

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

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

**TEMA:
DETERMINAR PARÁMETROS ÓPTIMOS EN FRESADO PLANO PARA UN
ACERO AISI P20 CON TRATAMIENTO TÉRMICO TEMPLE-REVENIDO CON
UN RANGO DE DUREZA 60-64 HRC**

**AUTORES:
ALEXANDRA NATALY GRANJA IZA
KEVIN MARIO RIVAS ORTIZ**

**TUTOR:
LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMIN**

Quito, enero de 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, **Alexandra Nataly Granja Iza** y **Kevin Mario Rivas Ortiz**, con documento de identificación N° 172189959-7 y N° 210032329-0 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“Determinar parámetros óptimos en fresado plano para un acero AISI P20 con tratamiento térmico temple-revenido con un rango de dureza 60-64 HRC”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Alexandra Nataly Granja Iza

C.I. 172189959-7



Kevin Mario Rivas Ortiz

C.I. 210032329-0

Quito, enero del 2018

DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, **“Determinar parámetros óptimos en fresado plano para un acero AISI P20 con tratamiento térmico temple-revenido con un rango de dureza 60-64 HRC”**, realizado por **Alexandra Nataly Granja Iza y Kevin Mario Rivas Ortiz**, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, enero del 2018



Luis Christian Juiña Quilachamin

C.I. 171370450-8

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a Dios por darme la sabiduría, la inteligencia y la fortaleza de poder culminar la meta deseada. A mis padres Arturo y Blanca por brindarme un apoyo incondicional tanto moral como económico, ellos son el pilar fundamental de mi vida por los que lucho con constancia día a día para no decepcionarlos y seguir adelante. A mis hermanos porque siempre están presentes en mi mente y quiero darles un ejemplo para que sigan un buen camino y juntos ser el orgullo de nuestros padres. A mis seres queridos por los buenos deseos que me ofrecieron de corazón y a mi enamorado él que siempre estuvo ahí para apoyarme cuando más lo necesitaba.

Alexandra Nataly Granja Iza

Agradezco primero a Dios por bendecir cada paso de mi vida. Agradezco a mis padres Jenny y Mario por estar siempre luchando por brindar me todo el apoyo en cada momento para poder cumplir con esta meta tan importante. Agradezco a mis abuelitos Zoila y Rigoberto por estar junto a mí con esos consejos que alientan para seguir adelante y también quiero mencionar a mis tíos que participaron en este objetivo con su paciencia y cuidados diarios.

Kevin Mario Rivas Ortiz

Índice

1. Marco teórico	6
1.1 Acero AISI P20	6
1.1.1 Propiedades de Acero AISI P20.....	6
1.1.2 Características del Acero AISI P20.....	6
1.1.3 Aplicación	7
1.1.4 Tratamiento térmico en el Acero AISI P20.....	8
1.2 Dureza	9
1.2.1 Ensayo Brinell.....	9
1.2.2 Dureza Rockwell.....	10
1.3 Herramientas de Corte.....	11
1.3.1 Materiales de la herramienta	12
1.4 Mecanizado o maquinado	14
1.4.1 Variables independientes en el mecanizado.....	14
1.4.2 Variables dependientes en el mecanizado.....	16
1.5 Fresado	17
1.5.1 Operaciones en el fresado	18
1.5.2 Parámetros de corte en el fresado.....	19
1.5.3 Mecanizado por arranque de viruta en acero AISI P20	21
1.6 Fuerzas y potencia de corte	22
1.6.1 Fuerzas de corte.....	22
1.6.2 Potencia de corte	24
1.7 Manufactura CAD/CAM.....	24
1.7.1 Dibujo asistidos por computadora (CAD).....	24
1.7.2 Manufactura asistida por computadora (CAM)	26
1.8 Conceptos de rugosidad	29

1.8.1 Acabado superficial.....	29
1.8.2 Tolerancias en maquinado.....	32
1.8.3 Acabado superficial en maquinado	32
1.9 Métodos estadísticos	33
1.9.1 Método Taguchi	33
1.9.2 Método ANOVA.....	36
2. Desarrollo del experimento	41
2.1 Factores de mecanizado para el Acero AISI P20.....	41
2.2 Maquinaria	41
2.3 Metrología.....	43
2.3.1 Rugosímetro	43
2.3.2 Durómetro	44
2.4 Tratamiento térmico	45
2.4.1 Temple.....	45
2.4.2 Revenido	46
2.5 Materiales y Herramientas	46
2.5.1 Inserto.....	46
2.5.2 Herramienta con cuchillas insertadas.....	48
2.6 Fluido de corte.....	50
2.6.1 Material que constituye la herramienta	51
2.6.2 Método de trabajo	51
2.6.3 Aceites emulsionables.....	51
2.7 Metodología.	52
2.7.1 Velocidad de corte.....	52
2.7.2 Velocidad de avance	53
2.7.3 Profundidad radial	54
2.7.4 Estrategias de mecanizado	55

3. Análisis de datos	58
3.1 Diseño del experimento	58
3.2 Autodesk inventor	59
3.2.1 Inventor HSM (Herramienta de manufactura asistida por computadora).....	60
3.3 Programación del maquinado en Inventor HSM.....	60
3.4 Medición de dureza de las probetas	64
3.5 Maquinado de las probetas.....	66
3.6 Desgaste de la herramienta de corte.....	72
3.7 Desarrollo de Anova	72
3.7.1 Ejemplo de cálculo para el factor (A) velocidad de corte.....	73
3.8 Prueba de hipótesis.....	76
3.8.1 Hipótesis nula.....	76
3.8.2 Hipótesis alternativa.....	77
3.9 Análisis de resultados.....	77
3.10 Predicción de la rugosidad superficial óptima	80
3.11 Resultados	81
3.12 Costos de experimento	84
Conclusiones	85
Recomendaciones.....	88
Referencias.....	89
Anexos	92

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Procedimiento de prueba de la dureza Brinell.....	10
Figura 1.2 Procedimiento de prueba de la dureza Rockwell.....	11
Figura 1.3 Dureza de diferentes materiales para herramientas de corte en función de la temperatura	12
Figura 1.4 Fresado frontal.....	18
Figura 1.5 Método para determinar el consumo de potencia en un fresado	21
Figura 1.6 Círculo de fuerzas para determinar las fuerzas que actúa en la zona de corte	22
Figura 1.7 Proceso CAD	25
Figura 1.8 Proceso CAM	27
Figura 1.9 Ciclo de producto típico	28
Figura 1.10 Superficie maquinada producida sobre acero.....	29
Figura 1.11 Coordenadas utilizadas para medir la rugosidad superficial.	31
Figura 1.12 Esquema de la rugosidad y ondulaciones en una superficie.....	31
Figura 1.13 Rugosidad superficial producida por diferentes métodos de producción	33
Figura 1.14 Aplicación del método Taguchi en las tres partes principales de diseño.	34

Capítulo 2

Figura 2.1 Emco Concept Mill 260.....	42
Figura 2.2 Rugosímetro Mitutoyo marca SJ-210.....	43

Figura 2.3 Durómetro marca Phase II.....	44
Figura 2.4 Puntos donde se tomaron los datos de dureza.	45
Figura 2.5 Inserto de carburo sin revestimiento marca ARNO con especificación APHT 1003 PDFR-ALU.....	47
Figura 2.6 Ejemplo de estructura de las herramientas recubiertas.....	47
Figura 2.7 Sistema de designación ISO para insertos indexables.....	48
Figura 2.8 Fresa frontal de cuatro chuchillas insertadas.....	49
 Capítulo 3	
Figura 3.1 Diseño de probetas.....	58
Figura 3.2 La cinta de opciones de comandos de Inventor HSM.	60
Figura 3.3 Configuración del modelo a mecanizar.	61
Figura 3.4 Selección de fresa plana Ø16 mm en la biblioteca de herramientas.	61
Figura 3.5 Cuadro de dialogo de la herramienta.	62
Figura 3.6 Selección del plano a mecanizar.....	62
Figura 3.7 Selección de la orientación de la herramienta.	63
Figura 3.8 Cuadro de simulación con las combinaciones del uno al nueve.....	63
Figura 3.9 Durezas de las probetas antes del mecanizado.	64
Figura 3.10 Representación de la variación de dureza antes y después del mecanizado.	66
Figura 3.11 Superficie plana mecanizada.	66
Figura 3.12 Gráfica de la rugosidad vs velocidad de corte para la estrategia de ZIG- ZAG.....	68
Figura 3.13 Gráfica de la rugosidad vs velocidad de corte para la estrategia de ZIG.	69

Figura 3.14 Gráfica de la rugosidad vs velocidad de corte para la estrategia de ZIG-ZAG 90°	69
Figura 3.15 Gráfica de rugosidad vs velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria ZIGZAG.	70
Figura 3.16 Gráfica de rugosidad vs velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria ZIG.	71
Figura 3.17 Gráfica de rugosidad vs velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria ZIGZAG 90°	71
Figura 3.18 Microestructura del inserto después del mecanizado	72
Figura 3.19 Campana de verificación de hipótesis para el valor F	78
Figura 3.20 Campana de verificación de hipótesis para el valor F	79
Figura 3.21 Campana de verificación de hipótesis para el valor F	79
Figura 3.22 Campana de verificación de hipótesis para el valor F	79
Figura 3.23 Gráfica de la rugosidad vs niveles para cada factor.	81

Índice de tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1 Composición química del Acero AISI P20.....	7
Tabla 1.2 Características físicas del Acero AISI P20	7
Tabla 1.3 Parámetros de temple	8
Tabla 1.4 Parámetros de revenido	9
Tabla 1.5 Escalas de dureza de Rockwell	10
Tabla 1.6 Propiedades de varios materiales para herramientas de corte.....	14
Tabla 1.7 Parámetros de corte en el fresado frontal y axial	21
Tabla 1.8 Parámetros de corte en el fresado de acabado.....	21
Tabla 1.9 Arreglo ortogonal L9.....	36
Tabla 1.10 Términos y notaciones	37

Capítulo 2

Tabla 2.1 Datos técnicos principales de la Emco Concept Mill 260	42
Tabla 2.2 Datos técnicos principales del rugosímetro Mitutoyo SJ-210.....	43
Tabla 2.3 Datos técnicos del durómetro mara Phase II.....	45
Tabla 2.4 Propiedades físicas y químicas del acero K20.	47
Tabla 2.5 Descripción de la herramienta de corte	50
Tabla 2.6 Temperaturas límites de empleo de la herramienta	50
Tabla 2.7 Fluidos de corte según el método de trabajo.....	51
Tabla 2.8 Guía de selección de fluidos de corte.....	52
Tabla 2.9 Velocidad de corte para el acero AISI P20 recomendado por los fabricantes.	53
Tabla 2.10 Datos recomendados de corte del porta-insertos.....	53

Tabla 2.11 Niveles para la profundidad radial.	54
Tabla 2.12 Factores y niveles.	54
Tabla 2.13 Estrategias de mecanizado utilizadas en el estudio.	55
Tabla 2.14 Rango para los niveles de la velocidad de corte.	56
Tabla 2.15 Niveles para el factor velocidad de avance.	57

Capítulo 3

Tabla 3.1 Dureza de las caras antes del mecanizado.	65
Tabla 3.2 Arreglo ortogonal de Taguchi con los resultados de rugosidad medidos.	67
Tabla 3.3 Resultados del método Anova.	76
Tabla 3.4 Tabla de distribución F al 95% de confianza	78
Tabla 3.5 Tabla de evaluación de niveles según sus factores.	80
Tabla 3.6 Análisis de costos para un mecanizado plano en AISI P20.	84

Glosario

Fresado: incluye diversas operaciones de maquinado muy versátiles que tienen lugar en varias configuraciones usando una fresa, una herramienta multifilo que produce numerosas virutas en una sola revolución [1].

Fresa: una herramienta, provista de aristas cortantes dispuestas simétricamente alrededor de un eje, gira con movimiento uniforme y arranca el material al elemento que es impulsado contra ella [2].

Temple: tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica y se enfría luego más o menos rápidamente en un medio conveniente [3].

Templado: la solución sólida se preserva y la difusión de átomos y la precipitación de las partículas de segunda fase se suprimen por medio del temple rápido, comúnmente en agua [4].

Revenido: el acero se calienta a una temperatura específica y después se enfría una velocidad prescrita. Si los aceros se endurecen mediante tratamiento térmico, entonces se utiliza el revenido para reducir la fragilidad y los esfuerzos residuales y aumentar la ductilidad y la tenacidad [1].

Dureza: la dureza de un material se define como su resistencia a la indentación permanente. Por lo general, una dureza buena significa que el material es resistente a las rayaduras y al uso [5].

Dureza Rockwell (HRC): esta prueba mide la profundidad de penetración en lugar del diámetro de la indentación. El indentador se oprime sobre la superficie, primero con una carga menor y después con una carga mayor, la diferencia en las profundidades de penetración es una medida de la dureza del material [1].

Acabado Superficial: describe las características geométricas de una superficie, en tanto que integridad superficial se refiere a las propiedades del material, como la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión [1].

Rugosidad: la rugosidad se refiere a las desviaciones pequeñas, espaciadas finamente, de la superficie nominal y que están determinadas por las características del material y el proceso que formó la superficie [5].

Método Taguchi: es una herramienta de diseño de parámetros empleada para incrementar la calidad y optimizar la manufactura de los productos [1].

Método Anova: es una herramienta poderosa utilizada en la industria para el análisis estadístico en el control de procesos en laboratorios y control de métodos analíticos [6].

Resumen

El presente trabajo contiene las características mecánicas, físicas, químicas y los tratamientos térmicos, para conocer el grado de composición de los materiales que le permiten alcanzar altas durezas al acero AISI P20; por tanto se expone los diferentes materiales utilizados en fresado plano para elevadas durezas, con enfoque al software CAD/CAM, conjuntamente a esto se establece los métodos Taguchi y el análisis Anova empleados en el experimento.

Posteriormente se establece los factores, la maquinaria de trabajo y los instrumentos de medición, para la ejecución del tratamiento térmico de temple y revenido; luego se define el material específico de la herramienta, los datos técnicos y el fluido de corte que se aplica para determinar los niveles de cada factor y obtener la matriz ortogonal de 27 estrategias de mecanizado.

A continuación, se presenta el diseño experimental en el software CAD/CAM, la definición del programa Inventor HSM y la programación de las estrategias; posterior al mecanizado, se efectúa la medición de la dureza antes y después para conocer el resultado de variación que es del +2,07%. Luego se procede a medir la rugosidad de las caras, obteniendo como resultado los gráficos en 2D y 3D que ayudan a establecer una ecuación de regresión estadística para predecir la rugosidad; finalmente con el método Anova se determina el factor velocidad de corte con mayor influencia en el acabado superficial del 66,19% y evaluando los resultados con la prueba de hipótesis nula y alternativa se obtiene una estrategia mejorada de velocidad de corte = 25 m/min, avance = 101,461 m/min, trayectoria = ZIG-ZAG y profundidad radial = 1,29 mm, que permite tener una rugosidad óptima de 0,11 μm , que es verificada dentro del rango de tolerancia calculado.

Palabras claves: Fresado, fresa, templado, revenido, dureza, acabado superficial y rugosidad.

Abstract

The present work contains the characteristics mechanical, physical, chemical and thermal treatments, to know the degree of composition of the materials that allow it to reach high hardness to AISI P20 steel; Therefore, the different materials used in flat milling for high hardness are exposed, with a focus on CAD/CAM software, together with this, the Taguchi methods and the Anova analysis used in the experiment are stable.

Subsequently, the factors, the working machinery and the measuring instruments are established for the execution of the thermal treatment of quenching and tempering; it then defines the tool-specific material, technical data, and cutting fluid that is applied to determine the levels of each factor and obtain the orthogonal matrix of 27 machining strategies.

The following is the experimental design in the CAD/CAM software, the definition of the Inventor HSM program and the programming of the strategies; after the mechanization, the measurement of the hardness is carried out before and after to know the result of variation that is of +2,07%. Then we proceed to measure the roughness of the faces, resulting in 2D and 3D graphics that help to establish a statistical regression equation to predict the roughness. Finally the Anova method determines the cutting speed factor with greater influence on the surface finish of 66,19% and evaluating the results with the null and alternative hypothesis test an improved strategy of cutting speed is obtained = 25 m/min, Advance = 101,461 m/min, trajectory = ZIG-ZAG and radial depth = 1,29 mm, which allows optimum roughness of 0,11 μm , which is verified within the calculated tolerance range.

Keywords: Milling, mills, tempered, tempering, hardness, surface finish and roughness.

Introducción

El estudio de la rugosidad del acero AISI P20 en probetas planas, aplicadas en la práctica de procesos de manufactura, CAD/CAM y tratamiento térmico, abre una ventana al desarrollo de la investigación, que beneficie la producción de la matriz productiva, para obtener optimización de procesos, reducción de recursos y costos de fabricación, generando ganancias a las empresas que se dedican a la producción de artículos plásticos y fabricación de moldes de producción en el mercado nacional, debido a que se determinaran valores y parámetros para obtener superficies óptimas que reduzcan tiempos de pulido.

Este acero M238 es utilizado en la industria de la inyección, soplado y extrusión de plásticos las características importantes que ofrece son: una buena maquinabilidad, excelente pulido, excelente conductividad térmica y dureza uniforme. El alto contenido de Níquel permite que la resistencia mecánica sea uniforme hasta el núcleo y se utiliza en la fabricación de moldes plásticos con espesores superiores a 400mm. Este acero se utiliza para la fabricación de partes y accesorios en la industria automotriz y en la fabricación de máquinas [7].

En el acero M238 se realizará un tratamiento térmico que tiene como finalidad mejorar las propiedades y características; para realizarlo se necesita una serie de procesos; el calentamiento, tiempo de permanencia y enfriamiento. Los principales tratamientos térmicos que se utilizarán en la investigación son el temple y revenido. El temple tiene como objetivo cambiar la estructura del acero para obtener diferentes propiedades como el aumento de la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia al desgaste. El revenido se realiza en los aceros templados, tiene el propósito de reducir o eliminar tensiones internas para obtener la dureza requerida, el procedimiento consiste en el

calentamiento a una temperatura determinada por el tipo de material para luego realizar el enfriamiento [3].

La manufactura es una combinación de elementos físicos y humanos que algunos son complejos de controlar y predecir como son: el desempeño y su respuesta a alteraciones externas de las maquinas herramienta, los costos de materia prima es difícil pronosticar con precisión pues se han realizado avances como la simulación de los sistema de manufactura y modelado [1].

Diseño asistido por computador (CAD) es el uso de computadoras que sirven para hacer planos de diseños y modelos de productos. Los sistemas CAD se dividen en cuatro procesos como a) el modelado geométrico, b) análisis y optimización del diseño c) revisión y evaluación de diseños y d) documentación y proyectos [1].

La manufactura asistida por computador (CAM) consiste en el uso de computadoras para asistir las fases de manufactura. La combinación del sistema CAD/CAM permite que la etapa de diseño transfiera la información a la etapa de manufactura. Las ventajas de utilizar un sistema CAD/CAM se dan en las operaciones de maquinado que son capaces de describir la trayectoria de las herramientas y al minimizar los costos de manufactura y mejorar la producción [1].

Los parámetros de corte que intervienen en el maquinado son la profundidad de corte que se ajusta a la herramienta de corte, esta se desplaza con una determinada velocidad cuando la pieza gira, la velocidad de avance es la distancia que recorre la herramienta de corte por cada revolución de la pieza [1].

Para obtener el factor con más influencia en nuestro estudio se utilizará el método de Taguchi que combina la ingeniería y los métodos estadísticos para optimizar el diseño

del producto y los procesos de manufactura para así lograr alta calidad y bajos costos. La función de pérdida de Taguchi es una herramienta para comparar la calidad, mediante la minimización de las variaciones. El método Taguchi tiene una herramienta que se utiliza en el diseño de parámetros llamadas matrices ortogonales [6].

El método ANOVA conocido como el análisis de varianza es una herramienta estadística que se utiliza en la industria para el control de procesos. Es un método empleado para analizar los resultados de diferentes factores en los diseños experimentales. Tiene una variedad de aplicaciones pero los dos principales son: la comparación de múltiples columnas de datos y la estimación de los componentes de variación de un proceso [6].

Objetivos

General

Determinar los parámetros óptimos en fresado plano para un acero AISI P20 con tratamiento térmico temple-revenido con un rango de dureza 60-64 HRC.

Específicos

- Establecer los tratamientos térmicos y durezas aplicados en los aceros utilizados en la industria plástica y las herramientas empleadas para el proceso de maquinado en aceros con tratamiento térmico.
- Estudiar las trayectorias que son empleadas en el software CAM para aprovechar sus estrategias e interacción con la fresadora CNC.
- Recopilar datos mediante la variación de parámetros de mecanizado en el fresado plano.
- Evaluar los factores que mayor influyen en la rugosidad del material comparando los datos prácticos con un método estadístico.
- Realizar el análisis comparativo de los valores de rugosidad obtenidos en la interacción entre el Software CAM y la fresadora CNC con un modelo estadístico adecuado.
- Analizar los costos empleados para obtener diferentes tipos de rugosidad en las superficies de las probetas.

Alcance

Realizar el tratamiento térmico temple y revenido en el acero AISI P20 para mecanizar las probetas con los parámetros de corte seleccionados en la investigación, además emplear un análisis estadístico de los resultados para desarrollar una optimización de los parámetros que influyen estadísticamente en el resultado de la rugosidad superficial.

CAPITULO 1

Marco teórico

1.1 Acero AISI P20

Es un acero de uso universal para procesamiento de plásticos no corrosivos, este tipo de acero contiene propiedades deseadas en los procesos de fabricación de moldes para inyección de plástico, tiene una buena maquinabilidad, excelente respuesta al brillo, gran templabilidad y tenacidad [8].

1.1.1 Propiedades de Acero AISI P20

El AISI P20 conocido con el nombre comercial M238 es un acero prebonificado y al contener Níquel en su aleación garantiza una resistencia mecánica uniforme hasta el núcleo, para el caso de fabricación de moldes plásticos con espesores mayores de 400 mm. Su fácil maquinabilidad permite aumentar la velocidad de corte y de avance para así obtener el incremento de la productividad en menor tiempo [7].

1.1.2 Características del Acero AISI P20

El acero AISI P20 es aleado al Cromo, Níquel, Molibdeno desgasificado al vacío, que al realizar el tratamiento térmico de templado y revenido con alta pureza y uniformidad se puede obtener las siguientes particularidades [8]:

- Excelente capacidad para el pulido [8].
- Buena maquinabilidad [8].
- Alta pureza y homogeneidad [8].
- Dureza uniforme en todas las dimensiones [8].

La tabla 1.1 muestra la cantidad aproximada porcentual de cada compuesto que se encuentra dentro de la composición del material AISI P20.

Tabla 1.1 Composición química del Acero AISI P20 [7].

Composición química	Valores aproximados en %
C	0,38
Si	0,30
Mn	1,50
Cr	2,00
Mo	0,20
Ni	1,10

La tabla 1.2 indica las propiedades físicas del acero AISI P20.

Tabla 1.2 Características físicas del Acero AISI P20 [8].

Características Físicas			
	Unidades	Valores	
Temperatura	°C	20	200
Densidad	Kg/m ³	7800	7750
Coefficiente de dilatación térmica	°C	11.1x10 ⁻⁶	12.9x10 ⁻⁶
Conductividad térmica	W/m °C	29	30
Módulo de elasticidad	N/mm ²	205000	200000
Calor específico	J/Kg °C	460	-

1.1.3 Aplicación

Se utiliza para moldes de gran tamaño con espesores superiores a 400 mm para la transformación de materiales plásticos, armazones de moldes para la industria de inyección, soplado y extrusión de plástico, piezas en la fabricación de maquinaria y en la industria automotriz [7].

1.1.4 Tratamiento térmico en el Acero AISI P20

American Society for Metals the Metals Park, Ohio, EE.UU., define los tratamientos térmicos como una mezcla de operaciones de calentamiento y enfriamiento en tiempos definidos dependiendo del material hasta obtener las propiedades requeridas [9].

El material 1-2738 denominado en la norma DIN puede ser utilizado en el estado de templado y revenido para aumentar la dureza, en su estado original tiene una dureza de 28 - 32 HRC y puede aumentar después del tratamiento térmico a 52-54 HRC [8].

Se puede aplicar una serie de operaciones tomando en cuenta los siguientes parámetros [8]:

a. Temple

Es un tratamiento térmico que tiene como objetivo modificar la estructura del acero para obtener diferentes propiedades como el aumento de la dureza, de la resistencia mecánica, resistencia al desgaste y otros. Consiste en calentar el acero a una temperatura superior a la crítica que es entre 840°C - 870°C y luego enfriar bruscamente en un medio líquido o gaseoso como el agua, aceite etc [7].

La tabla 1.3 muestra los valores obtenidos después de dar temple al acero AISI P20.

Tabla 1.3 Parámetros de temple [8].

Temperatura de temple	Medio de enfriamiento	Dureza después del temple	
840 – 870 °C	Aceite - baño sales 180-220°C	52-54 HRC	1730 N/mm ²

b. Revenido

Es un proceso final del tratamiento térmico que se aplica en los aceros previamente templados que consiste en un calentamiento a temperatura inferior a la crítica de

200 °C, tiene la finalidad de eliminar las tensiones internas que se da en el material durante el temple y así obtener la dureza requerida y resistencia mecánica deseada [3].

La tabla 1.4 muestra los valores obtenidos después de dar el revenido a diferentes temperaturas y la dureza acero AISI P20.

Tabla 1.4 Parámetros de revenido [8].

Temperatura	°C	100	200	300	400	500	600	700
Dureza	HRC	51	50	48	46	42	39	28

1.2 Dureza

La dureza de un material se determina como su resistencia a la indentación permanente es decir que es capaz de soportar el esfuerzo sin deformarse [5].

1.2.1 Ensayo Brinell

Consiste en presionar una esfera de acero o de carburo de tungsteno de 10 mm de diámetro, contra la superficie del material con una carga de 500, 1500 o 3000 kg. Para obtener el número de dureza de Brinell (BHN) se divide la carga entre el área de indentación [5].

La ecuación es:

$$HB = \frac{2F_i}{\pi D_b (D_b^2 - D_i^2)} \quad (1.1)$$

Donde:

- HB : Dureza Brinell. [BHN]
- F_i : Carga de indentación. [kg]
- D_b : Diámetro de la esfera. [mm]
- D_i : Diámetro de la indentación sobre la superficie. [mm]

En la figura 1.1 se muestra la manera de realizar el proceso de prueba de dureza Brinell con sus dimensiones F_i , D_b y D_i .

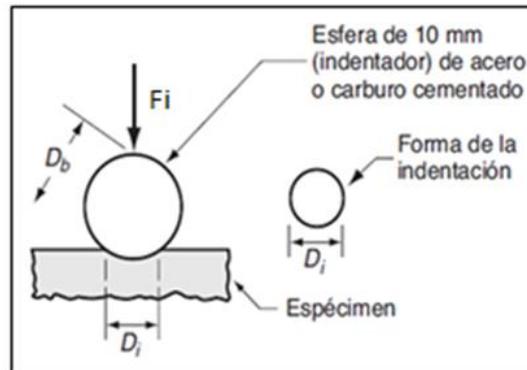


Figura 1.1 Procedimiento de prueba de la dureza Brinell [5].

1.2.2 Dureza Rockwell

Esta prueba mide la profundidad de penetración del indentador cónico, se oprime sobre la superficie con una carga que se obtiene dependiendo la escala de Rockwell como se observa en la tabla 1.5, y una precarga que es determinada por el durómetro, la diferencia en las profundidades de penetración es la medida de la dureza del material [1].

La tabla 1.5 muestra algunas de las escalas de dureza Rockwell e indentadores frecuentemente utilizados con sus respectivas cargas [1].

Tabla 1.5 Escalas de dureza de Rockwell [5].

Escala de Rockwell	Símbolo de Dureza	Indentador	Carga (kg)	Materiales Comunes
A	HRA	Cono	60	Carburos, cerámicas
B	HRB	Esfera 1.6mm	100	Metales no ferrosos
C	HRC	Cónico de diamante	150	Metales ferrosos, acero para herramientas

En la figura 1.2 indica la manera de realizar la prueba de dureza Rockwell.

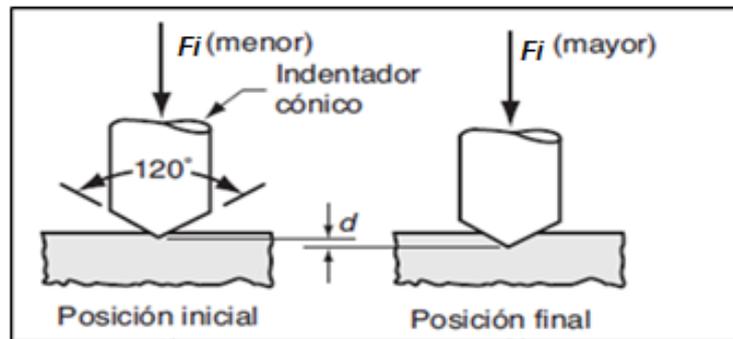


Figura 1.2 Procedimiento de prueba de la dureza Rockwell [5].

1.3 Herramientas de Corte

Para ejecutar las operaciones de mecanizado se utilizan herramientas de corte, éstas se someten a elevadas temperaturas a lo largo de la cara de ataque, elevados esfuerzos que se produce en la punta de la herramienta, rozamiento a lo largo de la interfaz herramienta-viruta y en la superficie maquinada, los parámetros mencionados producen un desgaste en la herramienta. La selección de los materiales de las herramientas de corte es un factor importante en las operaciones de maquinado [1].

Se indica diferentes propiedades que deben poseer los materiales para las herramientas de corte [5]:

- Deben tener alta tenacidad para evitar las fallas por fractura [5].
- La dureza en caliente es necesario para evitar altas temperaturas que se genera al operar la herramienta [5].
- Los materiales para las herramientas de corte deben ser duros. El acabado superficial, la composición química de la herramienta y el material de trabajo afectan la resistencia al desgaste [5].

La figura 1.3 muestra la dureza en las escalas HRA y HRC en función de las temperaturas en °C y °F, para varios materiales [1].

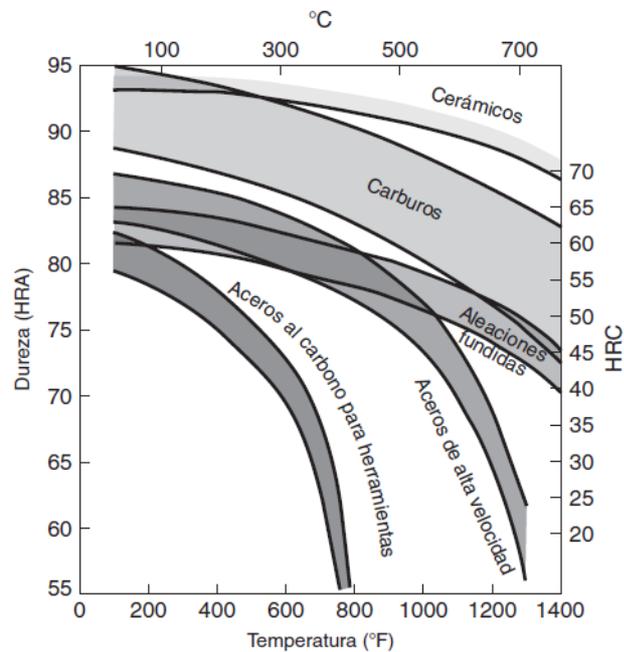


Figura 1.3 Dureza de diferentes materiales para herramientas de corte en función de la temperatura [1].

1.3.1 Materiales de la herramienta

a. Carburos

Debido a su alta dureza en un rango extenso de temperaturas, su alto módulo elástico, alta conductividad térmica y baja dilatación térmica, los carburos se encuentran entre los materiales importantes, versátiles y de costo efectivo para varias aplicaciones como herramientas de corte y matrices [1].

Se clasifican en dos grupos:

- Carburo de tungsteno

Consta de partículas de carburo de tungsteno aglutinadas en una matriz de cobalto. Las

herramientas de carburo de tungsteno se emplean para cortar aceros, hierros fundidos y materiales no ferrosos abrasivos y han sustituido a las herramientas de acero de alta velocidad debido a un buen desempeño [1].

- Carburo de titanio

Consta de una matriz de níquel y molibdeno. La resistencia al desgaste es mayor en comparación al carburo de tungsteno. El carburo de titanio es apropiado para mecanizar materiales duros y para cortar a velocidades más elevadas que el carburo de tungsteno [1].

b. Cermets

Se encuentran compuestos de materiales metálicos y cerámicos. Éste material es utilizado para el acabado a altas velocidades y desbastes ligeros, los cermets permiten velocidades elevadas en comparación de lo carburos [5].

Pese a que tiene estabilidad química y resistencia a la formación de bordes acumulados, su alto costo y fragilidad son factores que no permiten su uso ampliamente [1].

c. Inserto

Los insertos se utilizan considerablemente en el mecanizado debido que son económicos y adaptables a varias operaciones de maquinado [5].

Las herramientas de corte de acero de alta velocidad tienen la forma de una sola pieza y para proporcionarles diferentes características geométricas se las rectifican, éstas herramientas incluyen insertos, brocas y cortadores para fresado y engranes. Cuando

se desgasta el filo de corte se retira la herramienta del soporte y se debe reafilarse. Los insertos se sujetan sobre el portaherramientas con distintos mecanismos de sujeción [1].

La tabla 1.6 muestra las propiedades importantes de diferentes materiales que se utilizan para las herramientas de corte [1].

Tabla 1.6 Propiedades de varios materiales para herramientas de corte [1].

	Acero de alta velocidad	Carburos		Cerámicos
		Tungsteno	Titanio	
Dureza (HRC)	63-69	75-84	77-80	77-84
Resistencia a la compresión (Mpa)	4100-4500	4100-5850	3100-3850	2750-4500
Resistencia ruptura transversal (Mpa)	2400-4800	1050-2600	1380-1900	345-950
Resistencia al impacto (J)	1,35-8	0,34-1,35	0,79-1.24	<0,1

1.4 Mecanizado o maquinado

Es un proceso de fabricación en el que se utiliza una herramienta de corte para eliminar el exceso de material en una pieza de trabajo, de tal forma que el material remanente sea la forma del producto requerido [5].

En el mecanizado interactúan las características de la pieza de trabajo, los materiales de la herramienta, el lubricante, la geometría del proceso y las propiedades de las máquinas herramientas [4].

1.4.1 Variables independientes en el mecanizado

El operador de la máquina tiene el control directo sobre las variables independientes y al configurar el proceso de mecanizado pueden ser especificadas o seleccionadas [10].

Estas son:

a. Material de la pieza

La metalurgia y la química de la pieza de trabajo se pueden especificar o ya se conocen. El material debe ser seleccionado para una aplicación en particular y así poder maquinar correctamente [10].

b. Geometría inicial

El tamaño y la forma de la pieza de trabajo pueden ser realizados por procesos o pueden seleccionarse a partir de un material para mecanizado estándar. Ésta variable influye directamente en los procesos de mecanizado que se seleccionan y en las profundidades de corte [10].

c. Procesos específicos de mecanizado

La selección de los procesos de mecanizado necesarios para convertir la materia prima en un producto acabado debe basarse en la geometría de la pieza, los acabados y tolerancias requeridas y la cantidad del producto trabajado [11].

d. Procesos de formación de virutas

Existen siete procesos básicos de formación de virutas: torneado, conformado, fresado, taladrado, aserrado, brochado y mecanizado abrasivo [10].

e. Materiales para herramientas

Los tres materiales para herramienta de corte más comunes utilizados en las operaciones de mecanizado son: acero de alta velocidad (HSS), tanto en forma de forjado como de metalurgia de polvo (P/M), carburos, y herramientas revestidas.

Cuanto más duro sea el material de la herramienta, mejor puede resistir el desgaste a velocidades de corte más rápidas [10].

f. Parámetros de corte

Para cada operación de mecanizado se debe seleccionar la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte. La selección adecuada de las variables también depende de las otras variables de entrada que se hayan seleccionado como: la cantidad total de material a retirar, la pieza de trabajo, los materiales para herramienta y el proceso de mecanizado [10].

g. Geometría de herramientas

Las herramientas de corte a menudo están diseñadas para realizar operaciones requeridas y su geometría se escoge para llevar a cabo funciones de mecanizado específicas [10].

h. Fluidos de corte

La selección del fluido de corte apropiado para una combinación particular de material de trabajo y material de herramienta puede representar la diferencia entre el éxito y el fracaso de todos los procesos de mecanizado de producción. Los fluidos de corte sirven para enfriar la pieza de trabajo, la herramienta y las virutas, reducir la fricción mediante lubricación, mejorar el acabado superficial y proporcionar protección superficial a la pieza de trabajo [11].

1.4.2 Variables dependientes en el mecanizado

Son aquellas que son afectadas por los cambios en las variables independientes [1].

Éstas son:

a. Tamaño y propiedades del producto terminado

El objetivo del mecanizado es obtener una superficie mecanizada de tamaño, geometría y propiedades mecánicas deseados. Debido a que el mecanizado es un proceso de deformación plástico localizado, cada superficie mecanizada tendrá alguna deformación residual que queda en ella [11].

b. Acabado superficial

El acabado final en una superficie mecanizada es una función de la geometría de la herramienta, material de la herramienta, material de la pieza de trabajo, proceso de mecanizado, velocidad, alimentación, profundidad de corte y fluido de corte [11].

c. Desgaste de herramientas

La deformación plástica y la fricción relacionados al mecanizado producen un calor considerable, lo que eleva la temperatura de la herramienta y reduce su resistencia al desgaste [11].

1.5 Fresado

Es un proceso de maquinado versátil y ampliamente utilizados en la manufactura de partes, en la cual se hace pasar una pieza de trabajo por delante de una herramienta cilíndrica rotatoria llamado fresa [5].

Existen numerosas variedades de geometrías de fresas, las que se clasifican de acuerdo con la posición de la herramienta respecto al materia prima a maquinar [4].

La forma geométrica creada por el fresado es una superficie plana. Se pueden crear formas diferentes mediante la trayectoria de la herramienta de corte [5].

1.5.1 Operaciones en el fresado

Tipos de operaciones en el fresado:

a. Fresado periférico

El eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador [5].

b. Fresado frontal.

El eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta cortando las orillas, tanto en el extremo como fuera de la periferia de la fresa [5].

El tipo de fresado que se utilizó en la investigación fue el fresado frontal como se muestra en la figura 1.4.

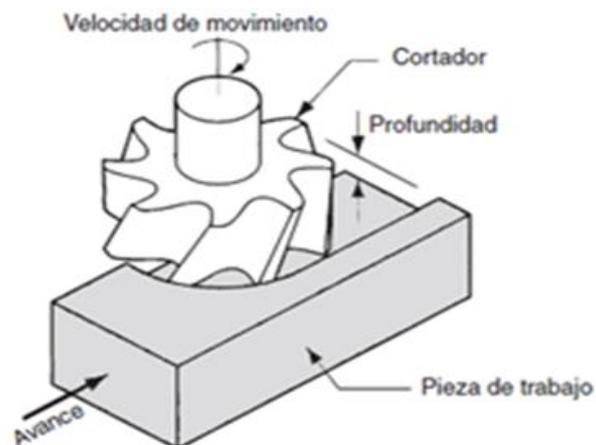


Figura 1.4 Fresado frontal [5].

1.5.2 Parámetros de corte en el fresado

a. Velocidad de corte

La velocidad de corte en el fresado es la velocidad superficial de la herramienta de corte [1].

$$V_c = \frac{\eta * \pi * D}{1000} \quad (1.2)$$

Donde:

V_c	Velocidad de corte.	[m/min]
D	Diámetro de la fresa.	[mm]
η	Velocidad del husillo.	[rpm]

b. Velocidad de avance

El avance en el fresado se determina como el avance por diente cortante se representa el tamaño de la viruta formada por cada filo de corte, el cual se transforma en la velocidad de avance [5].

$$V_a = \eta \cdot f_z \cdot z \quad (1.3)$$

Donde:

V_a	Velocidad de avance.	[mm/min]
f_z	Avance por diente.	[mm]
η	Velocidad del husillo.	[rpm]
z	Número de dientes en la fresa.	

c. Profundidad de corte

Es la profundidad de la capa arrancada de la superficie de la pieza en una pasada de la herramienta [1].

$$a_e = 0.9 * D \quad (1.4)$$

Donde:

a_e :	Profundidad de corte	[m/min]
D :	Diámetro de la fresa.	[mm]

d. Tiempo de mecanizado

El tiempo requerido para fresar una pieza de trabajo de longitud debe tomar en cuenta la distancia de aproximación requerida para enganchar completamente la fresa [5].

$$T_m = \frac{L + A}{V_a} \quad (1.5)$$

Donde:

T_m :	Tiempo de mecanizado	[min]
V_a :	Velocidad de avance.	[mm/min]
L :	Longitud de la pieza de trabajo.	[mm]
A :	Área horizontal del contacto de la fresa con la pieza de trabajo.	[rpm]

e. Potencia de corte

$$P_c = \frac{a_p * a_e * v_a * F_c}{60 * 10^6} \quad (1.6)$$

Donde:

p_c :	Potencia de corte.	[kW]
a_p :	Profundidad axial de corte.	[mm]
a_e :	Profundidad radial de corte.	[mm]
v_a :	Velocidad de avance.	[mm/min]
F_c :	Fuerza de corte específica.	[N/mm ²]

La figura 1.5 indica la potencia de corte en el fresado.

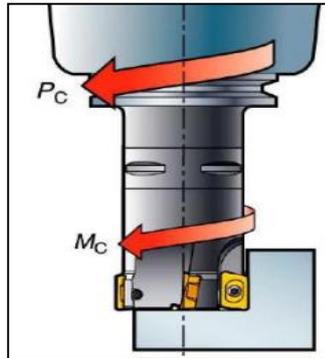


Figura 1.5 Método para determinar el consumo de potencia en un fresado [12].

1.5.3 Mecanizado por arranque de viruta en acero AISI P20

Los valores dados en la tabla 1.7 y tabla 1.8, pueden considerarse como guía, para ser adaptados a las condiciones reales de trabajo [8].

a. Fresado frontal y axial

Tabla 1.7 Parámetros de corte en el fresado frontal y axial [8].

Parámetros de Corte	Fresado con metal duro	
	Fresado de desbaste	Fresado Fino
Velocidad de corte (V_c) m/min	80-110	110-130
Avance (f_z) mm/diente	0.2-0.4	0.1-0.2
Profundidad de corte (a_p) mm	2-5	2

b. Fresado de acabado

Tabla 1.8 Parámetros de corte en el fresado de acabado [8].

Parámetros de Corte	Tipo de Fresa	
	Metal duro integral	Inserto de metal duro
Velocidad de corte (V_c) m/min	50	100-150
Avance (f_z) mm/diente	1.03-0.2	0.08-0.2
Mecanizado grupo ISO	K10,P40	P20-P0

1.6 Fuerzas y potencia de corte

Para mecanizar una pieza a una velocidad de corte, avance, trayectoria y profundidad de corte con un lubricante específico el material de la herramienta de corte y su geometría, genera fuerzas de corte y consume energía [10].

1.6.1 Fuerzas de corte

Los datos sobre las fuerzas de corte son importantes para mantener la precisión dimensional requerida en el proceso de maquinado. Al seleccionar los portaherramientas y los dispositivos apropiados de sujeción de piezas ayuda a no ocasionar deformación excesiva en la pieza de trabajo al aplicar las fuerzas de corte [1].

En la figura 1.6 muestra las fuerzas que actúan en el corte ortogonal en un círculo de fuerzas. La fuerza de corte (F_c) actúa en dirección de la velocidad de corte (V) y aporta la energía necesaria para el corte [1].

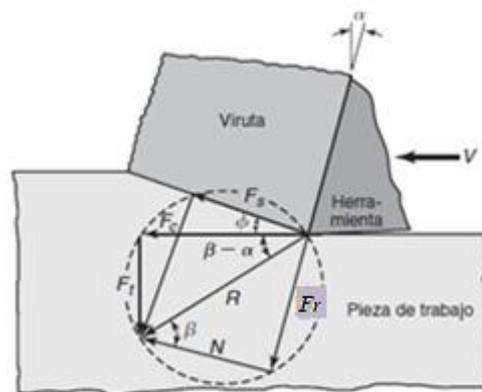


Figura 1.6 Círculo de fuerzas para determinar las fuerzas que actúa en la zona de corte [1].

La fuerza de empuje (F_t) actúa en dirección normal a la velocidad de corte (V). Estas dos fuerzas producen la fuerza resultante (R) [1].

a. La fuerza resultante se descompone en dos componentes sobre la cara de la herramienta [1]:

$$F_r = R \operatorname{sen} \beta \quad (1.7)$$

$$N = R \cos \beta \quad (1.8)$$

Donde:

F_r : Fuerza de fricción. [N]

N : Fuerza normal que es perpendicular a la fuerza de fricción. [N]

β : Ángulo de fricción.

b. Fuerzas en el plano cortante.

Fuerza resultante está equilibrada por una fuerza igual y opuesta a lo largo del plano de cizallamiento que se puede encontrar en las siguientes formulas [1]:

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \operatorname{sen} \phi \quad (1.9)$$

$$F_n = F_c \operatorname{sen} \phi - F_t \cos \phi \quad (1.10)$$

Donde:

F_s : Fuerza de cizallamiento. [N]

F_n : Fuerza normal que es perpendicular a la fuerza de fricción. [N]

ϕ : Ángulo de cizallamiento.

c. Fuerzas sobre la herramienta de corte.

La fuerza de empuje (F_t) tiene como función mantener suficientemente rígidos el portaherramientas, los dispositivos de sujeción del trabajo y la máquina herramienta para soportar las deflexiones mínimas [1].

$$F_t = R \sin(\beta - \alpha) \quad (1.11)$$

$$F_t = F_c \tan(\beta - \alpha) \quad (1.12)$$

1.6.2 Potencia de corte

Es el producto de la fuerza y la velocidad, la alimentación de potencia del corte es [1]:

$$Potencia = F_c * V \quad (1.13)$$

1.7 Manufactura CAD/CAM

La manufactura es un sistema complejo ya que consta de múltiples elementos físicos y humanos, algunos de los cuales son complicados de predecir y controlar. Un sistema de manufactura se puede representar a través de modelos matemáticos y físicos que muestren la naturaleza y el grado de interdependencia de todas las variables comprendidas [1].

El avance tecnológico de las computadoras ha facilitado obtener mayor calidad a menor costo en actividades de diseño y manufactura, gracias a la alta velocidad de procesadores y software desarrollados. Permite controlar desde el diseño de proyectos de partes individuales hasta el modelado de procesos y sistemas de manufactura [1].

1.7.1 Dibujo asistidos por computadora (CAD)

El término dibujo asistido por computador se refiere a una familia de tecnologías basadas en computadoras que se usan para crear, analizar y optimizar el diseño en la ingeniería. Normalmente los programas CAD proporcionan una interfaz gráfica de usuario (GUI, sus siglas en inglés) que permite introducir y manipular objetos geométricos en dos y tres dimensiones, crear dibujos de ingeniería, hacer análisis

básicos en ingeniería como el cálculo de las propiedades de masa y visualizar piezas individuales y ensambles complejos [13].

El software CAD (dibujo asistido por computadora) tiene herramientas poderosas que sirven para diseñar y modelar la geometría de componentes y productos finales. Para generar y diseñar planos tiene estaciones de trabajo y un monitor que permite mostrar de forma continua con diferentes colores los distintos componentes. El diseñador puede unir con facilidad los componentes gracias a las pantallas gráficas, donde se puede modificar brevemente un diseño específico para cumplir los requisitos particulares [13].

a. Elementos de sistema CAD

En la figura 1.7 se ha incluido un conjunto de tareas agrupadas en proceso CAD que, a su vez, son subconjuntos del proceso de diseño y proceso de fabricación respectivamente.

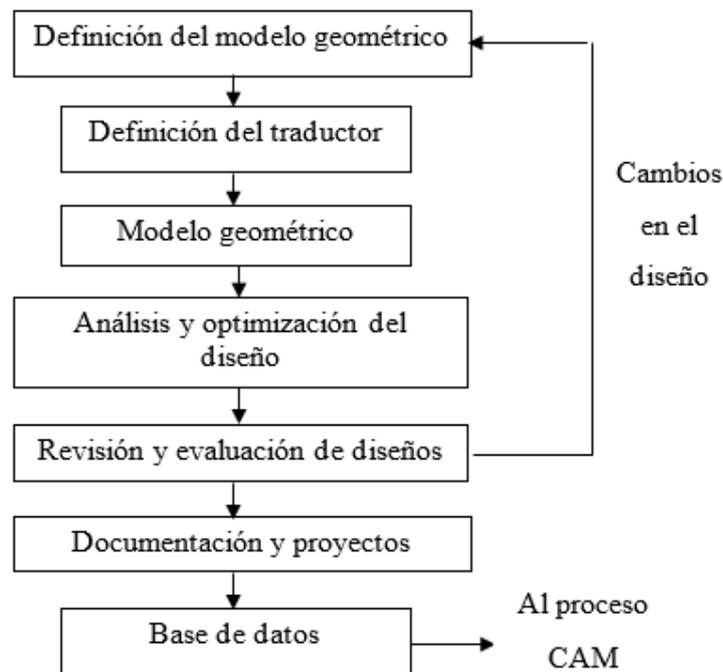


Figura 1.7 Proceso CAD [14].

b. Ventajas de los programas CAD

- Disminuye la fase de diseño al observar el producto en tiempo real y facilita el trabajo de varias subpartes que conforman un solo conjunto.
- El software CAD contiene subcategorías especializadas para aplicaciones y necesidades específicas del usuario. Entre estas destacan alternativas como: biblioteca de elementos normalizados, derechos de autor, elevada precisión en los dibujos de los elementos generados.
- Al aplicar normativas de dibujo técnico se obtienen planos del producto final de manera automática, rápida, con versatilidad de vistas y cortes. Sus amplias aplicaciones contienen alternativas como cálculos de costo de fabricación del producto.
- En la actualidad la conexión a internet facilita la comunicación e intercambio de ideas en tiempo real de los integrantes del grupo de trabajo multidisciplinario.

1.7.2 Manufactura asistida por computadora (CAM)

La manufactura asistida por computadora consiste en el uso de computadoras para auxiliar en todas las fases de manufactura de un producto. La combinación del diseño asistido por computadora y la manufactura asistida por computadora se transforma en sistemas CAD/CAM. La CAM almacena y procesa la base de datos desarrollada durante el CAD con los datos e instrucciones necesarios para operar y controlar maquinaria de producción, equipo de manejo de materiales, ensayos e inspecciones automatizadas para alcanzar la calidad de los productos [1].

Las instrucciones o códigos de programa se generan en la computadora y el programador puede cambiar para optimizar la trayectoria de las herramientas. El

ingeniero verifica de forma visual que no existan colisiones en la trayectoria de las herramientas con las prensas de sujeción, soportes fijos u otras interferencias [14].

Las redes computacionales contribuyen enormemente el desarrollo de los sistemas CAD/CAM, pero tiene la desventaja en la privacidad de información, porque el sistema de red es muy complejo y existe un mayor número de usuarios con acceso directo a él. El desarrollo de numerosos protocolos sea creado con el fin de salvaguardar las comunicaciones entre computadoras como por ejemplo: ETHERNET, tcp/ip, map/top, ascii, ftp, nfs, y muchos otros [14].

a. Proceso de generación CAM

En la figura 1.8 se ha incluido un conjunto de tareas de proceso CAM que, a su vez, son subconjuntos del proceso de diseño y proceso de fabricación respectivamente.

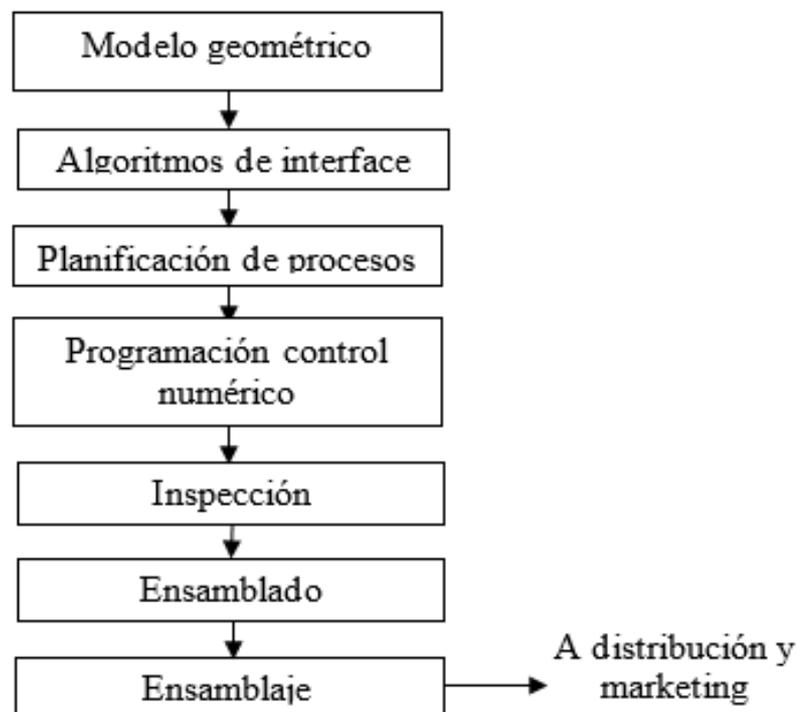


Figura 1.8 Proceso CAM [14].

b. Proceso de diseño y fabricación CAD/CAM

En la práctica, el CAD/CAM se utiliza de distintas formas, para producción de dibujos y diseño de documentos, animación por computador, análisis de ingeniería, control de procesos, control de calidad, etc. Por tanto, para clarificar el ámbito de las técnicas CAD/CAM, las etapas que abarca y las herramientas actuales y futuras, se hace necesario estudiar las distintas actividades y etapas que deben realizarse en el diseño y fabricación de un producto. Para referirnos a ellas emplearemos el término ciclo de producto que aparece reflejado en la figura 1.9 [14].

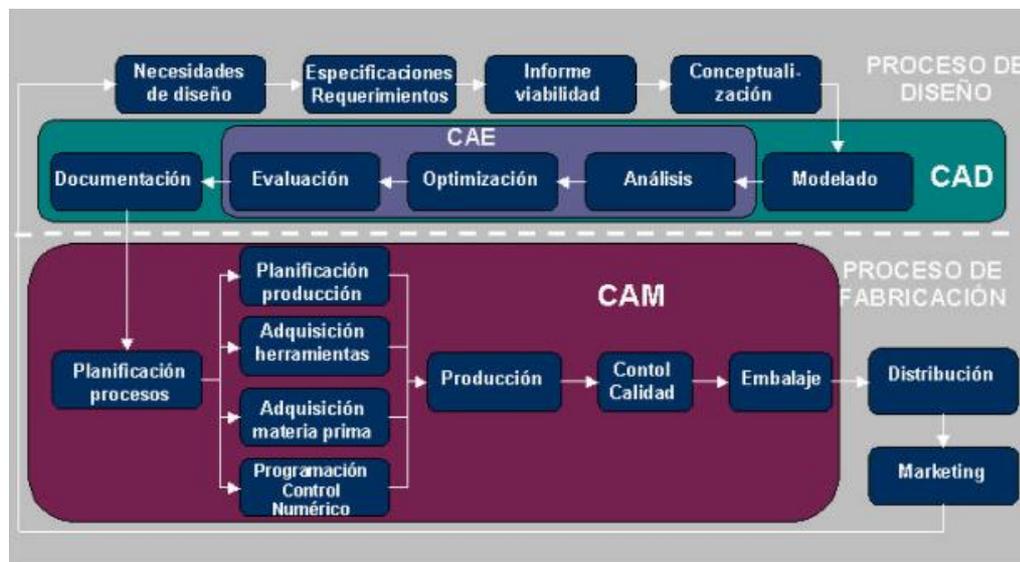


Figura 1.9 Ciclo de producto típico [14].

c. Ventajas de los programas CAM

- Al utilizar software CAD/CAM se reduce el esfuerzo de diseño, pruebas y fabricación de los prototipos, esto representa una reducción significativa en los costos de manufactura y mejora en la productividad.
- Los programas CAM ahorran tiempo de programación del control numérico y elimina los errores del operador con la máquina-herramienta.

- Reduce los costes de fabricación al aminorar el desgaste y rotura de las herramientas de corte.

1.8 Conceptos de rugosidad

1.8.1 Acabado superficial

En la figura 1.10 se puede observar una fotografía de una superficie de acero maquinada, realizada en un microscopio electrónico de barrido. En el acabado superficial se puede describir las características geométricas de un área ya que la integridad superficial se refiere a las propiedades del material, como la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión, que se ven influidas por la naturaleza de la superficie producida [1].

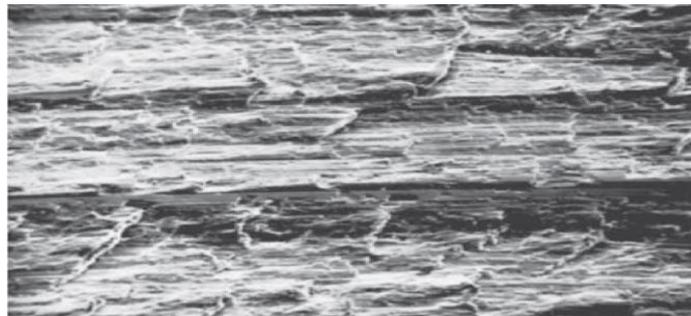


Figura 1.10 Superficie maquinada producida sobre acero [1].

Si la herramienta tiene un radio de punta mayor en relación con la profundidad de corte, la herramienta solo roza la superficie maquinada. Al rozar se genera calor e induce esfuerzos superficiales residuales, que ocasionan daños superficiales, como desgarramiento y agrietamiento. Como resultado la profundidad de corte tiene que ser mayor al radio de filo de corte [1].

En operaciones de cilindrado, como en otros procesos de corte, la herramienta deja protuberancias de avance sobre la superficie maquinada cuando se mueve por la pieza

de trabajo. Si mayor es el avance y menor el radio de la punta de la herramienta, las marcas serán más elevadas. Esto se demuestra por medio de la ecuación [1]:

$$R_a = \frac{V_a^2}{8r_a} \quad (1.14)$$

Donde:

R_a :	Es el valor medio aritmético	[μm]
V_a :	Avance	[mm]
r_a :	Radio de la punta de la herramienta	[mm]

- La deformidad en la superficie se presenta como raspaduras, grietas, orificios, depresiones, costuras y desgarramientos [1].
- La rugosidad se define como las desviaciones irregulares en pequeña escala espaciadas estrechamente; se expresa en términos de su peso, anchura y distancia a lo largo de la superficie [1].
- La ondulación es la desviación recurrente de una superficie plana; se mide y describe en términos del espacio entre las crestas adyacentes de las ondas y la altura entre las crestas y valles de las ondas [1].

Por lo general, la rugosidad superficial se describe mediante dos métodos:

1° El valor medio aritmético (R_a) se basa en el esquema de una superficie rugosa, como se muestra en la figura 1.11. Se define como [1]:

$$R_a = \frac{a + b + c + d + \dots}{n} \quad (1.15)$$

Donde:

$a + b + c + d + \dots$:	Son valores absolutos
n :	Cantidad de lecturas

2° La rugosidad de la raíz media cuadrática R_q , se define como:

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}} \quad (1.16)$$

La línea de referencia AB en la figura 1.11 se localiza de manera que la suma de las áreas sobre de la línea es igual a la suma de las áreas abajo de la misma [1].

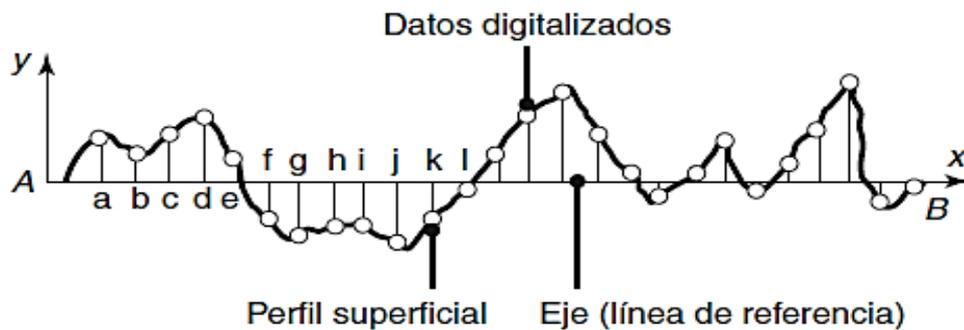


Figura 1.11 Coordenadas utilizadas para medir la rugosidad superficial [1].

Las unidades utilizadas para la rugosidad superficial son μm o μpulg . Obsérvese que $1 \mu\text{m} = 40 \mu\text{pulg}$, o $1 \mu\text{pulg} = 0.025 \mu\text{m}$ [1].

En la figura 1.12 se puede ver un esquema de la rugosidad con sus partes importantes en una superficie plana. En general, una superficie no se puede describir sólo por su valor R_q o R_a , ya que estos valores son promedios. Dos superficies pueden tener el mismo valor de rugosidad, pero contar con una topografía real muy diferente [6].

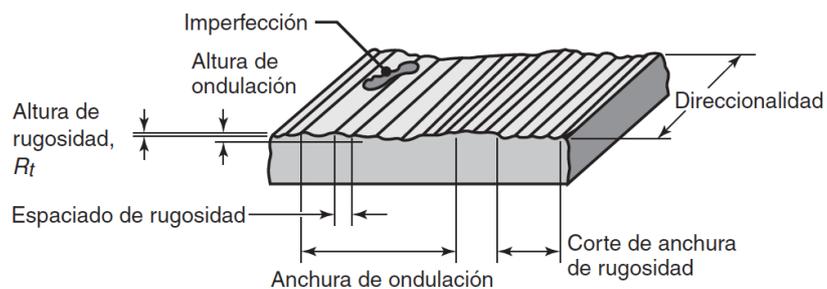


Figura 1.12 Esquema de la rugosidad y ondulaciones en una superficie [1].

1.8.2 Tolerancias en maquinado

En cualquier proceso de manufactura existe variabilidad y las tolerancias se usan para establecer límites permisibles de esa variación [5].

1.8.3 Acabado superficial en maquinado

La rugosidad de una superficie mecanizada depende de varios factores que pueden agruparse de la siguiente manera [5].

a. Factores geométricos

Estos factores determinan la geometría de la superficie en una pieza maquinada estos influyen en el tipo de proceso de maquinado, la geometría de la herramienta y el avance [1].

b. Factores de material de trabajo

Los factores importantes del material de trabajo que afectan el acabado son: efectos de recrecimiento del filo, deterioro a la superficie provocado por la viruta enredada en el trabajo, desgarramiento de la superficie de trabajo durante la formación de viruta cuando se maquinan materiales dúctiles y factores de vibración en la máquina [5].

En la tabla 1.13 se muestra varios tipos de proceso de fabricación con su respectivo rango de rugosidad.

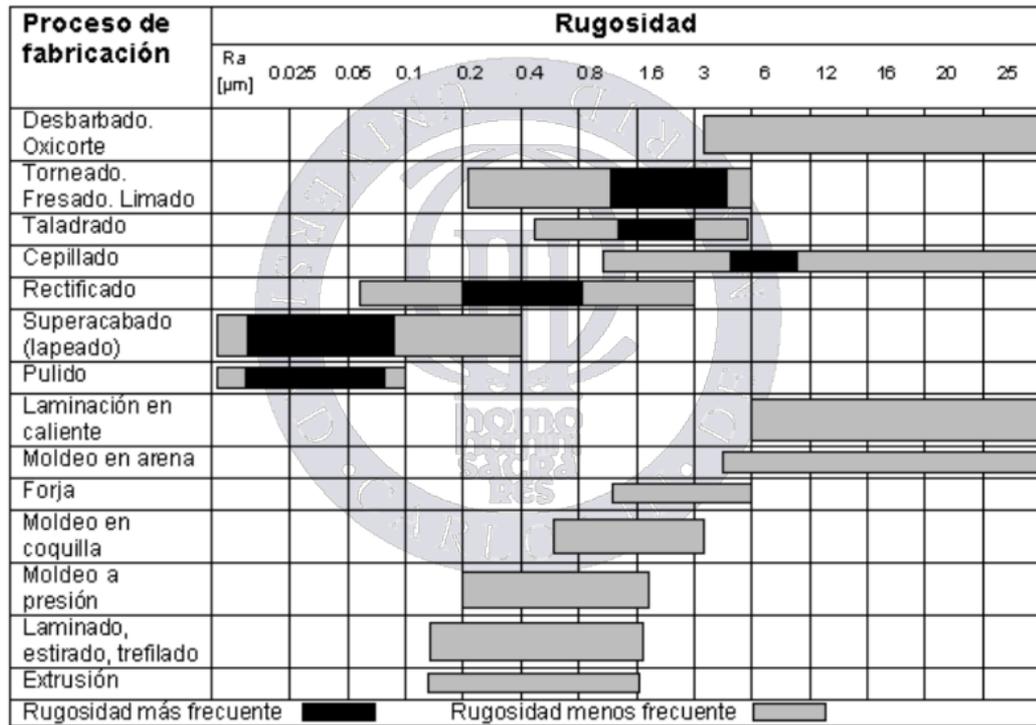


Figura 1.13 Rugosidad superficial producida por diferentes métodos de producción [10].

1.9 Métodos estadísticos

1.9.1 Método Taguchi

En los métodos de G. Taguchi (1924), la alta calidad y los bajos costos se logran combinando la ingeniería y los métodos estadísticos para optimizar el diseño del producto y los procesos de manufactura [1].

El diseño del sistema es la parte donde se determinan los factores que afectan la característica de calidad. El diseño de parámetros es la parte donde se determinan los niveles óptimos de los factores, se predice la respuesta en estos niveles y se llevan a cabo experimentos de confirmación. Finalmente, el intervalo de confianza que determina los límites inferior y superior de la respuesta predicha en el diseño del parámetro se calcula en el diseño de la tolerancia [15]. Estos diseños se muestran en la figura 1.14.

Taguchi ha tenido una influencia importante en el desarrollo de la ingeniería de calidad, tanto en el diseño de productos como en el de procesos [5].

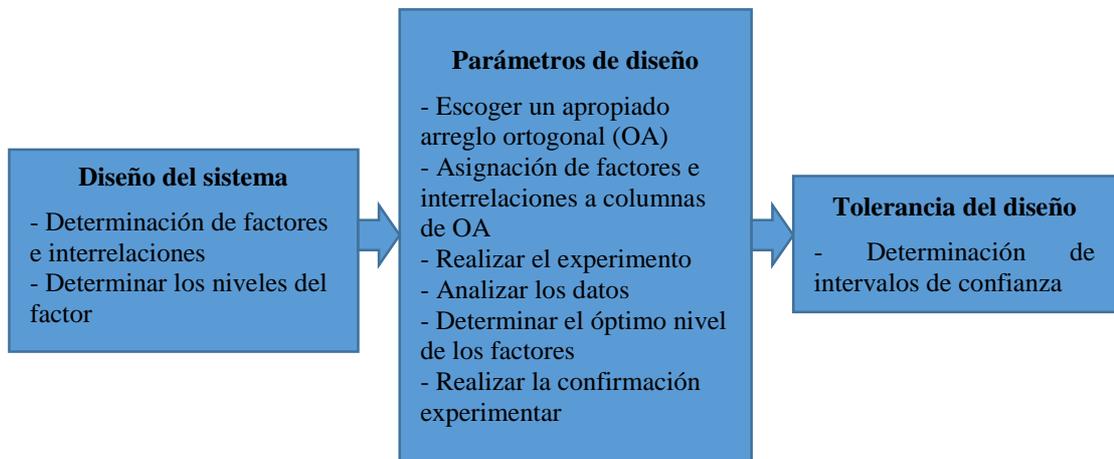


Figura 1.14 Aplicación del método Taguchi en las tres partes principales de diseño [11].

a. Función de pérdida de Taguchi

La función de pérdida de Taguchi o llamado también costo de perdida, es una herramienta para calcular las pérdidas de las partes fabricadas y verificar si cumplen con las especificaciones de diseño. Esta función calcula una pérdida creciente para la compañía cuando el componente se aleja del objetivo de diseño [1].

$$\text{Costo de la pérdida} = k(Y - T)^2 + \sigma^2 \quad (1.17)$$

Donde:

- Y : Valor medio de manufactura.
- T : Valor objetivo de diseño.
- σ : Desviación estándar de las partes de la manufactura.
- k : Constante.

La constante k viene definida como:

$$k = \frac{\text{Costo de reemplazo}}{(LSL - T)^2} \quad (1.18)$$

Donde:

LSL: Límite inferior de la especificación

USL: Límite superior de la especificación

Si $LSL = USL$ se puede utilizar cualquiera de los dos en la ecuación.

b. Aplicación del método Taguchi

Para la aplicación del método Taguchi se tiene una importante herramienta que se utiliza en el diseño de parámetros llamada matrices ortogonales, que trabajan de manera equilibrada dando a entender que cada ajuste de factor ocurre la misma cantidad de veces para cada ajuste de todos los factores del experimento. Esto permite estudiar paralelamente muchos parámetros de diseño y ayuda a estimar los efectos de cada factor independientemente de los otros factores. La información obtenida sobre los parámetros de diseño se logra en menor tiempo y con menos recursos [16].

En la aplicación del método Taguchi se necesita tener claro los factores que se van a estudiar tales como la velocidad de corte, la profundidad, el avance y la trayectoria de la herramienta. A continuación se determina un arreglo ortogonal apropiado que se usará en el experimento, para obtener una exactitud en el análisis estadístico y el tiempo/costo del proceso [16].

Para elegir la matriz ortogonal adecuada es necesario calcular los grados totales de libertad. El grado de libertad se define como el número de relaciones entre los parámetros del proceso, que son necesarios para definir el mejor nivel [17].

Según el método de Taguchi, el grado de libertad total (DF) de la matriz ortogonal (OA) seleccionada, debe ser mayor o igual a los parámetros del proceso [18].

El DF para el sistema experimental se calcula con la ecuación 1.19:

$$DF = (n_1 - 1) \times n_f + (n_1 - 1) \times (n_1 - 1) \times n_i \quad (1.19)$$

Donde:

n_1 : Número de niveles de los factores

n_f : Número de factores

n_i : Número de interacciones

En la tabla 1.9 se presenta un ejemplo de un arreglo ortogonal L9, compuesto de manera vertical por el número de pruebas y de forma horizontal el número de factores.

Tabla 1.9 Arreglo ortogonal L9 [17].

Número de Prueba	Número de factores		
	Velocidad cortante	Avance	Corte radial de profundidad
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

1.9.2 Método ANOVA

Es una herramienta poderosa utilizada en la industria para el análisis estadístico en el control de procesos en laboratorios y control de métodos analíticos. Tiene una amplia aplicación los dos grupos principales son: la comparación de múltiples columnas de datos y la estimación de los componentes de variación de un proceso [6].

El análisis de varianza (ANOVA) se utiliza para dar una medida de confianza al no analizar directamente los datos, sino más bien determinar la variabilidad de ellos. La confianza que brinda el método es medida a través de la varianza de los factores. [6]

Se ha empleado este método estadístico al estudio para determinar qué importancia tienen los parámetros de mecanizado y cuantificar los efectos que causan sobre la rugosidad.

a. Términos y notaciones en ANOVA

En la tabla 1.10 se detalla la simbología de las cantidades que se calculará mediante el uso de este método. Estas cantidades y sus interrelaciones se definen a continuación.

Tabla 1.10 Términos y notaciones [6].

$C.F$	Factor de corrección	n	Número de intentos
e	Error (experimental)	r	Total de repeticiones
F	Prueba F	P	Porcentaje de influencia
f	Grados de libertad	T	Total de resultados
f_e	Grados de libertad de error	S	Suma de cuadrados
f_T	Grados de libertad total	S'	Suma pura de cuadrados
		V	Cuadrado medio (varianza)

b. Grados de libertad (DOF)

El DOF es una medida de la cantidad de información que se puede determinar de forma exclusiva a partir de un conjunto dado de datos. Los grados de libertad para datos relativos a un factor es igual a uno menos que el número de niveles, por ejemplo para un factor A con cuatro niveles, los datos A1 pueden compararse con los datos A2, A3 y A4, pero no con sí mismo. Así, un factor de cuatro niveles tiene tres DOF. El concepto de DOF también se aplica a las columnas de la matriz ortogonal (OAs) así

como a la propia matriz y los factores, el DOF de una columna es su número de niveles menos uno [6].

El concepto de DOF también puede extenderse al experimento. Un experimento con n ensayos y r repeticiones de cada ensayo tiene $n \times r$ ensayos. El DOF total se convierte en [6]:

$$f_T = n \cdot r - 1 \quad (1.20)$$

Del mismo modo, el DOF para un término de suma de cuadrados es igual al número de términos utilizados para calcular la suma de cuadrados y el DOF del término de error, f_e , está dado por: [6]

$$f_e = f_T - f_A - f_B - f_C \quad (1.21)$$

c. Suma total de cuadrados (S_T)

La suma de cuadrados es una medida de la desviación de los datos experimentales del valor medio de los datos. La suma de cada desviación cuadrada enfatiza la desviación total [6].

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n y_i \right]^2 \quad (1.22)$$

Donde:

y_i : Promedios de las rugosidades obtenidos de cada una de las 27 caras.

n : Número de probetas

Similarmente, la suma de cuadrados de desviaciones S_T , de un valor objetivo Y_0 , viene dada por:

$$S_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 + n(\bar{Y} - Y_0)^2 \quad (1.23)$$

d. Varianza (V)

La varianza mide la distribución de los datos sobre la media de los datos. Debido a que los datos son representativos de sólo una parte de todos los datos posibles [6].

$$V = \frac{S_T}{f} \quad (1.24)$$

e. Relación de la varianza

La relación de varianza, comúnmente llamada estadística F , es la relación de varianza debido al efecto de un factor y varianza debido al término de error. Esta relación se utiliza para medir la significación del factor bajo investigación con respecto a la varianza de todos los factores incluidos en el término de error. El valor F obtenido en el análisis se compara con un valor de las tablas F estándar para un nivel estadístico de significación dado. Cuando el valor F calculado es menor que el valor de la tabla de distribución F , el factor no superar el nivel de confianza de dicha tabla. Los valores de F se calculan mediante [6]:

$$F = \frac{V}{e} \quad (1.25)$$

Donde:

F : Prueba F.
 e : Error experimental.

f. Porcentaje de influencia (P)

El porcentaje de contribución para cualquier factor se obtiene dividiendo la suma pura de cuadrados para ese factor por S_T y multiplicando el resultado por 100.

$$P = S \cdot \frac{100}{S_T} \quad (1.26)$$

CAPITULO 2

Desarrollo del experimento

2.1 Factores de mecanizado para el Acero AISI P20

Los factores de mecanizado en fresado plano utilizados en el presente estudio son:

- Velocidad de corte
- Velocidad de avance
- Profundidad radial
- Estrategia

La herramienta de corte no debe detenerse durante el maquinado de la pieza de trabajo, porque este paro puede afectar al filo de la herramienta de corte y los parámetros establecidos no cumplirían con su función, al obtener resultados no deseados del acabado superficial [11].

2.2 Maquinaria

El maquinado de las probetas se realizó en el centro de mecanizado EMCO Concept Mill 260, que se encuentra en el Laboratorio de Control Numérico Computarizado de la Universidad Politécnica Salesiana. En la figura 2.1 se observa el centro de mecanizado EMCO Concept Mill 260.



Figura 2.1 Emco Concept Mill 260.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

En la tabla 2.1 se indica las especificaciones de la máquina.

Tabla 2.1 Datos técnicos principales de la Emco Concept Mill 260 [19].

Especificaciones	Unidades	Valores
Ámbito de trabajo		
Recorrido del carro longitudinal (X)	mm	350
Recorrido del carro transversal (Y)	mm	250
Recorrido del carro útil vertical (Z)	mm	300
Distancia nariz del husillo-superficie de la mesa	mm	120-420
Mesa de fundición esmerilada		
Superficie de sujeción (L × A)	mm	520 × 300
Altura de la superficie de la mesa sobre el suelo	mm	900
Carga máx. de la mesa	kg	100
Tamaño de las ranuras en T según DIN 650	mm	12
Fresa husillo		
Rango de velocidad - accionamiento directo	min-1	150 - 10000
Torque (100/40% ED)	Nm	23 / 34
Potencia (100/40% ED)	[kW]	4,9 / 6,8
Portaherramientas según DIN ISO 69871-A		SK 30
Pernos de apriete según DIN ISO 69 872 (similar 7388/2)		M12
Accionamiento de carro		
Fuerza de trabajo máx. en X / Y / Z	[m/min]	10
Velocidad de marcha rápida en X, Y, Z	[m/min]	24
Fuerza de avance máx. en X / Y / Z	[N]	3000
Sistema de refrigerante		
Contenido estándar de depósito	l	140
Presión de transporte a 50 Hz	bar	3.5
Eje C / dispositivo divisor NC		
Altura de husillo	mm	80/100
Resolución	°	0.01
Velocidad máxima	min-1	40
Momento de avance máximo	Nm	32/45

2.3 Metrología

2.3.1 Rugosímetro

Las mediciones de la rugosidad de las superficies en investigación, se realizó con rugosímetro marca Mitutoyo modelo SJ-210 que se observa en la figura 2.2. Este instrumento de medición se encuentra en el laboratorio de Metrología de la Universidad Politécnica Salesiana.



Figura 2.2 Rugosímetro Mitutoyo marca SJ-210.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

En la tabla 2.2 se indica las especificaciones del rugosímetro.

Tabla 2.2 Datos técnicos principales del rugosímetro Mitutoyo SJ-210 [20].

Especificaciones	Valores
Rango de medición	17.5mm
Velocidad de medición	0.25, 0.5, 0.75, 1 mm/s
Unidad de control	Estándar
Rango detector	360 μm (-200μm a +160 μm)
Medición de fuerza	0.75 Mn
Palpador con radio de punta	2μm
Longitud de corte (λ_c)	0.08, 0.25, 0.8, 2.5mm
Detector	Ángulo cónico 60°

El rugosímetro SJ-210 es un instrumento de medición con el que se determinó la rugosidad al recorrer sobre la superficie de cada una de las caras de las probetas con una punta fina que se encuentra sujeto en la unidad conductora del rugosímetro. Se

realizó un barrido en línea recta. En la investigación se hizo dos trayectorias la primera transversal al mecanizado y la segunda longitudinal al mecanizado de las probetas. Las mediciones se obtuvieron con los siguientes parámetros: el rango de rugosidad estimado es de 6 a 0.8 μm después del fresado como se muestra en la figura 1.13 en el capítulo 1, con un rango de medición de 4 mm, con una longitud de corte de 0.8 mm, a una velocidad de medición de 0.5 mm/s.

2.3.2 Durómetro

La dureza de cada probeta se obtuvo mediante el Durómetro marca Phase II como se muestra en la figura 2.3. El durómetro marca Phase II está ubicado en el laboratorio de Metrología de la Universidad Politécnica Salesiana, que utiliza una carga de 150 kgf para el tipo de escala Rockwell C, una precarga de 10 kgf, un indentador cónico con punta de diamante y duración de espera de carga 5s.



Figura 2.3 Durómetro marca Phase II.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

En cada probeta de 25x25x20 mm se utilizó la cara superior e inferior para medir la dureza en las esquinas, como se presenta en la figura 2.4.

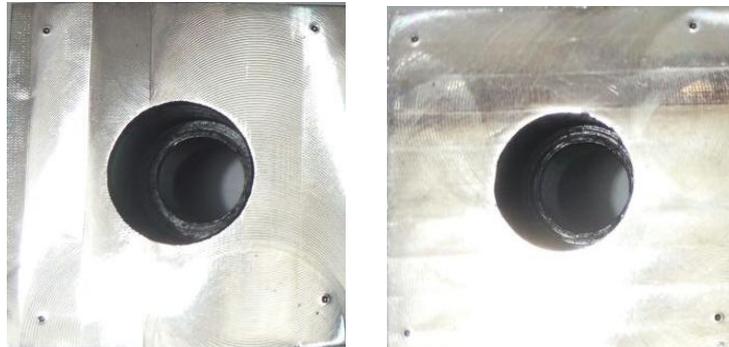


Figura 2.4 Puntos donde se tomaron los datos de dureza.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

En la tabla 2.3 se muestra los parámetros importantes del Durómetro Phase II.

Tabla 2.3 Datos técnicos del durómetro mara Phase II [21].

Parámetros	Valores
Precarga	10 kgf
Fuerza de prueba total	60 kgf ó 588.4 N, 100 kgf ó 980.7 N, 150 kgf ó 1471 N
Algunas escalas	HRA, HRB, HRC, HRD, HRE, HRF, HRG, HRK
Ciclo de carga	3-8s
Duración de espera de carga	2-50s
Resolución	0.1 HR

2.4 Tratamiento térmico

2.4.1 Temple

El acero M238 se utiliza para moldes plásticos con un rango de resistencia de 950-1100 N/mm² y con una dureza entre 280-320 HB [7].

Primero se debe encender el horno de tratamiento térmico de temple marca Nabertherm, se debe esperar que el horno llegue a la temperatura requerida que es de 850°C el cual se encuentra en el rango que sugiere el acero AISI P20 que es de 840-860°C e introducir las probetas. El tiempo de permanencia después del

calentamiento a fondo es 15 a 30 minutos y finalmente enfriar por medio de un aceite obteniendo una dureza de aproximadamente 52-54 HRC [7].

2.4.2 Revenido

El revenido es una operación final del tratamiento térmico que se aplicó en las probetas de acero AISI P20 después del temple y consiste en un calentamiento lento a una temperatura de revenido 200° C, el tiempo de permanencia de las probetas en el horno es 1 hora por cada 20 mm de espesor, el medio de enfriamiento es por aire dejándolos por lo menos 2 horas. Este tratamiento permite eliminar o reducir las tensiones internas que ocurre en el acero durante el temple para así obtener las propiedades deseadas de dureza [7].

2.5 Materiales y Herramientas

2.5.1 Inserto

El inserto a utilizar es un carburo de tungsteno marca ARNO grado AK20F, es un carburo sin revestimiento adecuado para mecanizar aleaciones a base de níquel y fundición.

El grado AK20F tiene mayor tenacidad para el mecanizado de todos los materiales de hierro fundido, Titanio y aleaciones de Titanio, y materiales endurecidos hasta 55 HRC en secciones transversales de virutas medianas en condiciones de mecanizado desfavorables y corte interrumpidos [22]. Tiene una buena resistencia de filo al desgaste. La figura 2.5 muestra la forma de los insertos empleados en el mecanizado.



Figura 2.5 Inserto de carburo sin revestimiento marca ARNO con especificación APHT 1003 PDFR-ALU.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

Los insertos AK20F se utilizan típicamente en el mecanizado de fundiciones duras y aceros duros o endurecidos, aceros templados, fundición gris, aleaciones no ferrosas como el aluminio, aceros inoxidables austeníticos, madera y plásticos. En la tabla 2.4 se observa la composición química y las propiedades físicas del material K20.

Tabla 2.4 Propiedades físicas y químicas del acero K20 [22].

Composición química			
Cobalto (Co)	Tantalo carburo (Ta)	Carburo de tungsteno (Wc)	Carburo de niobio (NBC)
6,25 %	4,25 %	89,50 %	4,25 %
Propiedades físicas			
Dureza (HRA)	Densidad (g/cc)		Límite a ruptura (ksi)
92	14,73		340

La figura 2.6 indica la microestructura y el tamaño de grano que tienen los insertos de carburo de tipo AK20F.

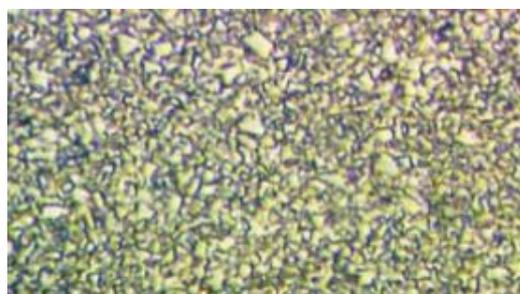


Figura 2.6 Ejemplo de estructura de las herramientas recubiertas [23].

En el mecanizado se debe tener una abundante refrigeración durante toda la operación o trabajar en seco para evitar el choque térmico.

El inserto sólido APHT 1003PDFR-ALU de carburo sin revestimiento, se observa la descripción en la figura 2.7.

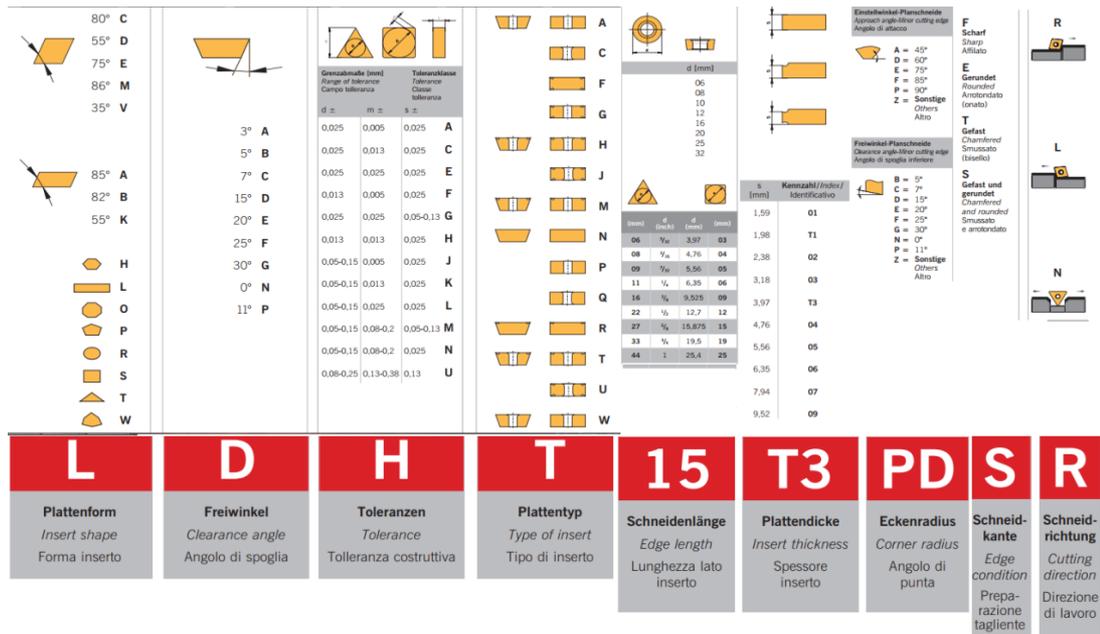


Figura 2.7 Sistema de designación ISO para insertos indexables [24].

2.5.2 Herramienta con cuchillas insertadas

Las fresas con cuchillas insertadas se construyeron frente a las necesidades de grandes dimensiones de herramientas para mecanizar ciertas operaciones de fresado. Este tipo de fresas están construidas por un cuerpo de acero al carbono que puede llevar una serie de cuchillas como: acero rápido, acero extra rápido y acero al carbono con plaquitas de metal duro.

Los tipos de usos más frecuentes son: fresas de tres cortes con cuchillas paralelas, fresas de tres cortes con cuchillas inclinadas alternativamente, fresas frontales y fresas de forma.

El tipo de fresa para el mecanizado de este estudio es la fresa frontal debido a que se utiliza en operaciones de planeado. Para alcanzar un máximo rendimiento en operaciones de fresado depende de los factores de mecanizado y de la forma de la fresa junto con sus ángulos de corte. En la figura 2.8 se representa una fresa frontal de cuatro cuchillas con plaquitas de carburo.



Figura 2.8 Fresa frontal de cuatro chuchillas insertadas [22].

La cantidad de plaquitas en la fresa tiene relación con la calidad del material a trabajar. En fresas frontales las plaquitas de metal duro han demostrado ser muy rentables, porque facilitan el arranque de materiales tenaces a mayores velocidades de corte y avance.

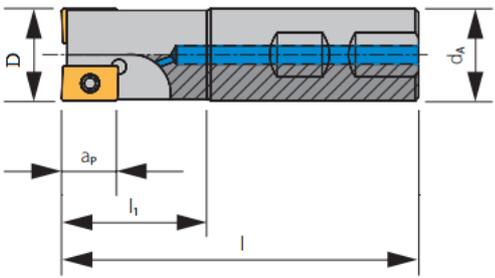
Para el uso adecuado de las fresas frontales se tiene presente las siguientes recomendaciones:

- Evitar golpes bruscos que provoquen la ruptura de la cuchilla
- No girar equivocadamente la fresa en sentido contrario
- En el retroceso alejar la fresa de la mesa para evitar rozamiento de las cuchillas
- No parar el husillo cuando las cuchillas arrancan material
- Ajustar la fresa de forma rígida y centrada para eliminar vibraciones

La herramienta es un porta-insertos de dos flancos marca ARNO de diámetro 16 mm, en la tabla 2.5 se muestra el porta-insertos y sus características.

Tabla 2.5 Descripción de la herramienta de corte [24].

PORTA-INSERTO	
Marca	ARNO
Modelo	90ES.016R.P10
Filos de corte	2
Trabajo	Fresado en acabado
D	16 mm
l_1	25 mm
l	85 mm
d_A	16 mm



2.6 Fluido de corte

El fluido de corte se encarga de lubricar, refrigerar y disminuir el calor de rozamiento durante el mecanizado. Al utilizar fluido de corte en operaciones de maquinado se logra obtener los siguientes beneficios.

- Un mejor acabado superficial en la pieza de trabajo
- A largar la vida útil de la herramienta de corte al reducir la fricción y el desgaste
- Reducir la temperatura y la distorsión térmica de la pieza de trabajo
- Disminuir el consumo de energía y las fuerzas
- Quitar la viruta de la zona de corte para que no interfiera en el proceso

En la tabla 2.6 se presenta las temperaturas límites de trabajo de las herramientas.

Tabla 2.6 Temperaturas límites de empleo de la herramienta [25].

Carburo metálicos	750 y 900 °C
-------------------	--------------

2.6.1 Material que constituye la herramienta

Para los aceros al carbono, dado que interesa esencialmente el enfriamiento, se emplean las emulsiones; para los aceros rápido se orienta la elección de acuerdo con el material a trabajar; para las aleaciones duras se trabaja en seco, o se emplea emulsiones [25].

2.6.2 Método de trabajo

En la tabla 2.7 se indica los métodos de trabajo más empleados en la manufactura y que fluidos de corte se recomienda utilizar en cada operación.

Tabla 2.7 Fluidos de corte según el método de trabajo [25].

Método de trabajo	Fluido de corte
Tornos automáticos	Aceites puros exentos en sustancias nocivas
Operaciones de rectificado	Emulsiones
Agujereado	Aceite puros con baja viscosidad
Fresado	Emulsiones
Brochado	Aceites para altas presiones de corte o emulsiones

2.6.3 Aceites emulsionables

Los aceites emulsionables también conocidos como emulsiones son obtenidos al mezclar aceite mineral y agua, en cantidades que se muestran a continuación.

Emulsiones densas: tiene un porcentaje de 15 a 30 por ciento de aceite en agua. Tienen un alto poder lubricante, protege la oxidación de las superficies caras mecanizadas y son utilizados para metales duros de alta tenacidad.

Para el experimento se utilizó una emulsión densa, porque el material a mecanizar tiene una alta dureza y la herramienta de corte es de carburo de tungsteno. A

continuación se muestra una tabla 2.8 donde específica como deben ser las mezclas empleadas en estos procesos de mecanizado.

Tabla 2.8 Guía de selección de fluidos de corte [10].

Material	Operación
	Fresado, taladrado
Aleaciones de alta temperatura (hierro, níquel y base de cobalto)	S2c, O5c, O7c

Donde:

- S2c: S: Solución;
2: presión extrema
c: concentrado
- O5c: O: aceite mineral
5: grasa + azufre +
cloro
c: concentrado
- O7c: O: Aceite mineral
7: grasa + cloro
inhibido
c: concentrado

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

2.7 Metodología.

Para mecanizar el acero AISI P20 se considera cuatro factores, como son: Velocidad de corte (v_c), Velocidad de avance (v_a), Profundidad radial (a_e) y las trayectorias de la herramienta de corte.

En la selección de niveles de cada factor se realizó un profundo estudio de materiales, herramientas y cálculos que se van utilizar en el experimento.

2.7.1 Velocidad de corte

El material acero AISI P20 sometido a tratamiento térmico de templado y revenido llega a una dureza promedio de 52,9 HRC. Para la elevada dureza obtenida se utiliza los valores recomendados por el fabricante del material, el porta-insertos y el material

de la herramienta de corte, para establecer un rango de trabajo adecuado de la herramienta de corte en operaciones de fresado plano, como se muestra en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Velocidad de corte para el acero AISI P20 recomendado por los fabricantes.

Parámetros de Corte	Fabricante		
	Material	Porta-inserto	Inserto
Velocidad de corte (V_c) m/min	10 - 150	110 - 350	25 - 35

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

Por tanto el rango de la velocidad de corte utilizado en el experimento es del fabricante del inserto que permite trabajar eficientemente a 25 – 35 mm/min hasta durezas de 55 HRC.

2.7.2 Velocidad de avance

La velocidad de avance se calcula con la siguiente formula:

$$V_a = \eta \cdot f_z \cdot z \quad (2.1)$$

Donde:

- η : Revoluciones por minuto
- f_z : Avance por diente
- z : Número de dientes

El avance por diente que recomienda el fabricante del material AISI P20 tiene un rango que se puede observar en la tabla 1.8 del capítulo 1.

Pero también para el diámetro de la fresa de 16 mm, el fabricante de la herramienta indica un rango de trabajo que se muestra en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Datos recomendados de corte del porta-insertos [24].

Material	Acabado	
	V_c [m/min]	f_z [mm]
Acero no aleados y aleados	110 - 350	0,05 – 0,10

El f_z que utilizado para el cálculo de la velocidad de avance es 0.085 mm.

2.7.3 Profundidad radial

La profundidad radial de corte debe ser inferior a 0,9 por el diámetro de la herramienta [12], es decir:

$$a_e = 0.9 * D \quad (2.2)$$

Donde:

a_e : Profundidad radial

D : Diámetro de del porta-insertos

$$a_e = 14,4 \text{ mm}$$

El 14,4 mm es el valor máximo para un proceso de desbaste. El presente estudio es un proceso de acabado por eso se utilizó solo el 30 % del valor calculado.

En la tabla 2.11 se muestra los niveles de profundidad radial a utilizar en función de la rugosidad que se estima obtener.

Tabla 2.11 Niveles para la profundidad radial.

Parámetro	Nivel		
	1 (30%)	2 (60%)	3 (100%)
Profundidad radial (mm)	1,29	2,59	4,32

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

A continuación la tabla 2.12 presenta los valores para los tres niveles de los factores para trabajar en el estudio del mecanizado del material AISI P20.

Tabla 2.12 Factores y niveles.

Parámetros		Niveles		
		1	2	3
A	Velocidad de corte (m/min)	25	30	35
B	Velocidad de avance (mm/min)	84,549	101,461	118,371
C	Estrategia	Zigzag	Zig (convencional)	Zigzag (90°)
D	Profundidad radial (mm/diente)	1,29	2,59	4,32

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

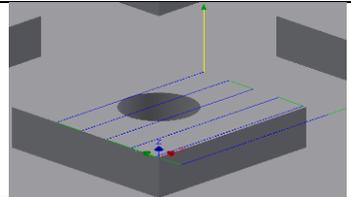
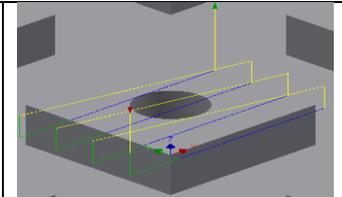
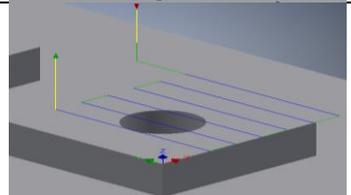
2.7.4 Estrategias de mecanizado

Las estrategias de mecanizado están en función del fresado plano y del recorrido de la herramienta de corte que se genera por medio de un software CAM. Para tener una calidad óptima de acabado superficial y confianza al mecanizar se aplican restricciones de seguridad en cada recorrido de la herramienta de corte.

Las estrategias de mecanizado son generadas por medio del software CAM. Donde el diseñador del programa establece parámetros de recorrido específicos para cada aplicación y acabado superficial deseado.

En la tabla 2.13 se indican tres estrategias del mecanizado que dan los mejores resultados en superficies planas y rugosidades homogéneas.

Tabla 2.13 Estrategias de mecanizado utilizadas en el estudio.

a) Zigzag		b) Zig Convencional	
c) Zigzag 90°			

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

El tiempo de mecanizado varía para cada recorrido de la herramienta de corte en función del paso lateral.

Ejercicio de cálculo.

Para la velocidad de corte se utilizó los valores que el fabricante del inserto recomienda, como se indica en la tabla 2.14.

a. Velocidad de corte (V_c)

Tabla 2.14 Rango para los niveles de la velocidad de corte.

Parámetro de corte	Inserto de metal duro
Velocidad de corte (V_c) m/min	25-35

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

$$V_{c1} = 25 \text{ m / min}$$

$$V_{c2} = 30 \text{ m / min}$$

$$V_{c3} = 35 \text{ m / min}$$

b. Velocidad de Avance (V_a)

$$V_a = n * f_z * z \quad \text{mm / min}$$

$$n_1 = \frac{V_c * 1000}{\pi * D}$$

$$n_2 = \frac{V_c * 1000}{\pi * D}$$

$$n_3 = \frac{V_c * 1000}{\pi * D}$$

$$n_1 = \frac{25 \text{ m / min} * 1000}{\pi * 16 \text{ mm}}$$

$$n_2 = \frac{30 \text{ m / min} * 1000}{\pi * 16 \text{ mm}}$$

$$n_3 = \frac{35 \text{ m / min} * 1000}{\pi * 16 \text{ mm}}$$

$$n_1 = 497,35 \text{ rpm}$$

$$n_2 = 596,83 \text{ rpm}$$

$$n_3 = 696,30 \text{ rpm}$$

c. Avance por diente asignado por el fabricante de la herramienta

$$x = f_z = 0.085 \text{ mm/diente (Interpolación)}$$

$$V_{a1} = n_1 * f_z * z$$

$$V_{a1} = 497,35 \text{ rev / min} * 0.085 \text{ mm / diente} * 2 \text{ dientes}$$

$$V_{a1} = 84,549 \text{ mm / min}$$

$$V_{a2} = n_2 * f_z * z$$

$$V_{a2} = 596,83 \text{ rev / min} * 0.085 \text{ mm / diente} * 2 \text{ dientes}$$

$$V_{a2} = 101,461 \text{ mm / min}$$

$$V_{a3} = n_1 * f_z * z$$

$$V_{a3} = 696,30 \text{ rev / min} * 0.085 \text{ mm / diente} * 2 \text{ dientes}$$

$$V_{a3} = 118,371 \text{ mm / min}$$

d. Profundidad radial (a_e)

$$a_e = 0.9 D$$

$$a_e = 0.9(16 \text{ mm})$$

$$a_e = 14.4 \text{ mm}$$

$$30\% \text{ valor máximo} = 30\%(14.4) = 4.32 \text{ mm}$$

El 4,32 mm se toma como valor máximo y se divide en tres niveles de 30%, 60% y el 100%, como se indica en la tabla 2.15.

Tabla 2.15 Niveles para el factor velocidad de avance.

$a_{e1} = 1.29 \text{ mm}$	30%
$a_{e2} = 2.59 \text{ mm}$	60%
$a_{e3} = 4.32 \text{ mm}$	100%

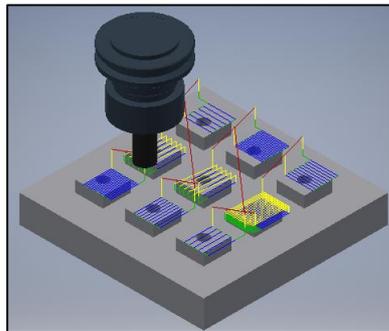
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

CAPITULO 3

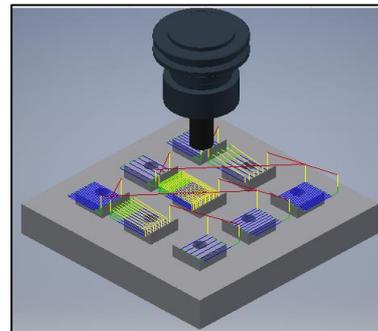
Análisis de datos

3.1 Diseño del experimento

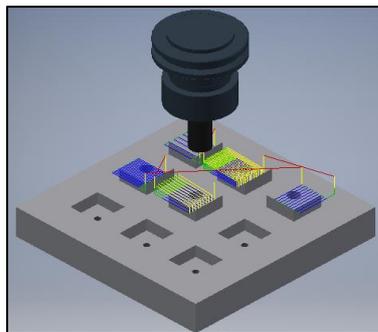
Para el mecanizado del acero AISI P20 se utilizó una base de aluminio con 9 alojamientos, donde se empernaron las 14 probetas para planear las superficies superior y posterior de cada probeta. El mecanizado se dividió en cuatro operaciones como se observa en la figura 3.1.



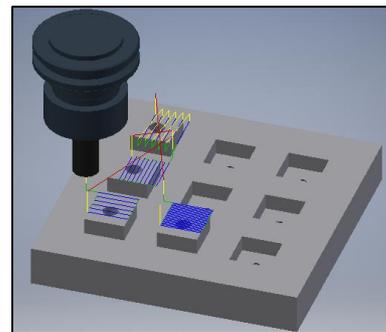
a) Probetas con estrategias del 1 al 9



b) Probetas con estrategias del 10 al 18



c) Probetas con estrategias del 19 al 23



d) Probetas con estrategias del 24 al 27

Figura 3.1 Diseño de probetas
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

Para el diseño de la base se consideró el tamaño de la mesa y el recorrido máximo en los ejes x, y del centro de mecanizado EMCO. Las medidas de la base son de 165x165x25 mm con una profundidad en los alojamientos para cada probeta de 10

mm, y las probetas tienen las medidas de 25x25x20 mm con un perno allen M6 en el centro para la sujeción.

3.2 Autodesk inventor

Autodesk inventor es un paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D, que integra AutoCAD, para crear prototipos digitales en base a un conjunto de herramientas de diseño mecánico. Este software es producido por la empresa Autodesk que compite contra otros programas de diseño como SolidWorks, ProENGINEER, Catia y solid Edge.

Las características del software son:

- Diseño mecánico en 3D, documentación y simulación de productos.
- Creación de prototipos digitales para validar y diseñar los productos antes de ser fabricados.
- Valida los prototipos digitales por medio de análisis de elementos finitos y simulación dinámica.

Las ventajas que ofrece Autodesk Inventor son amplias dentro del mecanizado para piezas plásticas, diseño de sistemas complejos y automatizar facetas claves del diseño, lo que significa tener menos errores y no fabricar prototipos físicos.

Con el análisis de tensión y de simulación de movimiento ayudan a prever cómo funcionará el diseño en condiciones reales, para sacar mejores productos al mercado en menos tiempo.

3.2.1 Inventor HSM (Herramienta de manufactura asistida por computadora)

Es un programa que integra soluciones CAM, para producir prototipos o piezas terminadas al combinar con el software inventor CAD. Este programa proporciona estrategias de fresado 2D, 3D, de 5 ejes de alta calidad, y rutas de herramienta que giran para mecanizado de alta velocidad.

Las características del software son:

- Permite simular el proceso de maquinado, mostrando la efectividad de las rutas de corte generadas.
- Genera el código en formato de texto que permite posicionarse en cualquier línea de código determinada. El código es compatible con gran variedad de máquinas porque tiene un postprocesador genérico de fabricantes como: Fanuc, Heidenhain, Haas, Hurco, Mazak, MillPlus, Okuma, Siemens, Yasnak, etc.

3.3 Programación del maquinado en Inventor HSM

Las 27 combinaciones de factores y niveles se programaron en inventor HSM. Los pasos de programación para planeado se describe a continuación:

Abrir el archivo con inventor HSM como se indica en la figura 3.2.

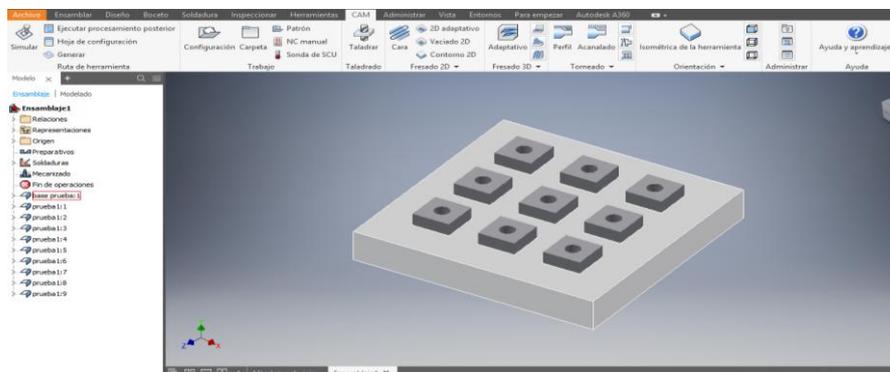


Figura 3.2 La cinta de opciones de comandos de Inventor HSM.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

a. Para hacer la operación de planeado, como se observa en la figura 3.3.

- Crear configuración,
- Definir el sistema de coordenadas de trabajo (SCT) y el modelo.
- Asignar la sobre medida de acabado de 0,05 mm.

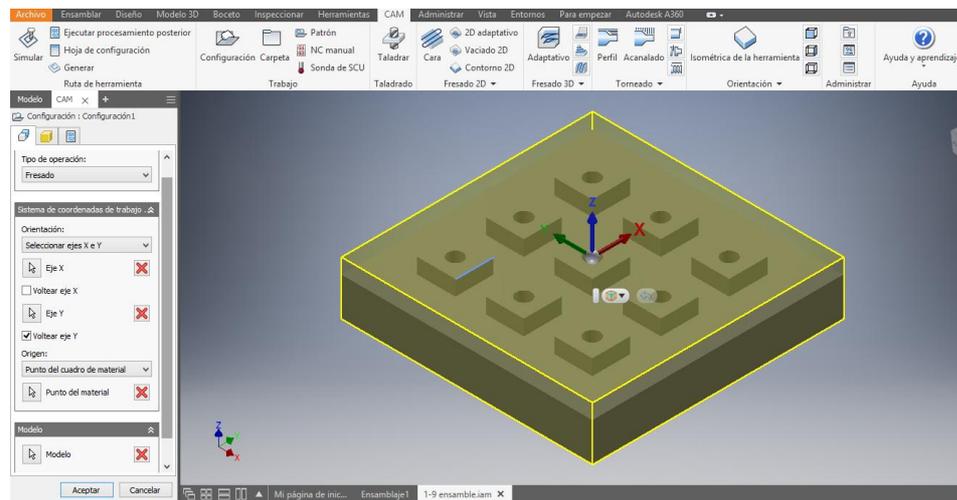


Figura 3.3 Configuración del modelo a mecanizar.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

b. En el planeado se selecciona la opción cara y en la opción herramienta se selecciona el tipo y el diámetro de herramienta como se indica en la figura 3.4.

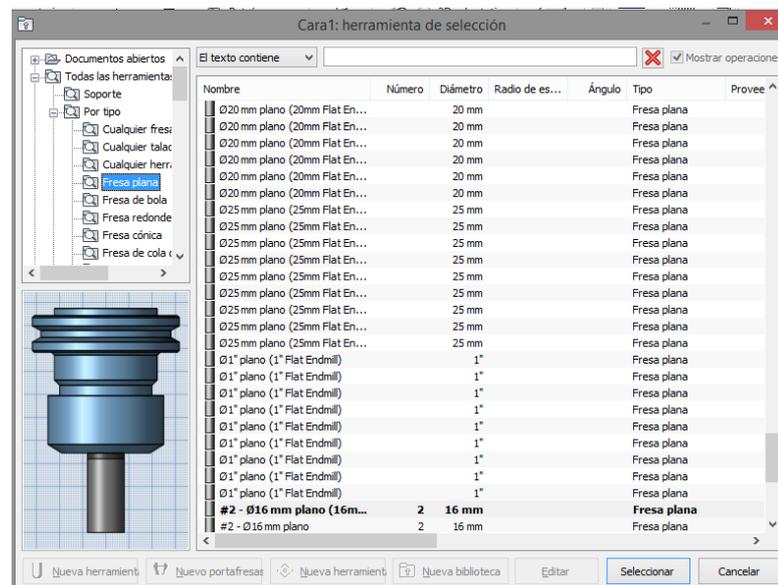


Figura 3.4 Selección de fresa plana Ø16 mm en la biblioteca de herramientas.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

- c. En la ventana herramientas se edita los factores como velocidad de corte y velocidad de avance de mesa, como se muestra en la figura 3.5.

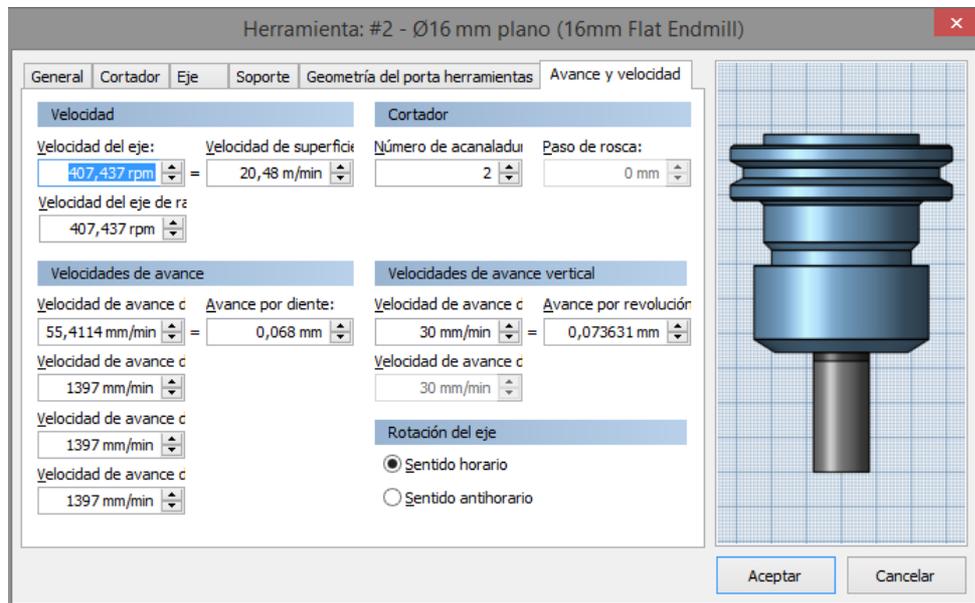


Figura 3.5 Cuadro de diálogo de la herramienta.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

- d. Seleccionar geometría para definir la cara donde se va a mecanizar, como se observa en la figura 3.6.

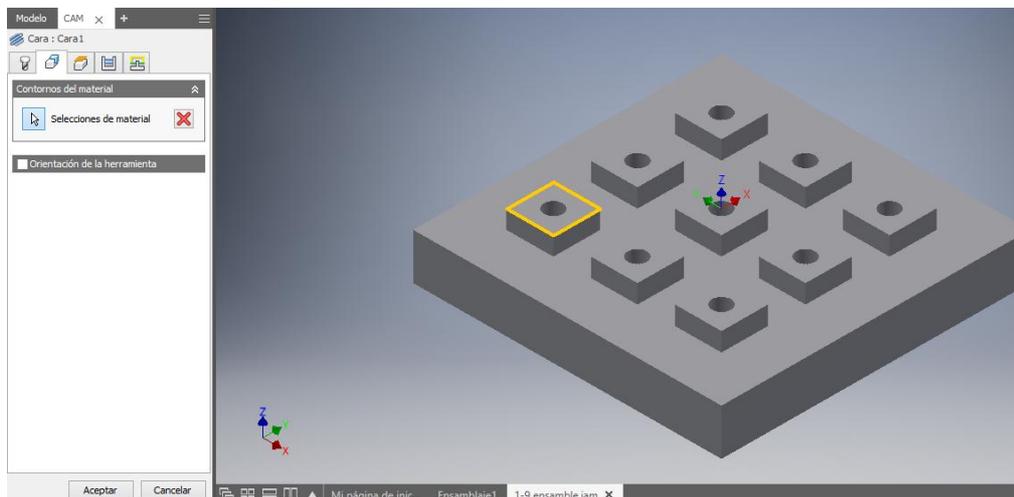


Figura 3.6 Selección del plano a mecanizar.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

- e. Para editar la ruta de la herramienta se define la trayectoria y para la profundidad radial en la opción sobrepasada, como se observa en la figura 3.7.

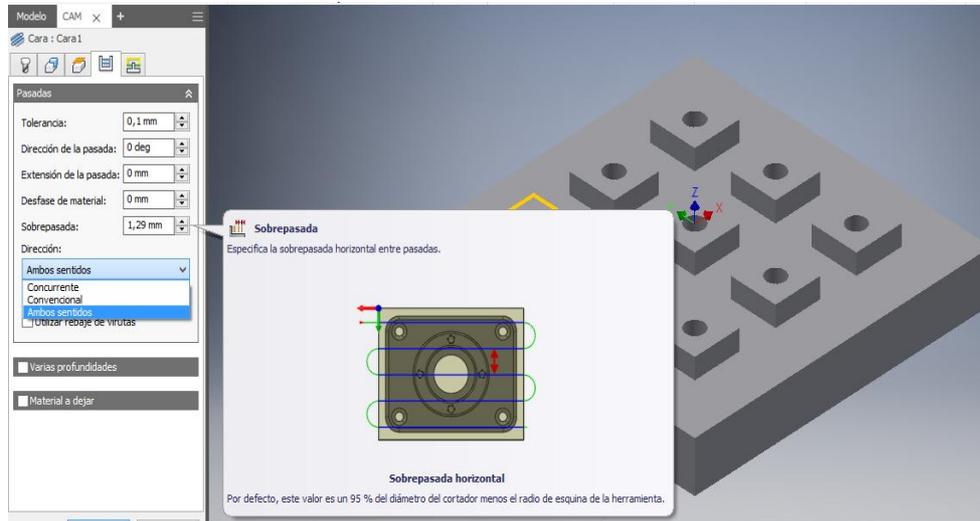


Figura 3.7 Selección de la orientación de la herramienta.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

Al final se tiene la programación como se muestra en la figura 3.8 de las primeras nueve combinaciones a mecanizar.

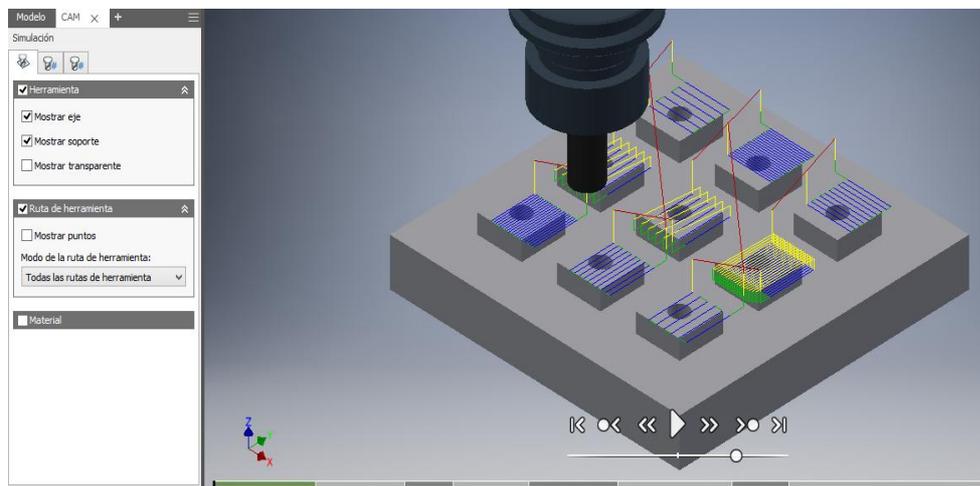


Figura 3.8 Cuadro de simulación con las combinaciones del uno al nueve.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

El procesamiento posterior se ejecuta una vez terminado la simulación del mecanizado.

Para transformar a un lenguaje de código que el centro de mecanizado EMCO pueda

leer se hace clic en la opción ejecutar procesamiento posterior. La configuración de publicación que la máquina reconoce se llama siemens SINUMERIK 802D, se edita la carpeta donde se guarda el código y publicar. Ejemplo de código de programación se muestra en el Anexo 1.

3.4 Medición de dureza de las probetas

En la figura 3.9 se muestra las fotografías del proceso de medición de la dureza en el durómetro digital Phase II.



Figura 3.9 Durezas de las probetas antes del mecanizado.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

La medición de la toma de datos de la dureza de las 27 probetas tratadas térmicamente antes y después del mecanizado se indica en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Dureza de las caras antes y después del mecanizado.

ENSAYO DE DUREZA											
# Prob.	Antes de mecanizar				Prom	Después de mecanizar				Prom.	
	1	2	3	4		1	2	3	4		
1	53,4	53,1	53,2	53,5	53,3	53,9	54,2	54,1	54,2	54,5	
2	53,9	53,4	53,3	53,3	53,5	54,9	54,3	55,3	54,8	53,7	
3	51,1	49,8	50,9	54,2	51,5	54	54,1	46,7	52,4	53,3	
4	48,9	50,1	53,3	53,3	51,4	54,5	54,4	54,8	55	50,7	
5	50,1	49,8	53,8	53,1	51,7	51,7	53,1	51,2	49,4	51,6	
6	53	53,5	54	53,7	53,6	53,3	51,7	53,6	51,2	54,7	
7	53,2	54,3	54,3	54,3	54,0	51,8	53,5	52,8	54,4	53,0	
8	52,4	53,6	53,3	53,4	53,2	54,5	55,4	54,7	54,4	55,2	
9	53,4	53,4	53,1	53,6	53,4	53,9	54,1	55,9	54	55,3	
10	49,8	53,5	53,6	46,4	50,8	52,4	53,8	53,7	54,7	54,8	
11	49,7	51,9	53,7	53,1	52,1	54	55,2	49,2	54,8	54,7	
12	53,4	53,8	53,4	53,7	53,6	50,6	48	50,4	53,6	55,6	
13	51,3	53,9	53,7	53,2	53,0	54,4	50,8	49,1	52	54,7	
14	54,2	53,5	53	53,5	53,6	54,6	54,8	54,5	54,9	51,4	
15	48,3	53	48,7	53,7	50,9	53,7	53,5	52,5	52,2	55,4	
16	53,8	54,1	54,1	53,8	54,0	54,9	55	55,6	55,4	54,8	
17	54,2	53,8	53,6	53,4	53,8	55,1	54,8	55,3	55,8	53,0	
18	53,2	54,6	55,1	53,6	54,1	54,5	55,1	54,8	54,6	55,0	
19	53,9	54,1	54,3	54,1	54,1	54,7	54,9	55	54,1	54,1	
20	54,4	54,6	54,2	54,1	54,3	54,7	55,2	56,1	56,2	55,6	
21	53,5	53,7	50,9	54,4	53,1	55,1	54,4	55	54,4	54,7	
22	53,4	51,8	52,7	47,8	51,4	51,7	55,2	50	48,8	51,4	
23	52,8	53,4	54,1	53,7	53,5	56,6	55	54,9	55,1	55,4	
24	53,7	52,4	53,2	48,3	51,9	54,4	55,8	54,8	54,2	54,8	
25	51,3	52,4	53,4	53,9	52,8	52,7	54,3	53	51,9	53,0	
26	52,4	53,9	49,7	51,2	51,8	55,3	54,6	55,2	54,8	55,0	
27	54,1	53,2	53,1	53,9	53,6	53,8	54,6	54,8	53,1	54,1	
Promedio total					52,9	Promedio total					54,0

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

La figura 3.10 representa los valores medidos en los ensayos de dureza antes y después del mecanizado, con la línea naranja los valores medidos después del mecanizado y la línea azul son los valores medidos antes del mecanizado, como resultado se tiene un aumento porcentual al promedio total de 2,07%.

La mayoría de los resultados después del mecanizado presentan un aumento en la dureza, esto se debe a la presencia de Cromo 2 %, Magnesio 1,5%, Molibdeno 0,20 %, que al hacer contacto con la herramienta de corte endurecen fácilmente la superficie del material.

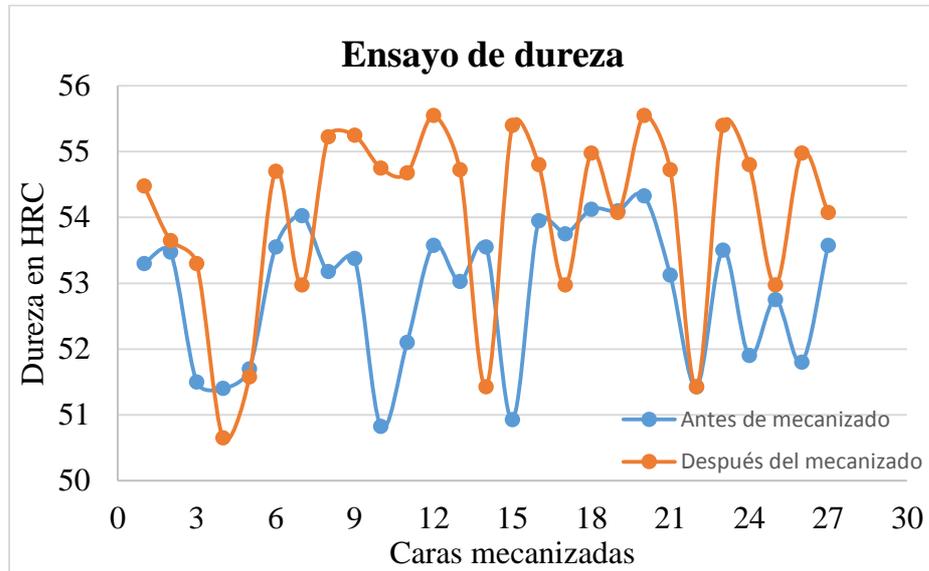


Figura 3.10 Representación de la variación de dureza antes y después del mecanizado.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

3.5 Maquinado de las probetas

Las probetas que se presentan en la figura 3.11 son el resultado obtenido después del mecanizado.

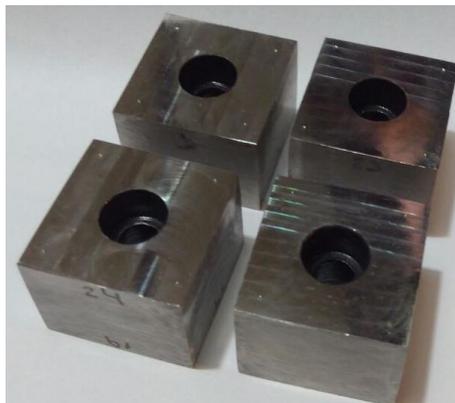


Figura 3.11 Superficie plana mecanizada.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

En la tabla 3.2 se muestra las rugosidades de cada probeta tomadas en posición transversal y longitudinal con su respectivo promedio de rugosidad.

Tabla 3.2 Arreglo ortogonal de Taguchi con los resultados de rugosidad medidos.

DATOS MEDIDOS DE LA RUGOSIDAD									
# Probeta	(A) Velocidad de corte (m/min)	(B) Avance (mm/min)	(C) Trayectoria	(D) Profundidad Radial (mm)	Toma de datos				R. Prom.
					Transversal		Longitudinal		
					Ra1	Ra2	Ra3	Ra4	
1	25	84,55	ZIGZAG	1,29	0,14	0,16	0,15	0,09	0,132
2	25	84,55	ZIG	2,59	0,27	0,13	0,12	0,15	0,165
3	25	84,55	ZIGZAG 90	4,32	0,17	0,17	0,12	0,15	0,152
4	25	101,461	ZIGZAG	2,59	0,16	0,17	0,12	0,12	0,141
5	25	101,46	ZIG	4,32	0,22	0,19	0,15	0,13	0,171
6	25	101,46	ZIGZAG 90	1,29	0,19	0,20	0,12	0,15	0,164
7	25	118,37	ZIGZAG	4,32	0,24	0,23	0,13	0,18	0,194
8	25	118,37	ZIG	1,29	0,22	0,16	0,10	0,20	0,172
9	25	118,37	ZIGZAG 90	2,59	0,29	0,27	0,28	0,26	0,274
10	30	84,55	ZIGZAG	2,59	0,62	0,64	0,16	0,66	0,520
11	30	84,55	ZIG	4,32	0,49	0,71	0,18	0,79	0,543
12	30	84,55	ZIGZAG 90	1,29	0,29	0,30	0,33	0,31	0,307
13	30	101,46	ZIGZAG	4,32	0,24	0,27	0,27	0,18	0,239
14	30	101,46	ZIG	1,29	0,35	0,44	0,10	0,48	0,341
15	30	101,46	ZIGZAG 90	2,59	0,67	0,42	0,25	0,66	0,501
16	30	118,37	ZIGZAG	1,29	0,33	0,61	0,28	0,85	0,519
17	30	118,37	ZIG	2,59	0,51	0,53	0,26	0,66	0,488
18	30	118,37	ZIGZAG 90	4,32	0,47	0,40	0,40	0,12	0,348
19	35	84,55	ZIGZAG	4,32	0,13	0,24	0,20	0,15	0,179
20	35	84,55	ZIG	1,29	0,10	0,11	0,11	0,13	0,115
21	35	84,55	ZIGZAG 90	2,59	0,13	0,14	0,12	0,11	0,124
22	35	101,46	ZIGZAG	1,29	0,16	0,14	0,07	0,10	0,114
23	35	101,46	ZIG	2,59	0,16	0,19	0,13	0,12	0,149
24	35	101,46	ZIGZAG 90	4,32	0,34	0,40	0,32	0,35	0,351
25	35	118,37	ZIGZAG	2,59	0,19	0,20	0,24	0,22	0,211
26	35	118,37	ZIG	4,32	0,15	0,40	0,38	0,18	0,276
27	35	118,37	ZIGZAG 90	1,29	0,16	0,30	0,26	0,35	0,265
Promedio total									0,27

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja

En la figura 3.12 se presenta la gráfica de resultados de la rugosidad vs velocidad de corte para una trayectoria ZIG-ZAG.

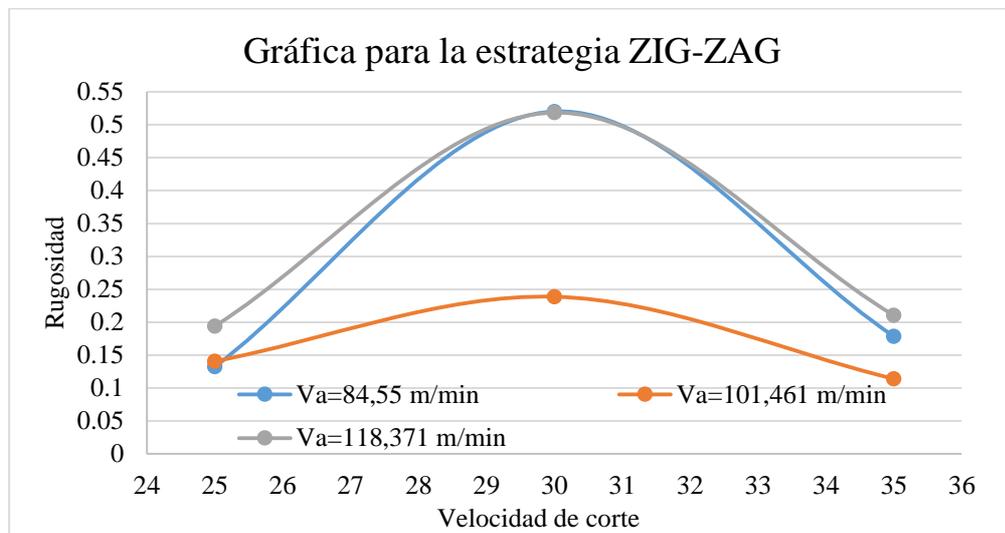


Figura 3.12 Gráfica de la rugosidad vs velocidad de corte para la estrategia de ZIG-ZAG.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja

El menor valor de rugosidad es de $0,114 \mu\text{m}$ para la trayectoria ZIG-ZAG con una velocidad de avance de $101,461$ m/min y velocidad de corte de 35 m/min. Por lo contrario el peor resultado de rugosidad es $0,52 \mu\text{m}$ con velocidad de avance de $84,551$ m/min y velocidad de corte de 30 m/min. La línea azul son los resultados de la rugosidad con velocidad de avance de $84,551$ m/min, la línea naranja con velocidad de avance de $101,461$ m/min y la línea gris con velocidad de avance de $118,371$ m/min.

En la figura 3.13 se presenta la gráfica de resultados de la rugosidad vs velocidad de corte para una trayectoria ZIG.

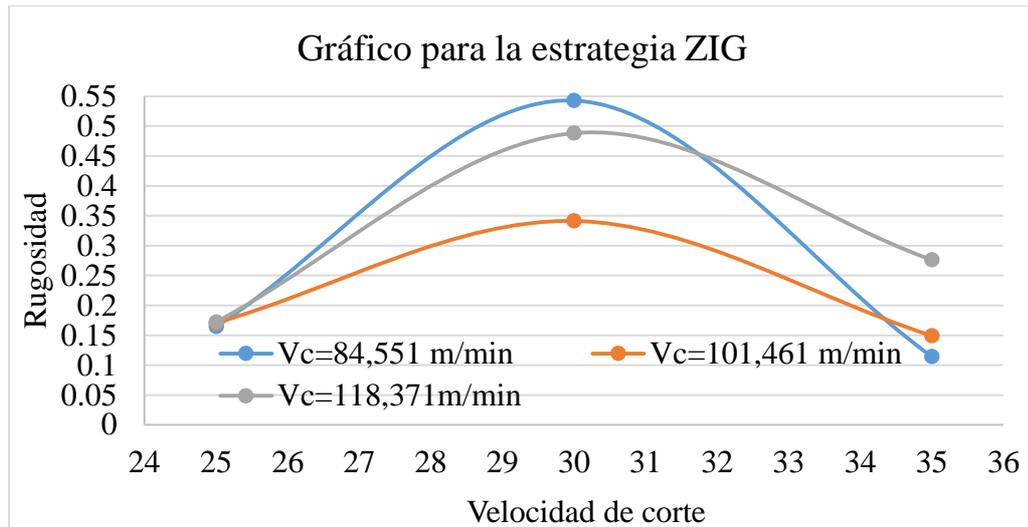


Figura 3.13 Gráfica de la rugosidad vs velocidad de corte para la estrategia de ZIG.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja

El menor valor de rugosidad es de 0,1145 μm para la trayectoria ZIG con una velocidad de avance de 84,551 m/min y velocidad de corte de 35m/min. Por lo contrario el peor resultado de rugosidad es 0,542 μm con velocidad de avance de 84,551 m/min y velocidad de corte de 30 m/min.

En la figura 3.14 se presenta la gráfica de resultados de la rugosidad vs velocidad de corte para una trayectoria ZIG-ZAG 90°.

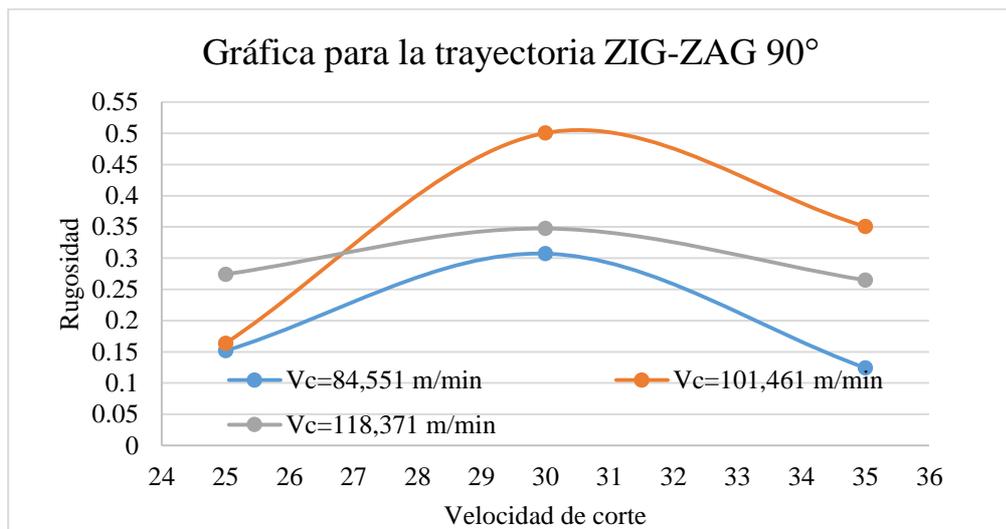


Figura 3.14 Gráfica de la rugosidad vs velocidad de corte para la estrategia de ZIG-ZAG 90°.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja

El menor valor de rugosidad es de 0,124 μm para la trayectoria ZIG-ZAG 90° con una velocidad de avance de 84,551 m/min y velocidad de corte de 35 m/min. Por lo contrario el peor resultado de rugosidad es 0,50 μm con velocidad de avance de 101,461 m/min y velocidad de corte de 30 m/min.

Para la predicción de la rugosidad en los tres niveles de trayectorias se empleó un software estadístico, que permite obtener graficas en 3D de la superficie y una ecuación de regresión estadística que predice los parámetros de rugosidad, siempre y cuando se encuentren dentro del rango utilizado en esta investigación.

La figura 3.15 muestra la superficie de la rugosidad vs velocidad de corte y velocidad de avance para una trayectoria ZIG-ZAG en un modelo 3D, con su respectiva ecuación de regresión estadística, con la cual se calcula la rugosidad promedio (R_a) que se lograría obtener al mecanizar con los parámetros establecidos dentro del nivel de trayectoria ZIG-ZAG.

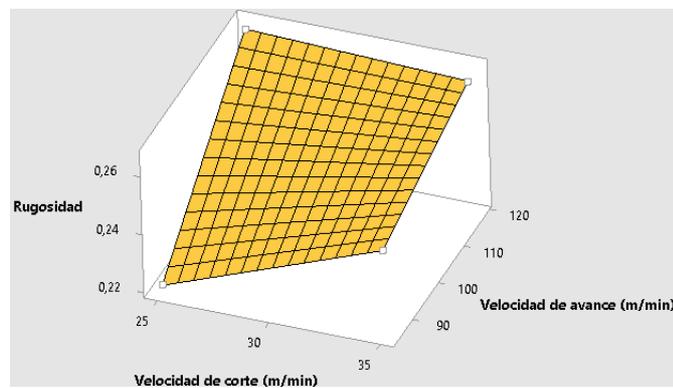


Figura 3.15 Gráfica de rugosidad vs velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria ZIGZAG.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

$$R_a = -0,15 + 0,010 * A + 0,003 * B - 0,00009 * A * B \quad (3.1)$$

La figura 3.16 muestra la superficie de la rugosidad vs velocidad de corte y velocidad de avance para una trayectoria ZIG en un modelo 3D, con su respectiva ecuación de regresión estadística, con la cual se calcula la rugosidad promedio (R_a) que se lograría

obtener al mecanizar con los parámetros establecidos dentro del nivel de trayectoria ZIG.

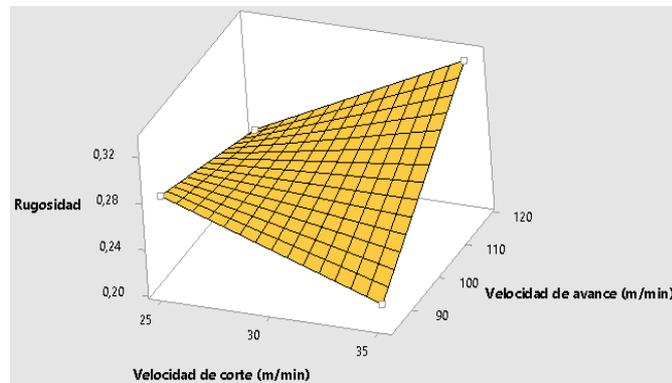


Figura 3.16 Gráfica de rugosidad vs velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria ZIG.
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

$$R_a = 1,51 - 0,045 * A - 0,0126 * B + 0,00046 * A * B \quad (3.2)$$

La figura 3.17 muestra la superficie de la rugosidad vs velocidad de corte y velocidad de avance para una trayectoria ZIGZAG 90° en un modelo 3D, con su respectiva ecuación de regresión estadística, con la cual se calcula la rugosidad promedio (R_a) que se lograría obtener al mecanizar con los parámetros establecidos dentro del nivel de trayectoria ZIG-ZAG 90°.

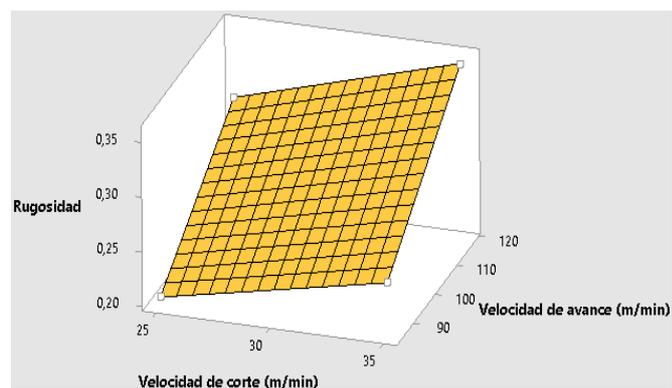


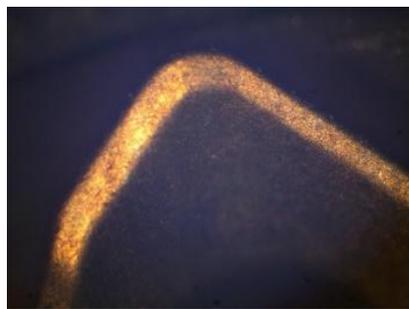
Figura 3.17 Gráfica de rugosidad vs velocidad de corte y avance en 3D para la trayectoria ZIGZAG 90°.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

$$R_a = -0,02 - 0,0004 * A + 0,0014 * B + 0,000053 * A * B \quad (3.3)$$

3.6 Desgaste de la herramienta de corte

El desgaste de la herramienta es un factor muy importante que influye en el acabado superficial ubicado en dos lugares principales, en la parte superior de inclinación y en la superficie de incidencia. En la investigación se tiene que la herramienta de corte sufrió un desgaste por adhesión ocurrido por el contacto a altas presiones y temperaturas, como se puede observar en la foto de la microestructura del inserto de carburo de tungsteno (WC) tomada con el microscopio del laboratorio de Metrología de la Universidad Politécnica Salesiana, que se muestra en la figura 3.18.



a) Microestructura sin desgaste



b) Microestructura con desgaste

Figura 3.18 Microestructura del inserto antes y después del mecanizado.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

3.7 Desarrollo de Anova

En el desarrollo del análisis estadístico para el experimento se calculó los grados de libertad para cada factor y para el arreglo ortogonal que se empleó en el mecanizado. Los grados de libertad es igual a el número de niveles menos uno, como por ejemplo para la velocidad de corte tendrá 2 grados de libertad y para el arreglo ortogonal L27 con cuatro factores y tres niveles tendrá de 26 grados de libertad.

3.7.1 Ejemplo de cálculo para el factor (A) velocidad de corte

a. Suma total de cuadrados

Con la ecuación 1.22 descrita en el capítulo 1 del método Anova, se calcula directamente la suma total de cuadrados.

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

$$\sum_{i=1}^n y_i^2 = y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2 = 0,13^2 + 0,16^2 + 0,15^2 + \dots + 0,26^2 = 2,40705$$

$$C.F = \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n y_i \right]^2 = \frac{1}{27} (0,13 + 0,16 + 0,15 + \dots + 0,26)^2 = 1,89475$$

$$S_T = 2,40705 - 1,89475$$

$$S_T = 0,5123 \mu m$$

b. Varianza para el factor A

En el cálculo de la varianza se tiene que determinar un s_T para cada factor, con la fórmula que se muestra a continuación.

$$S_{T,A} = \sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{r}\right) * \left[\sum_{i=1}^n AK_i \right]^2 - C.F$$

Donde:

L : Número de niveles

r : total de repeticiones por cada nivel del factor = 9

Nivel 1, $L = 1$; $r = 9$

$$\sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{r}\right) * \left[\sum_{i=1}^n AL_i \right]^2 =$$

$$= \frac{(0,132 + 0,164 + 0,151 + 0,141 + 0,1711 + 0,163 + 0,194 + 0,172 + 0,274)^2}{9}$$

$$\sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{r}\right)^* \left[\sum_{i=1}^n A1_i \right]^2 = 0,27196 \mu m$$

Nivel 2, $L = 2$; $r = 9$

$$\sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{r}\right)^* \left[\sum_{i=1}^n A2_i \right]^2 =$$

$$= \frac{(0,520 + 0,542 + 0,307 + 0,238 + 0,341 + 0,50 + 0,518 + 0,488 + 0,347)^2}{9}$$

$$\sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{r}\right)^* \left[\sum_{i=1}^n A2_i \right]^2 = 1,60867 \mu m$$

Nivel 3, $L = 3$; $m = 9$

$$\sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{r}\right)^* \left[\sum_{i=1}^n A3_i \right]^2 =$$

$$= \frac{(0,179 + 0,115 + 0,124 + 0,114 + 0,149 + 0,350 + 0,210 + 0,276 + 0,264)^2}{9}$$

$$\sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{r}\right)^* \left[\sum_{i=1}^n A3_i \right]^2 = 0,35323 \mu m$$

$$S_{T,A} = 0,27196 + 1,60867 + 0,35323 - 1,89475$$

$$S_{T,A} = 0,35323 \mu m$$

Una vez que se determinó la suma de cuadrado del factor A , se aplica la fórmula de la varianza que se encuentra descrita en la sección d del método Anova.

$$V_A = \frac{S_{T,A}}{f}$$

$$V_A = \frac{0,35323}{2} = 0,16956 \mu m$$

c. Error

Para el cálculo del error en la suma de cuadrados se emplea la ecuación 3.4:

$$S_e = S_T - (S_A + S_B + S_C + S_D) \quad (3.4)$$

$$S_e = 0,5123 - (0,33911 + 0,0221 + 0,00333 + 0,01171) = 0,13604 \mu m$$

$$S_e = 0,13604 \mu m$$

Para el cálculo del error de la varianza se emplea la ecuación 3.5:

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} \quad (3.5)$$

$$V_e = \frac{0,13604}{(26 - 8)} = 0,00756 \mu m$$

d. Prueba F

Se determinó con la ecuación 1.25 descrita en la sección e del método Anova. En este ejemplo se hace para el factor A .

$$F_A = \frac{V_A}{V_e}$$
$$F_A = \frac{0,16956}{0,00756} = 22,43$$

e. Porcentaje de influencia P

Para el cálculo se utilizó la ecuación 1.26 descrita en la sección f del método Anova.

En este ejemplo se hace para el factor A .

$$P = S_{T,A} \cdot \frac{100}{S_T}$$
$$P = 0,33911 \cdot \frac{100}{0,5123} = 66,19 \%$$

En la tabla 3.3 se presenta todos los resultados de cada factor estudiados en el experimento.

Tabla 3.3 Resultados del método Anova.

Parámetros	DF	S	V	Valor F	% P
(A) Velocidad de corte (m/min)	2	0,339	0,169	22,43	66,19
(B) Velocidad de avance de mesa (mm/min)	2	0,022	0,011	1,46	4,31
(C) Estrategia	2	0,003	0,001	0,22	0,65
(D) Profundidad radial (mm/diente)	2	0,011	0,005	0,77	2,29
ERROR	18	0,136	0,007		26,56
(s_r) Total	26	0,512			100

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

3.8 Prueba de hipótesis

Para la validación de los resultados del experimento se aplica la prueba de hipótesis en base a los resultados del valor F . En una prueba de hipótesis se analiza dos hipótesis opuestas: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. Se acepta o rechaza una afirmación acerca de una población al comparar el resultado en la tabla de distribución F al 95% de confianza.

3.8.1 Hipótesis nula

La hipótesis nula es una afirmación que investigadores establecen respaldándose en documentos científicos previos o en su conocimiento.

Con apoyo de la tabla de distribución F al 95 % de confianza, se establece un parámetro, para verificar los resultados del experimento de cada factor. Si el valor es igual o se encuentra dentro del rango de aceptación, la hipótesis nula se acepta.

3.8.2 Hipótesis alternativa

La hipótesis alternativa es lo contrario de la hipótesis nula. Se establece un valor diferente al asignado a la hipótesis nula, que espera probar que es cierto. Si los resultados de los factores se encuentran fuera del rango de aceptación, la hipótesis alternativa se acepta.

3.9 Análisis de resultados

En la validación de los resultados influyentes se utilizó la tabla de distribución F mediante la prueba de hipótesis.

El parámetro que se establece para la comparación, se obtiene de la tabla de distribución F . Ingresando en la columna f_2 con el error de los grados de libertad que son 18 y en la fila de f_1 con los grados de libertad de cada factor que para todos es igual a 2, el valor es de 3,5546.

La tabla 3.4 es una distribución de probabilidad continua. Se utiliza para compara las varianzas de dos distribuciones.

Tabla 3.4 Tabla de distribución F al 95% de confianza [6].

f1 = número de grados de libertad del numerador			
f2 = número de grados de libertad del denominador			
f1 \ f2	1	2 ↓	3
1	161,45	199,5	215,71
2	18,513	19	19,614
3	10,128	9,5521	9,2766
4	7,7086	6,9443	6,5914
5	6,6079	5,7861	5,4095
6	5,9874	5,1433	4,7571
7	5,5914	4,7374	4,3468
8	5,3177	4,4599	4,0662

Continuación de la tabla 3.4

9	5,1174	4,2565	3,8626
10	4,9646	4,1028	3,7083
11	4,8443	3,9823	3,5874
12	4,7472	3,8853	3,4903
13	4,6672	3,8056	3,4105
14	4,6001	3,7389	3,3439
15	4,5431	3,6823	3,2874
16	4,494	3,6337	3,2389
17	4,4513	3,5915	3,1968
18	4,4139	3,5546	3,1599
19	4,3808	3,5219	3,1274
20	4,3513	3,4928	3,0984
21	4,3248	3,4668	3,0725
22...	4,3009	3,4434	4,0491



El factor (A) velocidad de corte tiene un resultado de valor F igual a 22,43, siendo mayor que 3,55. Lo que significa que existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones para la velocidad de corte y se acepta la hipótesis alternativa, como se indica en la figura 3.19.

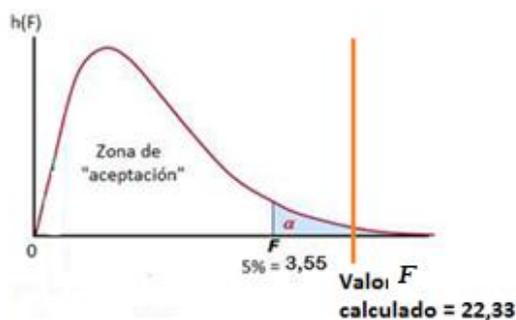


Figura 3.19 Campana de verificación de hipótesis para el valor F .
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

El factor (B) velocidad de avance tiene un resultado de valor F igual a 1,46, siendo menor que 3,55. Lo que significa que no existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones para la velocidad de avance y se acepta la hipótesis nula, como se indica en la figura 3.20.

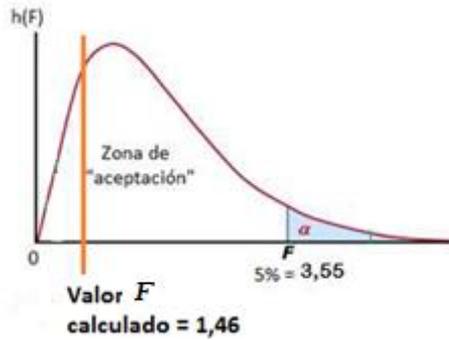


Figura 3.20 Campana de verificación de hipótesis para el valor F .
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.



Figura 3.21 Campana de verificación de hipótesis para el valor F .
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

El factor (C) estrategia tiene un resultado de valor F igual a 0,22, siendo menor que 3,55. Lo que significa que no existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones para la estrategia y se acepta la hipótesis nula, como se indica en la figura 3.22.

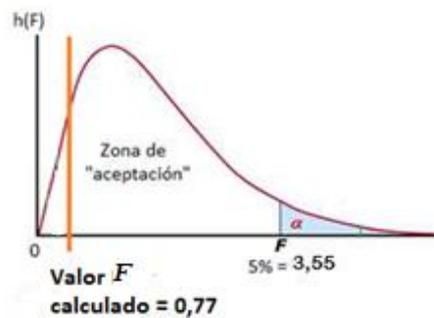


Figura 3.22 Campana de verificación de hipótesis para el valor F .
Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

El factor (D) profundidad radial tiene un resultado de valor F igual a 0,77, siendo menor que 3,55. Lo que significa que no existe diferencia estadística significativa en el origen de las variaciones para la profundidad radial y se acepta la hipótesis nula.

La tabla 3.5 permite determinar cuál de los factores empleados en el estudio es más influyente y cual el menos influyente estadísticamente. Se tiene como resultado el factor (A) con más variación estadística y el factor (C) con menor variación estadística.

Para el cálculo de delta se utiliza la ecuación que se presenta a continuación.

$$\text{Delta} = \text{valor máximo(promedio niveles)} - \text{valor mínimo (promedio niveles)} \quad (3.6)$$

Tabla 3.5 Tabla de evaluación de niveles según sus factores.

Nivel	(A) Velocidad de corte (μm)	(B) Avance (μm)	(C) Estrategias (μm)	(D) Profundidad radial (μm)
1	0,1711	0,2467	0,2489	0,2344
2	0,4233	0,2400	0,2678	0,2844
3	0,1967	0,3044	0,2744	0,2722
Delta	0,2522	0,0644	0,0189	0,0500
Rank	1	2	4	3
Rmean	0,26			

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

$$w = 0,1711 \mu\text{m} \quad x = 0,24 \mu\text{m} \quad y = 0,2489 \mu\text{m} \quad z = 0,2344 \mu\text{m}$$

3.10 Predicción de la rugosidad superficial óptima

La figura 3.23 permite visualizar como varia la rugosidad en función de los niveles para cada factor. Como se observa el factor (A) velocidad de corte es el más influyente estadísticamente para el valor promedio de la rugosidad superficial. Los niveles óptimos de los factores para obtener una rugosidad óptima se indica en la tabla 3.6:

Tabla 3.6 Niveles óptimos de los factores utilizados en el estudio.

(A) Velocidad de corte	(B) Avance	(C) Trayectoria	(D) Profundidad radial
25 m/min,	101,46 mm/min,	ZIG-ZAG,	1,29 mm

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

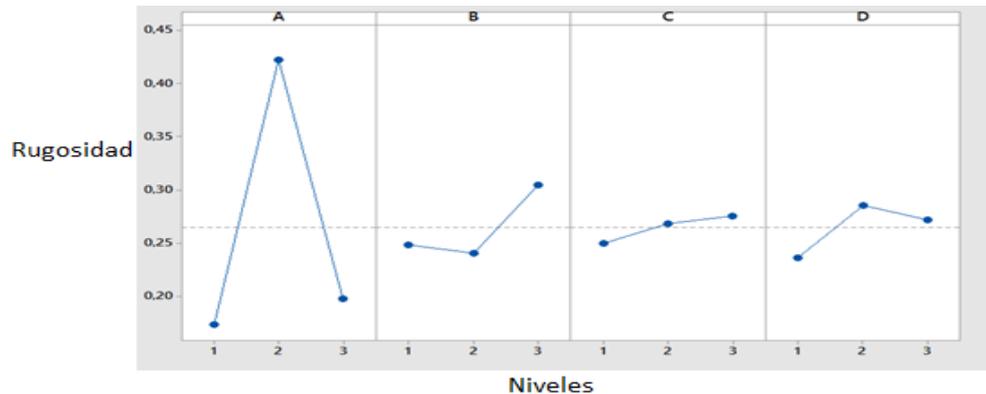


Figura 3.23 Gráfica de la rugosidad vs niveles para cada factor.

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

3.11 Resultados

La cara N°22 tiene el promedio más bajo de rugosidad con las condiciones de mecanizado que se observa en la tabla 3.7:

Tabla 3.7 Niveles de los factores con resultado de rugosidad más bajo.

(A) Velocidad de corte	(B) Avance	(C) Trayectoria	(D) Profundidad radial
35 m/min	101,46 mm/min,	ZIG-ZAG,	1,29 mm

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

Las cuales fueron comparadas con la figura 3.23 para verificar si existe una mejor condición de mecanizado que permita obtener una rugosidad óptima.

En la cara N° 28 se realizó un nuevo mecanizado basado en la figura 3.23 que indica los parámetros óptimos para determinar un mejor acabado superficial como se puede observar en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Los mejores parámetros de corte en el mecanizado.

Cara N°	(A) Velocidad de corte (m/min)	(B) Avance (mm/min)	(C) Trayectoria	(D) Profundidad radial (mm)	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Ra4 (μm)	Rmean (μm)
28	25	101,46128	ZIG-ZAG	1,29	0,072	0,145	0,124	0,009	0,110

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja.

Pero así también se presentó el peor escenario en la cara N° 11 con el promedio de rugosidad más alta de 0,5427 μm como se puede ver en la figura tabla 3.9.

Tabla 3.9 Los peores parámetros de corte en el mecanizado.

Cara N°	(A) Velocidad de corte (m/min)	(B) Avance (mm/min)	(C) Trayectoria	(D) Profundidad radial (mm)	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Ra4 (μm)	Rmean (μm)
11	30	84,551	ZIG	4,32	0,49	0,71	0,18	0,79	0,5427

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja

Según los datos de la tabla 3.5 la rugosidad óptima acorde a Taguchi se puede obtener con la ecuación 3.7.

$$R_{opt} = W + X + Y + Z - 3 \cdot R_{mean} \quad (3.7)$$

Donde:

$w + x + y + z$: Es el valor menor de los promedios de cada nivel, que se muestran en la tabla 3.5.

R_{mean} : Es el promedio de total de todas las rugosidades.

Para la rugosidad óptima se calculó:

$$R_{opt} = 0,1711 + 0,24 + 0,2489 + 0,2344 - 3 \cdot (0,27001) = 0,0844 \mu m$$

Para validar el proceso, se utiliza un intervalo de confianza (CI), que se calcula con la siguiente ecuación 3.8.

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

Donde:

- DFe : Grados de libertad del error tomado de la tabla de distribución F .
F(1,18)=4,4139
- Ve : La varianza del error que se muestra en la tabla 3.5.
- Rp : Es el número de mediciones de rugosidad en las caras. $Rp = 4$

El valor de $neff$ es número efectivo de replicaciones y se calcula con la siguiente ecuación 3.9.

$$neff = \frac{N}{1 + V_r} \quad (3.9)$$

Donde:

- N : Número total de pruebas.
- V_r : Número total de grados de libertad de los factores que más influyen.

$$neff = \frac{27}{1 + 2} = 9$$

Entonces, el intervalo de confianza:

$$CI = \sqrt{4,4139 * 0,00756 * \left[\frac{1}{9} + \frac{1}{4} \right]} = \pm 0,1097 \mu m$$

Por lo tanto el rango de la rugosidad óptima es $0,0844 \pm 0,1097$.

La toma de datos se realizó cuatro veces en la cara N° 28, mecanizada con los niveles óptimos para obtener una rugosidad mejorada. El promedio de la rugosidad óptima es de 0,110 μm . El resultado obtenido se encuentra dentro del rango del proceso de optimización, comprando así la validez del estudio.

3.12 Costos de experimento

En los costos del experimento se ha considerado todos los procesos desarrollados hasta la obtención final de los resultados de la rugosidad superficial.

En la tabla 3.10 se muestra los detalles de cada actividad y materiales adquiridos.

Tabla 3.10 Análisis de costos para un mecanizado plano en AISI P20.

Análisis de costos			
Detalle de costos	Cantidad	Tiempo	Costo
Base de aluminio	1	-	\$73,56
Tratamiento térmico. 14 probetas en Bohler	-	-	\$5,60
Probetas	14	-	\$29,79
Fabricación de probetas y base de aluminio	--	24 horas	\$250
Porta-insertos	1		\$150
Insertos	10		\$157,5
Maquinado en el centro de mecanizado EMCO Concept Mill 260	-	8 horas	\$160
		Total	\$816,45

Fuente: Kevin Rivas y Nataly Granja

Conclusiones

- Los factores de mecanizado seleccionados para el experimento muestran una gran influencia en el acabado superficial. El factor velocidad de corte tiene una influencia significativa del 66,19% en los promedios de la rugosidad en todos los niveles a comparación del avance con 4,31%, trayectoria con 0,65 %, y profundidad radial con 2,29 % que al sumar con el porcentaje de error de 26,56 % da el 100%.
- Para obtener altas durezas en el acero AISI P20 se realiza en baños de sales compuestas, en el tratamiento térmico del temple y revenido con tiempos basados en los espesores de la pieza. Las probetas antes del mecanizado tienen una dureza promedio de 52 HRC y después del mecanizado varia a 54 HRC, por lo tanto existe una incremento del 2,07% al promedio total en la dureza. Esto sucede por las distorsiones de temperatura que el material sufre durante el mecanizado y el calor generado que provoca variaciones estructurales en las capa superficial. El endurecimiento también se debe a que el material contiene Cromo, Magnesio y Molibdeno, que al entra en contacto la herramienta con la superficie tiende a endurecer rápidamente al material.
- Los resultados para cada nivel de trayectorias muestran una baja influencia de en las estrategias de mecanizado, con un porcentaje de influencia del 0,65 % con respecto a los demás factores como velocidad de corte, avance, profundidad radial y el error que completan el 100 %. Por tanto las trayectorias que el software CAM presenta para planeado, muestran un excelente resultado en la interacción con el centro mecanizado EMCO Concept Mill 260 en el experimento.

- Con la aplicación del método Taguchi se logró desarrollar diferentes combinaciones de factores y niveles, donde se obtiene en una matriz ortogonal de 27 operaciones. Las operaciones de mecanizado permiten recopilar datos de rugosidad para cada estrategia, teniendo un resultado promedio total de rugosidad $0,27 \mu\text{m}$, y para un proceso de fresado el rango es de 1,2 a $4,5 \mu\text{m}$. Los datos medidos permiten desarrollar un estudio estadístico con el método Anova.
- Los valores promedios de la rugosidad de la superficie y el método Anova se aplicaron para estudiar la rugosidad superficial y optimizar los factores de mecanizado. Los niveles óptimos para cada factor en el experimento son: velocidad de corte = 25 m/min, avance = 101,461 mm/min, trayectoria = ZIG-ZAG y profundidad radial = 1,29 mm, teniendo un resultado de rugosidad superficial de $0,11 \mu\text{m}$.
- Conforme al estudio del modelo estadístico Anova, los resultados de las rugosidades obtenidas mediante el método experimental Taguchi, permiten obtener una rugosidad óptima ideal de $0,0844 \mu\text{m}$ con una tolerancia de $\pm 0,109 \mu\text{m}$. Al mecanizar la estrategia mejorada se obtiene una rugosidad óptima medida de $0,110 \mu\text{m}$. Por lo tanto se tiene una mejora de la rugosidad del 3,63%, para los factores: velocidad de corte, avance, trayectoria y profundidad radial.
- Los detalles de costos con mayor valor son las operaciones de mecanizado: el centro de mecanizado EMCO Concept Mill 260 y la fabricación de la base y probetas. El tiempo está relacionado directamente con el costo al realizar estos trabajos. Los tiempos varían según la estrategia diseñada en el software CAM. La simulación del software para las primeras 9 caras tiene un tiempo de 29 minutos y en la práctica el centro de mecanizado EMCO Concept Mill 260 tiene un tiempo

de 27 minutos, presentando una variación de 2 minutos menos el tiempo real con el tiempo de simulación.

- La ecuación de regresión estadística para la trayectoria ZIG-ZAG permite calcular una predicción de la rugosidad teórica que la superficie obtendrá al mecanizar con valores que se encuentren dentro del rango de niveles presentados en el estudio. Para la rugosidad óptima se calcula una rugosidad teórica de $0,23 \mu\text{m}$, y al mecanizar la estrategia óptima se obtiene una rugosidad medida de $0,11 \mu\text{m}$. Por lo tanto se tiene un intervalo de error de $0,12 \mu\text{m}$, que es aceptable al encontrarse dentro del rango de tolerancia calculada que es de $0,193 \mu\text{m}$.

Recomendaciones

- Es importante mencionar que en el estudio se realizó el tratamiento térmico de temple y revenido antes del mecanizado con sus respectivas medidas para cada probeta, como resultado se obtuvo que las probetas aumentaron sus medidas por el cambio estructural generado en el material por lo que es recomendable mecanizar la pieza para luego temprar y conseguir las medidas deseadas.
- Diseñar un experimento variando la profundidad axial, ya que en el estudio se utilizó una profundidad axial constante, porque el acero M238 tiene una dureza de 52-54 HRC y debe tener en cuenta las alturas que soportaría la herramienta para cada nivel.
- Hacer un estudio sobre el desgaste de la herramienta de corte en función del tiempo de mecanizado, para definir la vida útil de la calidad geométrica.
- Realizar un estudio basado en el mecanizado sin refrigerante para evaluar los costos de producción y conseguir mejores beneficios, como aumentar la productividad o disminuir los costos.
- Analizar las fuerzas de corte generadas en el mecanizado para extender este estudio a mecanizado de alta velocidad para trabajar con velocidades de corte y avance mayores a las utilizadas en este estudio.
- Realizar un estudio sobre el endurecimiento del material después del mecanizado, debido a que factores sucede el incremento de la dureza.

Referencias

- [1] S. Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, México: Pearson Educación, 2008.
- [2] M. Rossi, Maquinas - Herramientas Modernas, España: Dossat S.A., 1981.
- [3] J. Barreiro, Tratamientos térmicos de los aceros, Madrid: Nuevas graficas S. A., 1949.
- [4] J. Schey, Procesos de Manufactura, Mexico D.F.: McGRAW - HILL/INTERAMERICANA, 2002.
- [5] M. Goover, Fundamentos de manufactura moderna, México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [6] R. Ranjit K. , A Primer on the Taguchi Method, United States of America: Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [7] Bohler, «bohler-edelstahl,» 13 Marzo 2011. [En línea]. Available: [http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/M238FSP\(2\).pdf](http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/M238FSP(2).pdf). [Último acceso: 6 3 2017].
- [8] S.A., Cia. General de los Aceros, «CGA,» Marzo 2007. [En línea]. Available: <http://porticus.usantotomas.edu.co/bitstream/11634/326/7/ANEXO%20F.%20FICHA%20TECNICA%20DE%20ACERO%201-2738%20PARA%20MOLDES.pdf>. [Último acceso: 11 Abril 2017].
- [9] P. Molera Solá, Tratamientos térmicos de los metales, España: MARCOMBO, S.A., 1991.
- [10] T. Aaron, ASM Handbook, EEU|U: ASM Internacional, 1995.
- [11] K. L. Castro Vera , «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,» 7 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12133/1/T-ESPE-053505.pdf>. [Último acceso: 14 Octubre 2017].
- [12] DORMER, Manual Técnico, Madrid, 2013.
- [13] C. Jensen, Dibujo y diseño en ingeniería, México: Mc Graw Hill, 2002.

- [14] «Bibing,» 07 Mayo 2008. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4483/fichero/2.+Sistemas+de+CAD-CAM.pdf>. [Último acceso: 3 Mayo 2017].
- [15] A. Murat, Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 Aluminium alloy via taguchi method, 2013.
- [16] A. Murat, Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 Aluminium alloy via taguchi method, s.n, 2013.
- [17] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo y D. Figueiredo, Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method, Portugal: Periodica Polytechnica, 2016.
- [18] A. Aggarwal, H. Singh, P. Kumar y M. Singh, Optimizing power consumption for CNC turned parts using, India: Journal of materials processing technology 200, 2008.
- [19] Emco , «emco-world,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.emco-world.com/en/>. [Último acceso: 29 11 2017].
- [20] Mitutoyo , «mitutoyo,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.mitutoyo.com/>. [Último acceso: 29 11 2017].
- [21] Phase II, «phase2,» [En línea]. Available: <http://www.phase2.com.mx/>. [Último acceso: 29 11 2017].
- [22] Arno, «Arno Werkzeuge,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.arno-tools.co.uk/products/milling/milling/detail/indexable-inserts00.html>. [Último acceso: 28 Septiembre 2017].
- [23] The Ultra-met Company, «Ultra-met,» 2017. [En línea]. Available: <http://carbide.ultra-met.com/item/iso-grades/iso-grade-classifications-tungsten-carbide/k20#>. [Último acceso: 14 Octubre 2017].
- [24] ARNO, «www.arno.de,» 23 Diciembre 2003. [En línea]. Available: <http://fts-forever.com.tw/eng/pdf/06arno.pdf>. [Último acceso: 21 Septiembre 2017].
- [25] M. Rossi, Máquinas herramientas modernas, España: Dossat, S. A., 1981.

- [26] S. Poveda Martínez, «ocw.upm,» Junio 2001. [En línea]. Available: http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/MATERIALES/acabados.pdf. [Último acceso: 6 Marzo 2017].
- [27] N. Torres, «diagramasde,» 25 Mayo 2009. [En línea]. Available: <http://diagramasde.com/diagramas/otros/31422876-ENSAYO-DE-DUREZAS.pdf>. [Último acceso: 11 4 2017].
- [28] J. D. Santos Benítez, Simulación del estado de orientación de fibras cortas de guadua en el biomaterial compuesto: PP- GAK moldeado por inyección mediante sistemas CAD-CAE, Cuenca: S.n, 2015.
- [29] J. C. Méndez García, D. Jaramillo Viguera y M. d. P. E. García Nieto, Ingeniería del procesamiento de materiales, México: s.n., 2007.
- [30] F. Díaz del Castillo Rodríguez, Máquinas CNC, Robots y la manufactura flexible, México: s.n., 2010.
- [31] A. Bonilla, Herramienta de diseño e ingeniería, Zamudio, 2003.
- [32] J. Barrerero, Tratamientos térmicos de los aceros, Madrid: Nuevas graficas S. A., 1949.

Anexos

Anexo 1 Código de programación para las caras 1 al 9

N10 ; T2 D=16 CR=0 - ZMIN=-0.05 - fresa con punta plana N11 G90 G94 N12 G71 G64 N13 G17 G54 G0 N14 Z20 N15 ; Cara24 (2) N16 M9 T2 M6 N17 S696 M3 N18 G54 M8 N19 X-28.762 Y65.462 N20 D1 Z15 N21 Z5 N22 G1 Z-0.05 F1397 N23 Y57.5 N24 Y32.5 F101.5 N25 X-32.981 Y57.5 N26 X-37.2 Y32.5 N27 X-41.419 Y57.5 N28 X-45.638 Y32.5 N29 X-49.857 Y57.5 N30 G0 Z15 G17 N31 ; Cara25 (2) N32 M8 N33 G0 X19.414 Y27.061 N34 Z15 N35 Z5 N36 G1 Z-0.05 F1397 N37 X12.5 N38 X-12.5 F118.4 N39 Y29.596 N40 X12.5 Y32.13 N41 X-12.5 Y34.665 N42 X12.5 Y37.2 N43 X-12.5 Y39.735 N44 X12.5 Y42.27 N45 X-12.5 Y44.804 N46 X12.5 Y47.339	N49 G0 Z15 N50 ; Cara26 (2) N51 M8 N52 X24.538 Y28.762 N53 Z5 N54 G1 Z-0.05 F1397 N55 X32.5 N56 X57.5 F118.4 N57 G0 Z5 N58 X23.7 Y32.981 N59 G1 Z-0.05 F1397 N60 X32.5 N61 X57.5 F118.4 N62 G0 Z5 N63 X23.7 Y37.2 N64 G1 Z-0.05 F1397 N65 X32.5 N66 X57.5 F118.4 N67 G0 Z5 N68 X23.7 Y41.419 N69 G1 Z-0.05 F1397 N70 X32.5 N71 X57.5 F118.4 N72 G0 Z5 N73 X23.7 Y45.638 N74 G1 Z-0.05 F1397 N75 X32.5 N76 X57.5 F118.4 N77 G0 Z5 N78 X23.7 Y49.857 N79 G1 Z-0.05 F1397 N80 X32.5 N81 X57.5 F118.4	N83 ; Cara27 (2) N84 M8 N85 X-25.782 Y18.178 N86 Z15 N87 Z5 N88 G1 Z-0.05 F1397 N89 Y12.5 N90 Y-12.5 F118.4 N91 X-27.05 Y12.5 N92 X-28.319 Y- 12.5 N93 X-29.588 Y12.5 N94 X-30.856 Y- 12.5 N95 X-32.125 Y12.5 N96 X-33.394 Y- 12.5 N97 X-34.663 Y12.5 N98 X-35.931 Y- 12.5 N99 X-37.2 Y12.5 N100 X-38.469 Y- 12.5 N101 X-39.737 Y12.5 N102 X-41.006 Y- 12.5 N103 X-42.275 Y12.5 N104 X-43.544 Y- 12.5 N105 X-44.812 Y12.5 N106 X-46.081Y- 12.5 N107 X-47.35 Y12.5	N109 X-49.887 Y12.5 N110 G0 Z15 G54 Z0 N111 M30
---	--	--	---

N47 X-12.5 Y49.874 N48 X12.5	N82 G0 Z15	N108 X-48.618 Y-12.5	
---------------------------------	------------	-------------------------	--