluciones máximas del husillo en rpm. Especificada la velocidad de corte, calculamos el avance en mm/min con lo cual tenemos los tres niveles para este factor; (975, 586, 367).(mm/min). Los niveles de la trayectoria de la herramienta son: una vía, zig-zag, espiral. Las profundidades están de acuerdo a la relación profundidad/rugosidad, y profundidad axial permitida por el diámetro de la herramienta por lo cual son 0,2 mm, 0,4mm, y 0,7mm.

Tabla 12.
Materiales y herramientas .

Material	Aluminio 7075.
Herramienta	Punta esférica, 5 mm, 2 flancos
Material Herramienta	Carburo, K20
Centro de mecanizado	FADAL VMC 3016

Fuente: Propia

Tabla 13
Factores escogidos y sus niveles.

	Factores	Unidades	Niveles		
			1	2	3
A	Velocidad de corte	m/min	60	50	40
B	Avance	(mm/min)	975	586	367
C	Trayectoria	-	Una vía	Espiral	Zig-zag
D	Profundidad de corte	(mm)	0,2	0,4	0,7

Fuente: Propia.

3.13.2. EJEMPLO DE CÁLCULO.

De= Diámetro efectivo.

Rh= Radio de la herramienta.

Ap= profundidad de corte axial.

$$Rh = 2,5 \text{ mm}$$

$$Ap = 0,2 \text{ mm}$$

$$De = 2 * \sqrt{Rh^2 - (Rh - Ap)^2} = 1,96 \text{ mm}$$

$$Vc = \text{velocidad de corte} \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right).$$

Nr = velocidad de rotación (rpm).

$$Vc = 197 \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right).$$

$$Nr = \left(\frac{Vc * 1000}{\pi * De} \right) = 31993,39 \text{ (rpm)}$$

Con esta velocidad excedemos el valor máximo de revoluciones del husillo que es 10000 rpm. Por tanto tendremos bajar la velocidad de corte para entrar en el rango de revoluciones permitido.

Interacción 2.

$$Vc = 98 \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right).$$

$$Nr = \left(\frac{Vc * 1000}{\pi * De} \right) = 15918,81 \text{ (rpm)}$$

Interacción 3.

$$V_c = 60 \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right).$$

$$N_r = \left(\frac{V_c * 1000}{\pi * D_e} \right) = 9744,18 \text{ (rpm)}$$

Avance

Número de dientes

$$z_c = 2.$$

Viruta por diente.

$$f_z = 0,05\text{mm}.$$

$$\text{Avance} = z_c * f_z * N_r = 974,41 \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right).$$

Tabla 14. Selección de viruta por diente en función del diámetro de la herramienta y material.

Avance recomendado (viruta por diente) para fresas de acero de alta velocidad											
Diámetro de la fresa		Acero de máquina		Acero de herramientas		Hierro fundido		Bronce		Aluminio	
in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm
1/8	3.17	0.0005	0.01	0.0005	0.01	0.0005	0.01	0.0005	0.01	0.002	0.05
1/4	6.35	0.001	0.02	0.001	0.02	0.001	0.02	0.001	0.02	0.003	0.07
3/8	9.52	0.002	0.05	0.002	0.05	0.002	0.05	0.002	0.05	0.003	0.07
1/2	12.7	0.003	0.07	0.002	0.05	0.003	0.07	0.003	0.07	0.005	0.12
3/4	19.05	0.004	0.10	0.003	0.07						
1	25.4	0.005	0.12	0.003	0.07	0.004	0.10	0.004	0.10	0.007	0.17

3.13.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO TAGUCHI.

El primer paso es determinar el diseño apropiado del arreglo ortogonal (AO) que va ser usado en el experimento, para tener una exactitud en el análisis estadístico y tiempo /costo del proceso. Un arreglo ortogonal, se puede

comparar con una replicación factorial fraccionada, de manera que conservan el concepto de ortogonalidad y contraste. Según el método Taguchi el número de grados de libertad del arreglo ortogonal seleccionado, debe ser mayor o igual al total de grados de libertad requerido para el experimento (Aggarwal, Singh, & Kumar, 2008). El DF, del experimento es calculado por la adicción de los grados de libertad de los factores e iteraciones usados en el sistema. El (DF) del factor relacionado se calcula mediante la extracción de “1” a partir del número de niveles del factor. Los grados de libertad del experimento se calculan con la ecuación (6). Acorde con esto, el número de (DF) del experimento es 20. En otras palabras, el DF para el experimento que incluye los factores con igual número de niveles es calculado como se muestra:

$$DF=(n_1-1) \times n_f +(n_1-1) \times (n_1-1) \times n_i \quad (9) \text{ (Murat, 2013).}$$

$$DF=20.$$

Donde n_1 es el número de los niveles de los factores igual a 3, n_f el número de factores igual a 4 y n_i el número de interacciones igual a 3. El AO, L27 tiene (DF=26) tiene 27 filas y 13 columnas este es el arreglo seleccionado para el experimento. El diseño experimental consiste en 27 ensayos, en los cuales las columnas del (AO) se han asignado los factores y sus interacciones por el método lineal. **Fig. 37.**

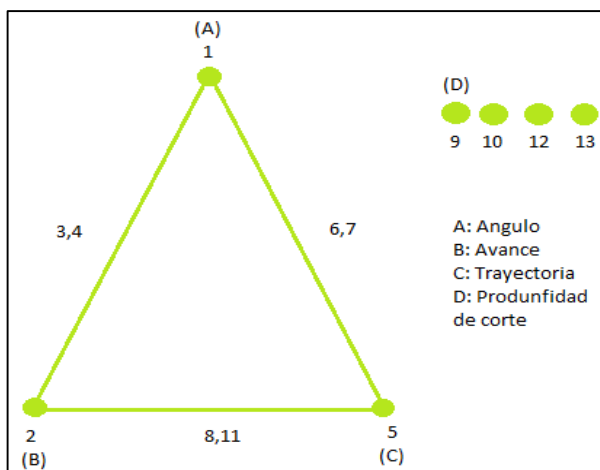


Figura 37. Aplicación gráfica lineal del L27 AO.

Fuente: (Murat, 2013).

Al fundamentarse en el gráfico lineal de la Fig.35 la primera columna es asignada al valor de la velocidad de corte (A), la segunda columna a la tasa de avance (B), la quinta columna a la trayectoria (C), la novena columna a la profundidad de corte (D) y el resto de columnas están asignadas a las interacciones (AxB, AxC y BxC) en el AO **tabla 15**. La **tabla 16** se utilizará para las pruebas en las superficies cóncavas como en las convexas.

Tabla 15
Arreglo ortogonal con factores e interrelaciones asignados a las columnas.

PRUEBA N°	COLUMNS NO												
	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

Fuente: (Murat, 2013).

Tabla 16
Combinación de niveles y factores para la superficie cóncava y convexa.

Prueba N°	(A) Velocidad de corte (m/min)	(B) Avance(mm/min)	(C) Trayectoria	(D) Profundidad de corte(mm)
1	60	975	Una vía	0,2
2	60	975	Espiral	0,4
3	60	975	ZiG-Zag	0,7
4	60	586	Una vía	0,4
5	60	586	Espiral	0,7
6	60	586	ZiG-Zag	0,2
7	60	367	Una vía	0,7
8	60	367	Espiral	0,2
9	60	367	ZiG-Zag	0,4
10	50	975	Una vía	0,4
11	50	975	Espiral	0,7
12	50	975	ZiG-Zag	0,2
13	50	586	Una vía	0,7
14	50	586	Espiral	0,2
15	50	586	ZiG-Zag	0,4
16	50	367	Una vía	0,2
17	50	367	Espiral	0,4
18	50	367	ZiG-Zag	0,7
19	40	975	Una vía	0,7
20	40	975	Espiral	0,2
21	40	975	ZiG-Zag	0,4
22	40	586	Una vía	0,2
23	40	586	Espiral	0,4
24	40	586	ZiG-Zag	0,7
25	40	367	Una vía	0,4
26	40	367	Espiral	0,7
27	40	367	ZiG-Zag	0,2

Fuente: Propia.

Capítulo 4 : MAQUINADO

4.1. MATERIALES

4.1.1 MAQUINARIA.

El maquinado de las probetas fue realizado en el centro de mecanizado FADAL VMC 3016, **Figura 38**, del laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las fuerzas Armadas “ESPE”. En la **tabla 17** se muestran las principales especificaciones.

Tabla 17
Datos técnicos principales FADAL VMC 3016.

3016 SPECIFICATIONS	3016 STANDARD	3016 METRIC
Table Size	39" x 16"	750 mm x 406 mm
Floor to Table	31"	787 mm
T-Slots (No. x Width x Span)	3 x .562" x 4.33"	3 x 14 mm x 110 mm
Cutting Feed Rate	.01-400 ipm (600 @ 150%)	.25-10,160 (15,240 at 150%) mm/min.
Rapid Feed Rate (X/Y/Z)	900 ipm (X/Y) 700 ipm (Z)	22.8 m/min. (X,Y) 17.7 m/min (Z)
Max. Weight on Table	2,736 lbs.	1,241 kg.
Axis Drive Motor (X/Y/Z)	AC, 3,800 lbs peak thrust	AC, 16,900 N* thrust
Ball Screw Size	40mm Dia. (X/Y/Z)	
Longitudinal (X Axis)	30"	762 mm
Cross (Y Axis)	16"	406 mm
Vertical (Z Axis)	20" (28" Opt.)	508 mm (711 mm Opt.)
Spindle Nose to Table	4"-24" (4"-32" Opt.)	102 mm-610 mm (102 mm-813 mm)
Spindle Center to Column Ways	16"	406 mm
Main Motor - Automatic 2 Speed Vector	15 HP*, 11.2 KW	
Opt. HT Motor - Automatic 2 Speed Vector	22.5 HP*, 16.8 KW	
Torque	160 ft-lbs, 220 ft-lbs (HT)	220 Nm/300 Nm
Accuracy, Axis Positioning	± .0002"	.0050 mm
Accuracy, Axis Repeatability	± .0001"	.0025 mm
Glass Scales (X/Y/Z)	Optional	
Spindle Speed	10-10,000 rpm (15,000 Opt.)	
Spindle Orientation	Electromechanical	
Spindle Taper	No. 40	
ATC, Number of Tools	21	

Fuente:(Electric, 2002, pág. 15)



Figura 38. FADAL VMC 3016.

Fuente: Propia.

Para el experimento se realizaron las mediciones de la rugosidad de las superficies en el laboratorio de Metrología de la Universidad de las fuerzas Armadas “ESPE”, con el rugosímetro marca Taylor- Hobson modelo Talysurf 5. **Figura 39.**



Figura 39. Rugosímetro Taylor Surf

Fuente: Propia.

Las mediciones se tomaron con las siguientes características y parámetros:

El rango esperado de rugosidad es de 0,1- 2 μm , **Tabla 19**, esto por el proceso utilizado que es el fresado, el respectivo cut off es de 0,8mm con un recorrido de 5,6 mm o 7,2mm, a una velocidad de 2mm/segundo con una magnificación de x5000 **tabla 18**, esto por el valor de rugosidad máximo esperado.

Tabla 18
Valores de magnificación dependiendo del valor máximo de Ra.

Ra(μm)	Magnificación
50	X100
25	X200
10	X500
5	X1000
2,5	X2000
1	X5000
0,5	X10000
0,25	X20000
0,1	X50000
0,05	X100000

Fuente: Propia

Tabla 19
Valores de recorrido cut off dependiendo del valor de Ra.

Ra (μm)	λ (mm)	In (mm)	It (mm)	Recorrido
0,006...0,02	0,08	0,4	0,48	0,56 o 2,16
0,02...0,1	0,25	1,25	1,5	1,75 o 3,5
0,1...2	0,8	4	4,8	5,6 o 7,2
2...10	2,5	12,5	15	10 o 17,5
10...80	8	40	48	32 o 56

Fuente: Propia

Donde:

λ = cutt off

l_n = Longitud total de medición

l_t = Longitud de recorrido

El rugosímetro es un instrumento que sirve para realizar la medida de la rugosidad superficial de un elemento, el rugosímetro determina electrónicamente el perfil de pieza en una sección transversal con respecto a la dirección de las estrías. El rugosímetro **Figura 40**, mide el valor de la rugosidad media R_a , expresada en micras; 1micra= $1\mu\text{m}=0.000001\text{ m}=0.001\text{ mm}$. Así como también puede realizar diferentes tipos de medidas.

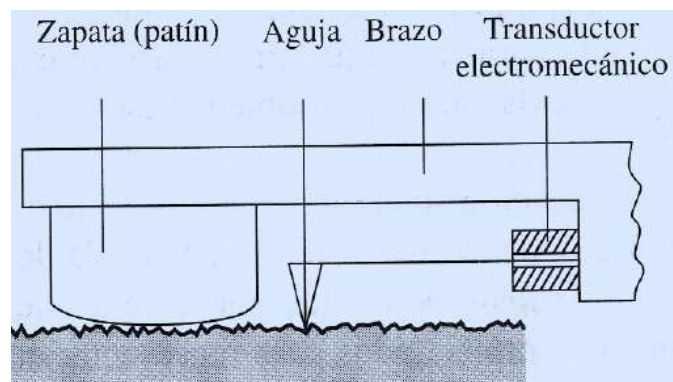


Figura 40.Esquema del proceso de medición.

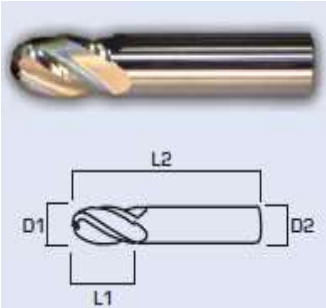
Fuente: Propia

4.2 HERRAMIENTA.

La herramienta es una fresa de punta esférica de carburo, diseñada para una alta resistencia al desgaste del filo, a continuación se muestra la herramienta y sus características en la **tabla 20**.

Tabla 20.
Descripción de la herramienta de corte.

Herramienta	
Marca	Mastercut
Modelo	81685
Característica	Punta redonda
Filos de corte	2
Trabajo	End Mill
D1	5 mm
L1	22 mm
L2	70 mm
D2	10 mm



Ángulos de incidencia aproximados	
Ángulo de incidencia primario	8°
Ángulo de incidencia secundario	12°
Ángulo de salida	25°

Fuente: (Mastercut, 2014).

Tabla 21
Revestimiento Power A.

Revestimiento	Power A
Dureza	1000HV (Vickers)
Espesor de revestimiento	2-4 μm
Estabilidad térmica	900°C

Fuente: (Mastercut, 2014).

Power A **Figura 41**, es un revestimiento que supera el rendimiento del carburo para aplicaciones de maquinado. Tiene una dureza de 1000 HV (Vickers).



Figura 41. Revestimiento.

Fuente: (Mastercut, 2014)

Tabla 22.
Materiales óptimos para trabajar con la herramienta.

Material a maquinar	Power A
Aluminio y aleaciones, Bajo en silicio < 10%	X
Aluminio y aleaciones, Alto en silicio > 10%	X
Titanio, aleaciones de titanio	X

Fuente: (Mastercut, 2014).

Tabla 23.
Valores de velocidad recomendada para aleaciones de aluminio.

Fresado de acabado velocidad y avance		Milímetro por diente			
		Ø	Ø	Ø	Ø
Material	Velocidad de corte (m/minuto)	Hasta 6,35mm	6,35-12,7mm	12,7-19,05mm	19,05-25,25,4mm
Aleaciones de aluminio	183-366	0,0254-0,0750	0,0508-0,1016	0,1016-0,1524	0,1524-0,2032

Ø= Diámetro de la herramienta de corte.

Fuente: (Mastercut, 2014).

Por lo tanto los valores recomendados por master cut para un diámetro efectivo de 5 mm es una velocidad de corte de 183- 366s/mm y una avance de corte por diente de 0,0254- 0,0750mm.

4.3 MÉTODOS.

El diseño para el mecanizado del experimento es de 27 probetas con superficie cóncava y 27 con superficie convexa, fue considerado con las siguientes medidas, radio de profundidad de 1.5mm, de ancho 8 y 20mm de largo, como lo indica la **figura 42**.



a) Probeta en forma cóncavas
Convexas



b)Probeta en forma

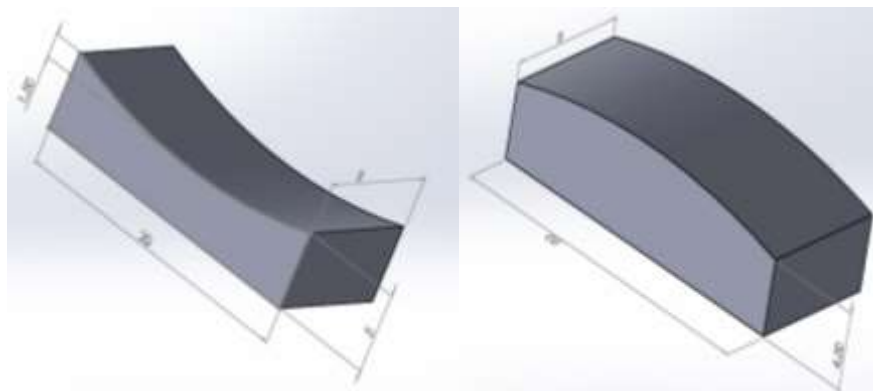


Figura 42. Diseño de Probetas.

Fuente: Propia.

Para el diseño de las probetas se tomó en cuenta las medidas y geometría que se utilizan en los patrones comunes para calibrar rugosímetros. **Figura 43**



Figura 43. Patrón para comprobación de rugosímetro.

Fuente: Propia.

Este patrón **Figura 43**, mostrado está hecho de níquel sólido electro conformado. Cuenta con 30 probetas cada una de 20x10mm Tiene diferentes tipos de acabado de superficie en diferentes procesos de maquinado como lo son lapeado, escariado, rectificado, fresado horizontal, fresado vertical.

4.4 SIEMENS NX.

NX, conocido como Siemens NX o Unigraphics, es un paquete de software CAD/CAM/CAE desarrollado por la compañía Siemens Software. (Ming, 2010)

Sus usos, entre otros, son los siguientes:

- Diseño (modelado paramétrico y directo de sólidos/superficies)
- Análisis para ingeniería (estático, dinámico, electromagnético y térmico usando el método de elementos finitos, y análisis de fluidos usando el método de volúmenes finitos).
- Manufactura digital para la industria de la maquinaria.

Siemens NX ofrece una variedad de recursos de software de manufactura asistida por computadora (CAM), para la programación de mecanizado y coordinación de máquina-herramienta, simulación y generación de post procesamiento de mecanizado. El avance de NX CAM en cada versión

maximiza las operaciones y aplicaciones que se pueden crear generando una confianza y retorno de la inversión de esta tecnología. (Ming, 2010)

NX, es usado en una gran cantidad y variedad industrias como por ejemplo; la industria automotriz, aeroespacial, moldes y de dispositivos médicos, ya que brinda gran utilidad en la manufactura.

4.4.1. CAPACIDADES AVANZADAS DE PROGRAMACIÓN

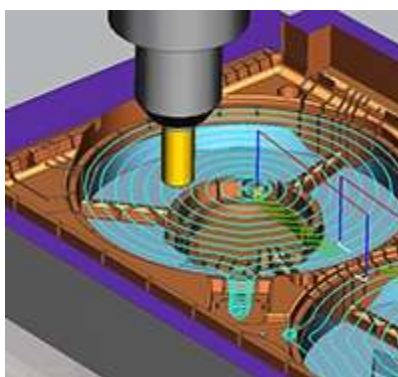


Figura 44. Siemens NX, modelado CAM.

Fuente: (Ming, 2010).

El software NX CAM brinda una amplia variedad de funcionalidades y aplicaciones, desde una básica programación de control numérico, hasta el maquinado de alta velocidad y múltiples ejes de trabajo, esto posibilita el mecanizado para muchos tipos de trabajo. NX CAM es una gran herramienta para producir todo tipo necesidad en CAM .

NX CAM permite trabajar con:

- Fresado de 2.5 Ejes de NX CAM
- Hilo Erosión de NX CAM
- Fresado de 3 Ejes de NX CAM
- Maquinado de Alta Velocidad

- Fresado de 5 Ejes de NX CAM
- Torneado NX CAM
- Programación de Piezas de Maquinaria

4.5. PROGRAMACIÓN DEL MAQUINADO EN NX.

Las 27 combinaciones de niveles y factores para el maquinado de probetas son programadas en NX en una licencia estudiantil de prueba. Y post-procesadas para su manufactura en el centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016 a continuación se describen los pasos a realizar para las probetas cóncava.

- a. Importación del diseño sólido a NX
- b. Creación de herramientas
 - Fresa de frontal de 4mm, HSS, posición en ATC (cambiador automático de herramientas) T2(Posición de herramienta 2).
 - Fresa de punta esférica 5mm , HSS, posición en ATC T4.
- c. Punto (CSB), cero de pieza.
- d. Definición de pieza y material en bruto.
- e. Creación de operación
 - Elección de operación.
 - Selección de estrategia de mecanizado en las superficies seleccionadas.
 - Configuración de avances, velocidades, profundidad de corte axial, radial, trayectoria.
 - Desbaste de perfil

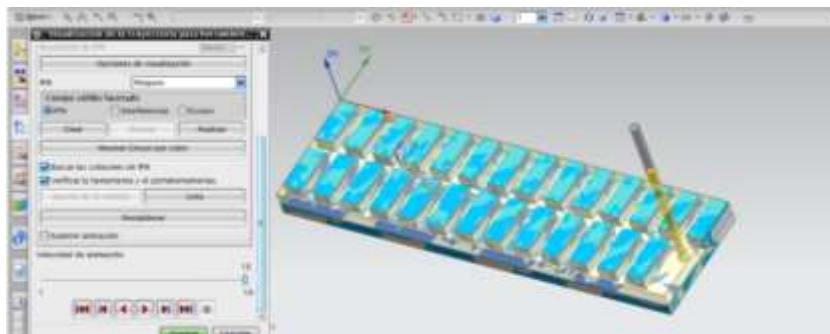


Figura 45. Desbaste de perfil.

Fuente: Propia.

- Desbaste de probetas

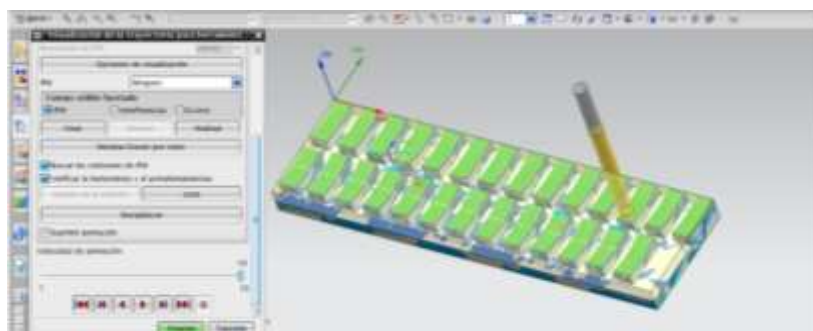


Figura 46. Desbaste de probetas.

Fuente: Propia.

- Fresado de semi acabado y acabado

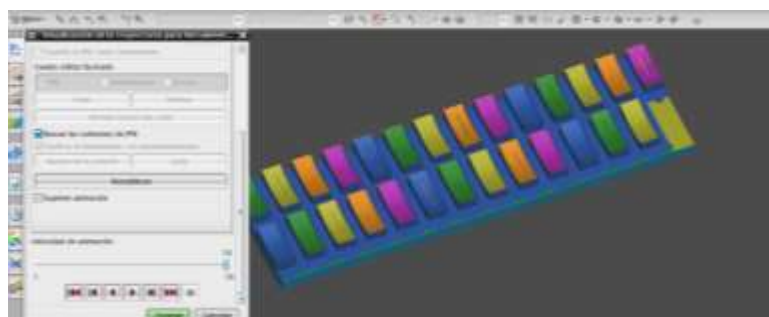


Figura 47. Fresado de acabado.

Fuente: Propia.

- Post- procesado

El post- procesado se lleva a cabo una vez terminado la simulación del mecanizado, para transformar en coordenadas que la computadora de la máquina procesa en este caso es un post- procesador específico para la el centro de mecanizado vertical VMC Fadal 3016. Ejemplo de inicio de código G. **Anexo 2.**

4.6. MAQUINADO DE LAS PROBETAS

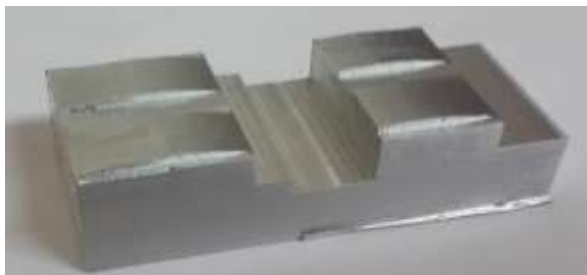


Figura 48 Superficie cóncava mecanizada.

Fuente: Propia.



Figura 49 Superficie convexa mecanizada.

Fuente: Propia.

Tabla 24
Datos experimentales para superficies Cónccavas.

Prueba N°	(A) Velocidad de corte (m/min)	(B) Avance (mm/min)	(C) Trayectoria	(D) Profundidad de corte(mm)	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Rpromedio (μm)
1	60	975	Una vía	0,2	0,62	0,52	0,56	0,567
2	60	975	Espiral	0,4	0,4	0,42	0,45	0,423
3	60	975	ZiG-Zag	0,7	0,64	0,31	0,47	0,473
4	60	586	Una vía	0,4	0,39	0,3	0,345	0,345
5	60	586	Espiral	0,7	0,27	0,5	0,385	0,385
6	60	586	ZiG-Zag	0,2	0,48	0,74	0,61	0,610
7	60	367	Una vía	0,7	0,38	0,47	0,425	0,425
8	60	367	Espiral	0,2	0,79	0,64	0,715	0,715
9	60	367	ZiG-Zag	0,4	0,82	0,8	0,78	0,800
10	50	975	Una vía	0,4	0,62	0,75	0,639	0,670
11	50	975	Espiral	0,7	0,5	0,45	0,4	0,450
12	50	975	ZiG-Zag	0,2	0,35	0,45	0,5	0,433
13	50	586	Una vía	0,7	0,23	0,26	0,25	0,247
14	50	586	Espiral	0,2	0,64	0,42	0,5	0,520
15	50	586	ZiG-Zag	0,4	0,6	0,64	0,62	0,620
16	50	367	Una vía	0,2	0,24	0,37	0,32	0,310
17	50	367	Espiral	0,4	0,42	0,22	0,34	0,327
18	50	367	ZiG-Zag	0,7	0,87	0,88	0,79	0,847
19	40	975	Una vía	0,7	0,41	0,34	0,36	0,370
20	40	975	Espiral	0,2	0,55	0,54	0,53	0,540
21	40	975	ZiG-Zag	0,4	0,6	0,57	0,55	0,573
22	40	586	Una vía	0,2	0,55	0,54	0,53	0,540
23	40	586	Espiral	0,4	0,58	0,47	0,53	0,527
24	40	586	ZiG-Zag	0,7	0,64	0,7	0,72	0,687
25	40	367	Una vía	0,4	0,35	0,4	0,39	0,380
26	40	367	Espiral	0,7	0,55	0,55	0,6	0,567
27	40	367	ZiG-Zag	0,2	0,71	0,65	0,62	0,660

Fuente: Propia.

Tabla 25
Datos experimentales para superficies Convexas.

Prueba N°	(A) Velocidad de corte (m/min)	(B) Avance (mm/min)	(C) Trayectoria	(D) Profundidad de corte (mm)	Ra1 (µm)	Ra2 (µm)	Ra3 (µm)	Rmean (µm)
1	60	975	Una vía	0,2	0,385	0,155	0,258	0,266
2	60	975	Espiral	0,4	0,519	0,443	0,412	0,458
3	60	975	Zig-zag	0,7	0,446	0,48	0,43	0,452
4	60	586	Una vía	0,4	0,285	0,146	0,301	0,244
5	60	586	Espiral	0,7	0,57	0,493	0,488	0,517
6	60	586	Zig-zag	0,2	0,49	0,467	0,522	0,493
7	60	367	Una vía	0,7	0,305	0,253	0,528	0,362
8	60	367	Espiral	0,2	0,409	0,398	0,456	0,421
9	60	367	Zig-zag	0,4	0,506	0,55	0,48	0,512
10	50	975	Una vía	0,4	0,393	0,513	0,654	0,520
11	50	975	Espiral	0,7	0,496	0,501	0,524	0,507
12	50	975	Zig-zag	0,2	0,723	0,668	0,691	0,694
13	50	586	Una vía	0,7	0,211	0,216	0,473	0,300
14	50	586	Espiral	0,2	0,588	0,988	0,791	0,789
15	50	586	Zig-zag	0,4	0,74	0,826	0,837	0,801
16	50	367	Una vía	0,2	0,403	0,241	0,277	0,307
17	50	367	Espiral	0,4	0,603	0,618	0,582	0,601
18	50	367	Zig-zag	0,7	0,703	0,721	0,706	0,710
19	40	975	Una vía	0,7	0,553	0,511	0,565	0,543
20	40	975	Espiral	0,2	0,7	0,625	0,706	0,677
21	40	975	Zig-zag	0,4	0,797	0,857	0,836	0,830
22	40	586	Una vía	0,2	0,669	0,238	0,338	0,415
23	40	586	Espiral	0,4	0,759	0,692	0,766	0,739
24	40	586	Zig-zag	0,7	0,784	0,813	0,959	0,852
25	40	367	Una vía	0,4	0,424	0,412	0,382	0,406
26	40	367	Espiral	0,7	0,743	0,756	0,631	0,710
27	40	367	Zig-zag	0,2	0,819	0,779	0,796	0,798

Fuente: Propia



Figura 50. Medición de la rugosidad superficial.

Fuente: Propia.

4.7. ANOVA.

Con el análisis de varianza (ANOVA) se compara varias medidas y se busca descomponer la variabilidad de los datos.

El análisis de varianza (ANOVA) se utiliza habitualmente para proporcionar una medida de confianza. La técnica no analiza directamente los datos sino más bien determina la variabilidad (varianza) de los datos. La confianza se mide a partir de la varianza. Este análisis proporciona la varianza de factores.

El propósito de ANOVA en este estudio es determinar la importancia de los parámetros del proceso y medir sus efectos sobre la rugosidad. Los resultados agrupados ANOVA de los datos están dados en la **tabla 26**, para las superficies cóncavas y en la **tabla 27** para las superficies convexas.

4.7.1. Términos y notaciones en ANOVA.

El análisis de varianza calcula cantidades conocidas como grados de libertad, sumas de cuadrado, cuadrado medio, valor de error, porcentaje de influencia, prueba F, estas cantidades y sus interrelaciones se definen como se muestra a continuación utilizando la notación siguiente.

V	Promedio de raíces (Varianza)	P	Porcentaje de influencia
S	Suma de cuadrados	T	Total (De resultados)
n	Número de experimentos	C.F	Factor de corrección
DF	Grados de libertad		
e	Error (experimental)		
F	Prueba F		

4.7.1.1. Varianza

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

$$V = \frac{\text{Suma de cuadrados}}{\text{Grados de libertad}} = \frac{S}{DF} \quad (10) \text{ (Ranjit, 2010).}$$

4.7.1.2. Prueba F

En ANOVA, la relación entre la varianza del parámetro de proceso y del error se llama prueba F, esta determina si el parámetro tiene un efecto significativo sobre la característica de la calidad superficial para este caso en específico. (Ranjit, 2010)

Este proceso de la prueba F, se lleva a cabo mediante la comparación del valor del parámetro calculado, con el valor de la tabla estándar de F (0,05, DF del factor , DF del error) en el nivel de significancia de 5%. Si el valor de la prueba F calculado es mayor que el valor de F de la tabla F, el parámetro del proceso es considerado significativo o caso contrario es considerado agrupado.

$$F = \left(\frac{V}{e} \right) \quad (11) \text{ (Ranjit, 2010).}$$

4.7.1.3. Porcentaje de influencia

El porcentaje de influencia de cada factor es la relación entre el factor y la suma de cuadrados total, expresado en porcentaje.

$$P = \left(S * \frac{100\%}{ST} \right). \quad (12) \text{ (Ranjit, 2010).}$$

ST= suma de cuadrados total= S (de cada prueba)- C.F

$$C.F = \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n yi\right]^2$$

(13) (Ranjit, 2010).

n = número de experimentos.

Donde “y” son los valores de los resultados para cada factor y su niveles.

En los resultados de ANOVA para los datos, los parámetros significativos afectan al valor de la media.

4.7.1.4. Grados de libertad

El número de grados de libertad para cada factor o columna es igual a el número de niveles menos uno. Así para un factor con tres niveles tendrá 2 grados de libertad. El arreglo ortogonal de L27 con cuatro factores y 3 niveles tendrá 26 grados de libertad y 2 grados de libertad para cada factor o columna.

$$DF_{total} = \text{número de pruebas} - 1 \quad (14) \text{ (Ranjit, 2010).}$$

Para factores.

$$DF = \text{número de niveles} - 1 \quad (15) \text{ (Ranjit, 2010).}$$

Para el error

$$DF_e = DF_{total} - DF_{factores} \quad (16) \text{ (Ranjit, 2010).}$$

Tabla 26
ANOVA resultados de los datos de la superficie cóncava.

Fuente	DF	S	V	Valor F	% P
Velocidad de corte (A)	2	0,010	0,005	0,26	1,68
Avance (B)	2	0,021	0,010	0,52	3,51
Trayectoria (C)	2	0,198	0,099	5,21	33,05
Profundidad de corte (D)	2	0,011	0,005	0,26	1,83
Error	18	0,359	0,019		59,73
(ST) Total	26	0,599			100

Fuente: Propia.

4.7.1.5. Ejemplo de cálculo para el factor (A) velocidad de corte :

1.-Suma de cuadrados totales.

La suma de cuadrados es una medida de la desviación de los datos experimentales de la media de los datos.

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

(16) (Ranjit, 2010)

$$\sum_{i=1}^n yi^2 = (y1^2 + y2^2..yn^2) = 7,868$$

$$C.F = \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n yi\right]^2 = \frac{(y1 + y2..+yn)^2}{n} = 7,269$$

$$ST = (y1^2 + y2^2..yn^2) - \frac{(y1 + y2..+yn)^2}{n}$$

Reemplazo de valores:

$$ST = 7,868 - 7,269 = 0,599$$

2.-Varianza del factor A, según el arreglo ortogonal.

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

(17) (Ranjit, 2010)

Donde:

L= número de niveles=3.

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

Nivel 1, L=1 n=9.

$$\left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (A1i) \right]^2 =$$

$$\frac{(0,567 + 0,423 + 0,473 + 0,345 + 0,385 + 0,610 + 0,425 + 0,715 + 0,8)^2}{9} = 2,499561$$

Nivel 2

$$\left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (A2i) \right]^2 =$$

$$\frac{(0,67 + 0,45 + 0,433 + 0,247 + 0,52 + 0,62 + 0,62 + 0,31 + 0,327 + 0,847)^2}{9} = 2,173658$$

Nivel 3

$$\left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (A3i)\right]^2 =$$

$$\frac{(0,370 + 0,54 + 0,573 + 0,54 + 0,527 + 0,687 + 0,38 + 0,567 + 0,66)^2}{9} = 2,606072$$

$$SA = 2,499561 + 2,173658 + 2,606072 - 7,269287 = 0,010004$$

3.- Varianza del factor (A) velocidad de corte.

$$VA = \frac{SA}{DF} = \frac{0,010}{2} = 0,005$$

4.-Error.

$$e = ST - (SA + SB + SC + SD) = 0,599 - (0,010 + 0,021 + 0,198 + 0,011) = 0,359$$

5.- Varianza factor (A) velocidad de corte.

$$VA = \frac{SA}{DF} = \frac{0,010}{2} = 0,005$$

6.- Varianza del error.

$$Ve = \frac{Se}{DF} = \frac{0,357}{18} = 0,019$$

6.- Prueba F.

$$FA = \frac{VA}{Ve} = \frac{0,005}{0,019} = 0,263$$

7.- Porcentaje de influencia P

$$\%P = \frac{SA * 100}{ST} = \frac{0,010 * 100}{0,599} = 1,68\%$$

4.7.1.6. Prueba de hipótesis

Una prueba de hipótesis examina dos hipótesis opuestas sobre una población: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La manera en que se configuran estas hipótesis depende de lo que se intenta demostrar.

-Hipótesis nula (H0).

La hipótesis nula establece que un parámetro de población es igual a un valor. La hipótesis nula suele ser una afirmación inicial que los investigadores especifican basándose en investigaciones previas o en su conocimiento.

-Hipótesis alternativa (H1).

La hipótesis alternativa establece que el parámetro de población es diferente del valor del parámetro de población en la hipótesis nula. La hipótesis alternativa es lo que usted podría pensar que es cierto o espera probar que es cierto.

Validación de parámetros influyentes comparados con la tabla de distribución F mediante la prueba de hipótesis.

$F_{A(0,05;2;18)}=3,55$. El valor de F tabulado 3,55 para el factor (A), es mayor que F calculada 0,26 del mismo factor, por tanto no existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones, para el parámetro (A) Velocidad de corte y se acepta la hipótesis nula.

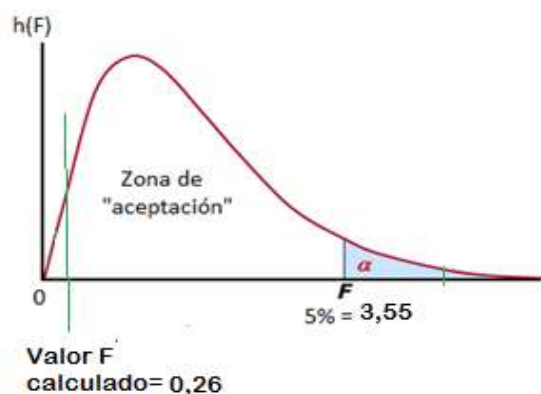


Figura 51. Prueba gráfica de confirmación de hipótesis.

Fuente: Propia

$F_B(0,05:2:18)=3,55$. El valor de F tabulado 3,55 para el factor (B), es mayor que F calculada 0,52 del mismo factor, por tanto no existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones, para el parámetro (B) Avance y se acepta hipótesis nula.

$F_C(0,05:2:18)=3,55$. El valor de F tabulado 3,55 para el factor (C), es menor que F calculada 5,21 del mismo factor, por tanto existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones, para el parámetro Trayectoria (C) y se acepta la hipótesis alternativa.



Figura 52. Distribución F.

Fuente: Propia

$FD(0,05:2:18)=3,55$. El valor de F tabulado 3,55 para el factor (D), es mayor que F calculada 0,26 del mismo factor, por tanto no existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones, para el parámetro (D) profundidad y se acepta la hipótesis nula.

Tabla 27.
ANOVA resultados de los datos de la superficie convexa.

Fuente	DF	S	V	Valor F	% P
Velocidad de corte (A)	2	0,290	0,145	20,71	32,58
Avance (B)	2	0,005	0,002	0,28	0,59
Trayectoria (C)	2	0,461	0,230	32,85	51,79
Profundidad de corte (D)	2	0,003	0,001	0,14	0,40
Error	18	0,131	0,007		14,64
Total	26	0,890			100

Fuente: Propia.

$FA(0,05:2)=3,55$. El valor de F tabulado 3,55 para el factor (A), es menor que F calculada 20,71 del mismo factor, por tanto existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones, para el parámetro velocidad de corte (A) y se acepta la hipótesis alternativa.

$FB(0,05:2:18)=3,55$. El valor de F tabulado 3,55 para el factor (B), es mayor que F calculada 0,28 del mismo factor, por tanto no existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones, para el parámetro (B) Avance y se acepta la hipótesis nula.

$FC(0,05:2:18)=3,55$. El valor de F tabulado 3,55 para el factor (C), es menor que F calculada 32,85 del mismo factor, por tanto existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones, para el parámetro Trayectoria (C) y se acepta la hipótesis alternativa.

$FD(0,05:2:18)=3,55$. El valor de F tabulado 3,55 para el factor (D), es mayor que F calculada 0,14 del mismo factor, por tanto no existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones, para el parámetro (D) profundidad y se acepta la hipótesis nula.

Tabla 28.

Tabla de evaluación de los niveles según sus factores para probetas de acabado cóncavo de los resultados.

Nivel	Velocidad de corte (A), (μm)	Avance (B) (μm)	Trayectoria (C) (μm)	Profundidad de corte (D) (μm)
1	0,527	0,500	0,428	0,543
2	0,491	0,497	0,494	0,518
3	0,538	0,558	0,633	0,494
Delta	0,047	0,061	0,205	0,049
Rank	4	2	1	3
Rmean	0,519(μm)			

Fuente:Propia.

Delta = valor máximo(Promedio de niveles) – valor mínimo(Promedio de niveles)

(18) (Murat, 2013)

Para el factor (A) velocidad de corte.

$$Delta = 0,538 - 0,491 = 0,047(\mu\text{m})$$

Esta tabla de evaluación nos permite determinar cuál de los factores usados en el experimento es el más influyente y el menos influyente estadísticamente. Para la superficie cóncava el parámetro (C), es el que más variación estadística presenta y el parámetro (A) es el que menos variación estadística presenta.

Tabla 29.

Tabla de evaluación de los niveles según sus factores para probetas de acabado convexo.

Nivel	Velocidad de corte (A) (μm)	Avance (B) (μm)	Trayectoria (C)(μm)	Profundidad de corte (D), (μm)
1	0,414	0,5497	0,374	0,540
2	0,581	0,572	0,601	0,568
3	0,663	0,536	0,682	0,55
Delta	0,249	0,036	0,308	0,028
Rank	2	3	1	4
Rmean	0,553(μm)			

Fuente: Propia

Tabla 30
F- Distribución (95% confianza).

F - Distribution ($\alpha = 0.05$ in the Right Tail)

df ₂	Numerator Degrees of Freedom								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385
3	10.128	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123
4	7.7086	9.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	6.9988
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563
19	4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227
20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928
21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660
22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419
23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201
24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821
26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655
27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501
28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360
29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588
∞	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799

Fuente: (Ranjit, 2010).

La **tabla 31**, de distribución F, es una distribución de probabilidad continua.

Se utiliza para comparar las varianzas de dos distribuciones.

Tabla 31.
Resultados de influencia y porcentaje.

Designación	Factores	Estadísticamente significativa	
		Cóncava / %	Convexa/ %
A	Velocidad de corte	x	✓ / 33,05%
B	Avance	x	x
C	Trayectoria	✓ / 32,58%	✓ / 51,79%
D	Profundidad de corte	x	x

Fuente: Propia.

4.8. PREDICCIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL ÓPTIMA.

Los niveles óptimos de los factores se determinan considerando ANOVA y sus efectos principales, la **figura 53** muestra los efectos principales para el valor promedio de la rugosidad en la superficie cóncava, se observa que el parámetro estadísticamente más influyente es la trayectoria (C). En consecuencia la condición para obtener una rugosidad óptima en la superficie cóncava es; Velocidad de corte (A) = 60 mm/min , Avance (B)= 586 mm/min, Trayectoria (C)= una vía, Profundidad de corte (D)= 0,7 mm.

La **figura 54** muestra los efectos principales para la superficie convexa. Los parámetros estadísticamente más influyentes son la velocidad de corte (A) y la trayectoria (B). La condición para obtener una rugosidad óptima en la superficie convexa es; velocidad de corte (A)= 60 m/min, Avance (B)= 367 m/min, Trayectoria (C)= una vía , Profundidad de corte (D)= 0,2 mm.

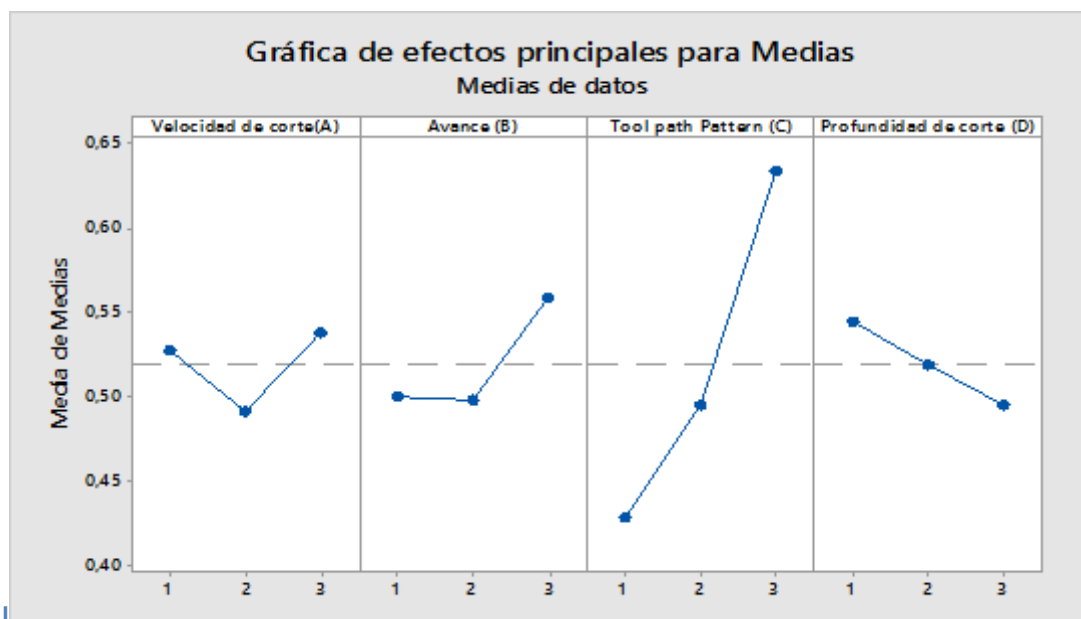


Figura 53. Principales efectos de los factores para las probetas con superficie cóncava.

Fuente: Propia

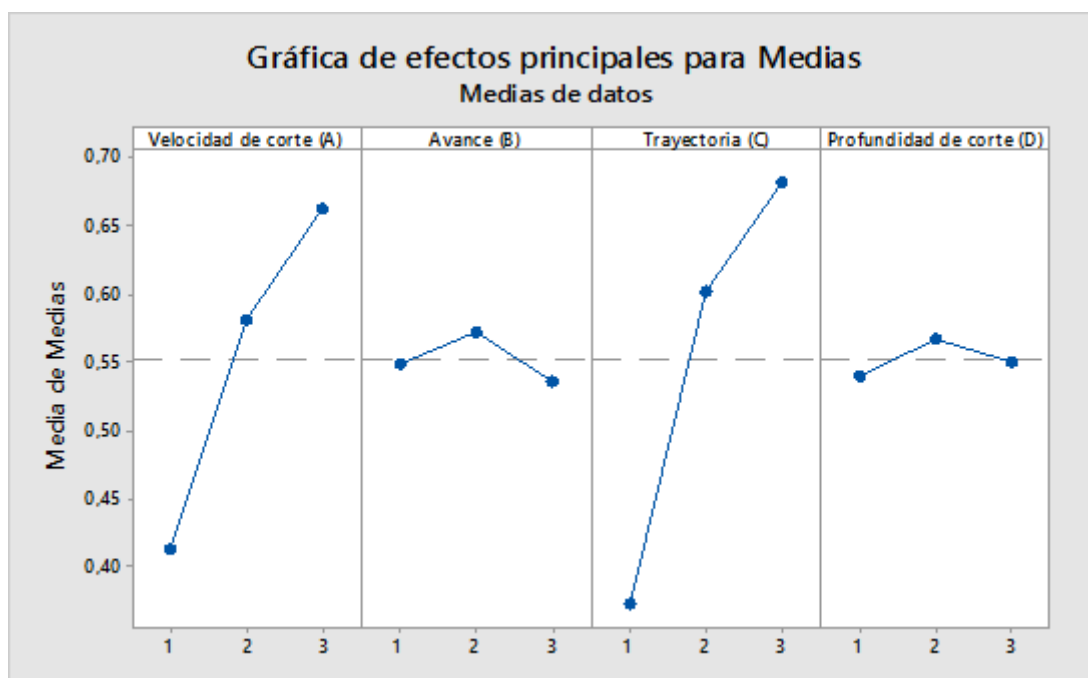


Figura 54. Principales efectos de los factores para las probetas con superficie convexa.

Fuente: Propia.

4.10. RESULTADOS

El promedio menor de rugosidad obtenido en las probetas de superficie cóncava es:

Prueba N°	(A) Velocidad (m/min)	(B) Avance (mm/min)	(C) Trayectoria	(D) Profundidad de corte	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Rmean (μm)
13	50	586	Una vía	0,7	0,23	0,26	0,25	0,247

El menor promedio de rugosidad obtenida en las muestras de superficie convexa es:

Prueba N°	(A) Velocidad (m/min)	(B) Avance (mm/min)	(C) Trayectoria	(D) Profundidad de corte	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Rmean (μm)
1	60	975	Una vía	0,2	0,385	0,155	0,258	0,266

Según los datos la óptima rugosidad superficial acorde al método Taguchi se puede obtener de la siguiente ecuación.

$$R_{opt} = W + X + Y + Z - 3 * R_{mean} \quad (19) \text{ (Murat, 2013).}$$

Donde “W, X, Y, Z” es la medida menor de los experimentos, de uno de los factores y “Rmean” es la media total de la rugosidad. La tabla 28 y 29 muestran los valores promedios Ra de todos los factores y sus niveles para las probetas con superficies cóncavas y convexas respectivamente. Basados en los datos de las **tablas 29 y 30**, la rugosidad óptima prevista en la superficie cóncava y convexa es respectivamente, $R_{opt}(\text{cóncava}) = 0,491 + 0,497 + 0,428 + 0,494 - 3 * 0,519 = \mathbf{0,353 \mu m}$ y $R_{opt}(\text{convexa}) = 0,417 + 0,536 + 0,374 + 0,540 - 3 * 0,553 = \mathbf{0,208 \mu m}$.

Para la validación del proceso, es necesario calcular un intervalo de confianza (CI).

$$CI = \sqrt{F(1, DFe) * Ve * \left[\frac{1}{neff} + \frac{1}{Rp} \right]} \quad (20) \text{ (Murat, 2013).}$$

Donde DF_e son los grados de libertad del error, por tanto $F(1;DF_e)$, es tomada de tablas F de confianza al 95%, y eso es $F(1;18) = 4,4139$, “ Ve ” se refiere a la varianza del error y esta es $Ve_1 = 0,019$ y $Ve_2 = 0,007$ para las superficies cóncavas y convexas respectivamente (Unal & Dean, 1991). R_p es el número de repeticiones de las pruebas, las cuales son 3 para los dos casos. N_{eff} , es número efectivo de repeticiones y estas son calculadas como sigue.

$$n_{eff} = \frac{N}{1+Vt} \quad (21) \text{ (Murat, 2013)}$$

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

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

N es el número total de pruebas 27, para el estudio. $Vt = 2$ y 4 es el número total de grados de libertad relacionado con los factores que influyen significativamente en la respuesta, 2 para la superficie cóncava y 4 para la superficie convexa. El intervalo de confianza es $0,353 \mu\text{m} \pm 0,193 \mu\text{m}$ para el caso de superficies cóncavas y $0,208 \mu\text{m} \pm 0,126 \mu\text{m}$ para las superficies convexas respectivamente.

La comprobación del experimento se realizó 3 veces en las probetas cóncavas y convexas, mecanizadas con los niveles óptimos para cada caso, dando un promedio de **$0,230 \mu\text{m}$** y **$0,242 \mu\text{m}$** respectivamente. Los resultados obtenidos se encuentran entre el rango de los valores obtenidos en el proceso de optimización, por tanto aseguran la validez del estudio.

En contraste con otros casos de optimización que se enfocan en métodos de desarrollo de optimización en superficies libres, este estudio fue enfocado en la cuantificación de la influencia de los factores (A) Velocidad de corte, (B) Avance, (C) Trayectoria, (D) Profundidad de corte, en términos de la rugosidad superficial en superficies cóncavas y convexas. La trayectoria de

la herramienta es crucial para este análisis ya que esta influye considerablemente para el acabado superficial como se lo puede ver en las **figuras 53 y 54.**

Capítulo 5 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.

- Acorde al estudio del análisis Anova, para el método experimental Taguchi, los factores significantes que influyen estadísticamente en la variación de la rugosidad superficial (Ra), se muestran en la **Tabla 32** , página 81 .Estos factores representan el porcentaje de influencia que poseen en el mecanizado de superficies cóncavas y convexas.
- Por lo tanto para las superficies cóncavas, el parámetro; Trayectoria de la herramienta, influye estadísticamente en el 33,05% en el valor de la rugosidad superficial, los otros factores, velocidad de corte, avance y profundidad de corte, y el porcentaje de error completan el 100%, como lo muestra la **tabla 26** de análisis anova.
- Respecto a la superficie convexa, los factores velocidad de corte y trayectoria de la herramienta, influyen estadísticamente con el 32,58% y el 51,79% respectivamente en el valor de la rugosidad superficial. El 15,51% corresponde a la influencia de los factores avance, profundidad de corte y el porcentaje de error como lo muestra la **tabla 27** de análisis anova.
- Por lo tanto se concluye que los factores; velocidad de corte, profundidad de corte, y avance no representan un estadísticamente una gran influencia en este proceso de optimización para superficies cóncavas. Los factores; avance y profundidad de corte, no son estadísticamente significantes en la optimización del proceso de mecanizado para superficies convexas, ya que no tienen una variación significativa como lo muestran las **tablas 28 y 29** de evaluación de los niveles según sus factores, para las superficies cóncavas y convexas.

- Para el caso de la superficie cóncava es claro que el factor trayectoria, presenta una rango de variación considerable con respecto de la rugosidad superficial, como lo muestra la **figura 53**, mientras que los factores; velocidad de corte, avance, profundidad de corte, no representan gran cambio en la magnitud con respecto de la rugosidad superficial.
- En cuanto el caso de superficie convexa, está claro que los factores que presentan un rango de variación considerable, con respecto a la rugosidad superficial como lo muestra la **figura 54** son, trayectoria y velocidad de corte. Los factores; avance y profundidad de corte, no presentan gran cambio en la magnitud con respecto de la rugosidad superficial.
- Después de considerar las tablas de resultados anova y las gráficas de los efectos principales para las superficies cóncavas y convexas, la rugosidad mínima puede ser encontrada con los valores de los factores; Velocidad de corte = 50 mm/min, avance= 586 mm/min, trayectoria =una vía, profundidad de corte =0,7mm para la superficie cóncava. Por otra parte para la superficie convexa; Velocidad de corte= 60 m/min, avance= 367 m/min, trayectoria= una vía, profundidad de corte=0,2 mm.
- La validación del método de optimización del experimento, proporciona un promedio de rugosidad de **0,230 μm** , el cual se encuentra en el rango de optimización, mejorando así un 6,88 % puesto que la prueba con menor rugosidad fue la número 13 con un valor de 0,247 μm para la superficie cóncava. Para la superficie convexa el método proporciona un promedio de rugosidad de **0,242 μm** mejorando un 9,03% al valor menor de rugosidad del experimento que fue la prueba número 1 con un valor de 0,266 μm .

5.2. RECOMENDACIONES.

- Es importante destacar que para obtener mejores resultados de rugosidad superficial, se debe utilizar la inclinación del eje de la herramienta de corte, para evitar una velocidad de corte cero. Un estudio (Castro Vera, Segura Sangucho, Castellanos, & Lino, 2016), realizado en una máquina de 5 ejes, se obtuvo un resultado promedio de rugosidad $0.210 \mu\text{m}$ para superficie cóncava y $0.185 \mu\text{m}$ para la superficie convexa, en el proceso de optimización.
- Realizar un análisis del aumento de la velocidad de corte en función del diámetro de la herramienta, más no del diámetro efectivo, para analizar las diferencias y efectos que con llevan la elección de velocidades de corte y avance diferentes a las recomendadas.
- Diseñar otro experimento adicionando el factor de profundidad radial, con tres niveles, ya que este parámetro genera un scallop o altura de vértice en cada pasada, y esto puede influir en el resultado de la rugosidad superficial.
- Evaluar el desgaste de la herramienta de corte en un tiempo de maquinado, para determinar la vida útil de su calidad geométrica para mecanizados de superficie libre.
- Analizar la eficiencia del refrigerante para la optimización del mecanizado en las probetas, haciendo pruebas sin refrigerante.

6. REFERENCIAS

- Aaron, T. E. (1995). *ASM Handbook Volume 16; Machining*. EEUU: ASM International.
- Aggarwal, A., Singh, H., & Kumar, P. (2008). *Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique a comparative analysis*. Process. Technol.
- Blanco, J. G. (2013). *Calidad geométrica en el mecanizado de superficies curvas en titanio para aplicaciones médicas*. Bogotá.
- Castro Vera, K. L., Segura Sangucho, L., Castellanos, S., & Lino, J. (2016). *Optimization of geometric Quality in a 5 Axis Machining of curved Surfaces in a EN-AW-7075 Alloy by Taguchi Methods*. Portugal: INEGI.
- Chen, Z. C., & Song, D. (2006). *A practical approach to generating accurate iso-cusped tool paths for three - axis*. Journal of Materials Processes.
- DECEM. (2017). *Departamento de Ciencia de la Energía y Mecánica*. Recuperado el 2017, de decem.espe.edu.ec/laboratorio-de-metrologia/
- DORMER. (2013). *Manual Técnico*. Madrid: FSC.
- Electric, G. (2002). *Fanc Maintenance Manual*. G. E.
- Feng, H. Y., & Huiwen, L. (2002). *Constant scallop- height tool path generation for thee-axis sculptured machinig*. Computer Aided Desing.
- Fontaine, M., & Moufki, A. (2007). *Modelling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination*. Journal of Materials Processing Technology.
- Jiang, X., Scott, P., & Whitehouse, D. (2007). *Freeform Surface Characterisation- A Fresh Strategy*. CIRP Manufacturing Technology.
- Larburu, N. (1990). *Máquinas Prontuario*. Madrid: Paraninfo.
- Lasemi, A. (2010). *Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state of the art review*. Computer aided desing.
- Lin, R. S., & Koren, Y. (1996). *Efficient Tool- Path Planning for Machining Free-Form Surfaces*. Journal of Engineering for Industry.
- Lopez de la calle, L. N., Préz, J., & Llorente, J. I. (2000). *Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys*. Journal of Materials Processing Technology.
- Machining. (1983). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*. SOME.

- Mastercut. (2014). *Rotatory cutting tools metric manual*. Mastercut.
- Ming, C. (2010). *NX7 for engineering desing*. Mechanical Aerospace Engineering.
- Mukherjee, I. (2006). *A review of optimization techniques in metal cutting processes*. Computers & Industrial Engineering.
- Murat, A. (2013). *Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 Aluminium alloy via taguchi method*.
- Nunes, R. (1992). *ASM Metals HanBokk ; Porperties and selection; Non ferrus alloys and special-prurpuse materials*. EEUU: ASM International.
- Oktem, H., & Erzurumlu, T. (2006). *A study of the Tguchi optimization method for surface rougness in finish milling of mold surfaces*. Avdanced Manufacture Technology.
- Puerta, J. D., Tibu, A., Bolle, B., & Chevrier, P. (2010). *Sub- surface and surface analysis of high speed machined Ti-6AL-4V alloy*. Materials of science and Engineering.
- Quinsat, Y., & Sabourinb, L. (2008). *Surface topography in ball end milling process: Description of a 3D surface roughness parameter*. Journal of Materials Processing Technology.
- Quinsata, Y., Lavernhe, S., & Lartigue, C. (2011). *Characterization of 3D surface topograpy in 5-axis milling*. WEAR JM.
- Radzevich, S. P. (2002). *Conditions of proper sculptured surface machining*. Computer aided Desing.
- Ranjit, K. (2010). *Taguchi Method*. Society of Manufacturing Engineers.
- Ribeiro, M. V., Moreira, M. R., & Ferreira, J. R. (2003). *Otimization of titanium alloy (6Al-4V) machining*. Journal of Materials Processing Technology.
- Salami, R. (2007). *Static rigid force model for 3-axis ball end milling of sculptured surfaces*. International Journal of Machine Tools and Manufacture.
- Sandvik. (2010). *Manual de Fresado*. Suecia: Elanders.
- Sanvick. (2014). *Fresado*. Suecia: Elanders.
- Sette, A. I., Diniz, A. E., & Pederiva, R. (2010). *Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling*. International Journl Of Machine Tools and Manufacture.

- Shnihirova, D. (2016). *Smart composite coatings for corrosion protection of aluminium alloys in aerospace applications*. Portugal: Sciencedirect.
- Shyoung Chen, J., & Huang, Y. (2005). *A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process*. International Journal of Machine tools and Manufacture.
- Sun, J., & Guo, Y. (2008). *A new multi-view approach to characterize 3D chip morphology and properties in end milling titanium Ti-6AL -4V-*. International Journal of Machine Tools and Manufacture.
- Unal, R., & Dean, E. (1991). *Taguchi approach to desing optimization for quality and cost: an overwie*. International Society of Parametric Estimations.
- Vakondios, D. (2014). *Cad- Based simulation and surface topomorphy prediction in ball end mill*. IRE.
- Vakondios, D., Kyratsis, P., & Yaldiz, S. (2012). *Influence milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6*. Measurement.
- Wang, B. (2016). *Proper selection of cutting parameters and cutting tool angle to lower the specific cutting energy during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy*. Journal of Cleaner Production.
- Weckenmann, A., Jiang, X., & Sommer, D. (2009). *Multisensor data fusion in dimensional metrology*. CIRP Annals Manufacturing Technology.
- Wei, E. J., & Lin, M. C. (2005). *Study on general analytical method for CNC machining the free-form surfaces*. Journal of Materials Processing Technology.
- Wei, Z. C., Wang, M. J., & Zhu, J. N. (2011). *Cutting force prediction in ball end milling of sculptured with Z-Level contournig tool path*. International Journal of Machine tools and Manufacture.
- Wright, P. K. (2016). *Physical Models of Tool Wear for Adaptive control in Flexible Machining Cells*. ASME.
- Yang, J. L., & Chen, J. C. (2001). *A systematic approach for identifying optimum surface roughness in finish milling operations*. Technol.
- Yuefeng, Y., Wuyi, C., & Liansheng, G. (2010). *Tool Materials Rapid Selection Based on Initial Wear*. China: Chinese Journal Of Aeronautics.
- Zhao, Y., Li, P., & Wang, C. (2006). *A novel fiber-optic sensor used for small internal curved surface measurement*. Sensors and Actuadors.