



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LOS
PARÁMETROS ÓPTIMOS DE MECANIZADO EN ALEACIONES
DE ALUMINIO QUE GENEREN EL MEJOR ACABADO
SUPERFICIAL EN PARTES Y PIEZAS AUTOMOTRICES”**

Trabajo de titulación

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

AUTOR: WALTER ABRAHAM NOGALES PASTUÑA

DIRECTOR: Ing. MILTON ISRAEL QUINGA MORALES

Riobamba – Ecuador

2020

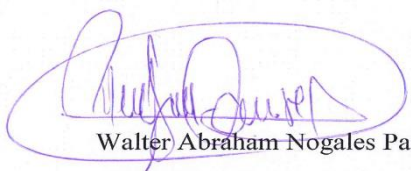
© 2020, Walter Abraham Nogales Pastuña

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Walter Abraham Nogales Pastuña, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor/autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 29 de Enero de 2020



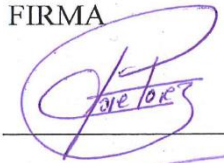


Walter Abraham Nogales Pastuña
050348266-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo Trabajo Experimental, “ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE MECANIZADO EN ALEACIONES DE ALUMINIO QUE GENEREN EL MEJOR ACABADO SUPERFICIAL EN PARTES Y PIEZAS AUTOMOTRICES”, realizado por el señor/ la señorita: WALTER ABRAHAM NOGALES PASTUÑA, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2020-01-29
Ing. Milton Israel Quinga Morales DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN		2020-01-29
Dr. Mario Audelo Guevara MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2020-01-29

DEDICATORIA

Quisiera empezar diciendo que este trabajo lo dedico a dios por haberme dado salud y vida, para hoy estar cumpliendo uno de mis objetivos. A mi madre por todo el apoyo incondicional, su esfuerzo y su perseverancia hasta verme convertido en un profesional.

A mis hermanos por estar ahí siempre que los he necesitado con sus consejos y motivación para seguir adelante.

A mis tíos y tías por siempre haber estado ahí apoyándome siempre que los he necesitado.

Walter Abraham Nogales Pastuña

AGRADECIMIENTOS

Un sincero y profundo agradecimiento a la Escuela Superior politécnica de Chimborazo por haberme permitido formar parte de tan prestigiosa institución, a la Facultad de mecánica y Escuela de Ingeniería Automotriz y a todos quienes forman parte de la misma, en especial a los docentes quienes han compartido su conocimiento y experiencia para poder formarme y prepararme como un profesional con ética y vocación de servicio.

A todas las personas que han aportado en este trabajo ya que sin el apoyo de ellos este trabajo hubiese sido más difícil e incluso no hubiese sido posible realizarlo.

Walter Abraham Nogales Pastuña

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ABREVIACIONES.....	xii
SIMBOLOGÍA.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
SUMMARY.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
1 MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 Procesos de manufactura.....	5
1.1.1 Maquinado.....	6
1.1.2 Tecnología de maquinado.....	7
1.1.3 Tipos de operaciones de maquinado.....	8
1.1.4 La herramienta de corte.....	9
1.1.4.1 Condiciones de corte.....	10
1.1.4.2 Vida útil de las herramientas.....	12
1.1.5 Tecnología de las herramientas de corte.....	12
1.1.5.1 Materiales para herramientas.....	12
1.1.5.2 Configuración geométrica de las herramientas de una punta.....	14
1.1.6 Fluidos para corte.....	16
1.1.6.1 Aplicación de los fluidos para corte.....	17
1.1.6.2 Tipos de virutas producidos en el corte de metales.....	18
1.1.7 Máquinas herramienta.....	19
1.1.8 Temperatura de corte.....	21
1.2 Torneado.....	22
1.2.1 Condiciones de corte en el torneado.....	22
1.2.2 Control numérico.....	24
1.2.2.1 Torno CNC.....	26
1.2.3 Estructura de un programa CNC.....	27

1.3	Acabado superficial	28
1.3.1	<i>Tolerancias y acabado superficial.....</i>	28
1.3.2	<i>Acabado superficial en una operación de torneado</i>	28
1.3.3	<i>Estructura e integridad estructural.....</i>	29
1.3.4	<i>Integridad superficial</i>	30
1.3.5	<i>Textura y rugosidad superficial</i>	31
1.3.6	<i>Símbolos para la rugosidad superficial.....</i>	34
1.4	Medición de la rugosidad superficial	35
1.4.1	<i>Digital surface roughness tester.....</i>	36
1.4.1.1	<i>Aplicación.....</i>	37
1.4.1.2	<i>Principio</i>	37
1.4.1.3	<i>Características.....</i>	37
1.4.2	<i>Rugosidad superficial en la práctica de ingeniería</i>	39
1.5	Hipótesis	39
1.5.1	<i>Variables de la hipótesis</i>	39
1.5.1.1	<i>Variable independiente</i>	39
1.5.1.2	<i>Variable dependiente</i>	39
CAPÍTULO II		
2	MARCO METODOLÓGICO	40
2.1	Introducción	40
2.2	Nivel de la investigación	40
2.3	Enfoque de la investigación.....	41
2.4	Diseño de la investigación	41
2.5	Población y muestra	42
2.5.1	<i>Población.....</i>	42
2.5.2	<i>Muestra</i>	42
2.6	Operación de las variables	43
2.6.1	<i>Variables independientes</i>	43
2.6.1.1	<i>Parámetros de corte</i>	43
2.6.1.2	<i>Herramientas de corte</i>	44
2.6.2	<i>Variable dependiente</i>	44
2.7	Materiales y equipos.....	44
2.8	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	46

2.8.1	<i>Técnicas de recolección de datos</i>	46
2.8.2	<i>Instrumentos de recolección de datos</i>	477
2.9	Procesamiento de datos	47
2.9.1	<i>Herramienta para el procesamiento de datos</i>	47
2.10	Procedimiento experimental	48

CAPÍTULO III

3	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	49
3.1	Obtención de las probetas	49
3.2	Medición de la rugosidad superficial	53
3.3	Espectrometría	56
3.3.1	<i>Composición química de la muestra con 5% de Cu</i>	57
3.4	Tabulación de datos	57
3.5	Análisis estadístico de los datos	59
3.5.1	<i>Condiciones iniciales</i>	59
3.5.2	<i>Cálculos teóricos</i>	61
3.5.3	<i>Análisis de varianza (ADEVA)</i>	64
3.6	Prueba de hipótesis	67
3.6.1	<i>Hipótesis</i>	67
3.6.2	<i>Modelo matemático</i>	67
3.6.3	<i>Nivel de significancia</i>	68
3.6.4	<i>Grados de libertad</i>	68
3.6.5	<i>Cálculo del valor estadístico y crítico F</i>	68
3.6.6	<i>Toma de decisión y conclusión</i>	69
3.7	Mecanizado experimental	69

	CONCLUSIONES	71
--	---------------------------	----

	RECOMENDACIONES	72
--	------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Factores influyentes en las operaciones de maquinado	11
Tabla 2-1:	Valores típicos de dureza a temperatura ambiente para herramientas de corte ...	13
Tabla 3-1:	Velocidades de corte permisibles para materiales de herramientas.....	13
Tabla 4-1:	Valores de potencia y energía para determinados materiales de trabajo	20
Tabla 5-1:	Valores de tolerancias típicas y rugosidades superficiales (torneado)	28
Tabla 6-1:	Especificaciones del SRT-6210S.....	38
Tabla 1-2:	Cuchillas usadas para la operación de torneado	44
Tabla 2-2:	Materiales y equipos.....	45
Tabla 1-3:	Composición química de la muestra con un contenido de 5% de Cu.....	57
Tabla 2-3:	Medición de la rugosidad superficial del primer bloque	58
Tabla 3-3:	Medición de la rugosidad superficial del segundo bloque.....	58
Tabla 4-3:	Medición de la rugosidad superficial del tercer bloque	59
Tabla 5-3:	Valores de rugosidad superficial en función de la probeta mecanizada	60
Tabla 6-3:	Interacción variedad x velocidad de corte	62
Tabla 7-3:	Interacción variedad x avance	62
Tabla 8-3:	Interacción velocidad de corte x avance.....	63
Tabla 9-3:	Fórmulas para calcular la tabla ADEVA mediante Fisher	64
Tabla 10-3:	Resultados del ADEVA de los datos.....	65
Tabla 11-3:	Análisis de varianza mediante Minitab	65
Tabla 12-3:	Distribución de medias para el factor C	66
Tabla 13-3:	Prueba de Tukey del factor C	67
Tabla 14-3:	Comparación entre los valores críticos de Fisher	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Clasificación de los procesos de manufactura	5
Figura 2-1:	Sección transversal de un proceso de maquinado	7
Figura 3-1:	Procesos de maquinado comunes.....	8
Figura 4-1:	a) Herramienta de una sola punta y b) una fresa con bordes cortantes múlt.....	10
Figura 5-1:	Condiciones de corte para una operación de torneado.....	10
Figura 6-1:	Configuración geométrica de una herramienta de punta.....	14
Figura 7-1:	Formas para sostener y presentar el borde de corte de una herramienta.....	15
Figura 8-1:	Formas comunes de insertos	16
Figura 9-1:	Tipos: a) discontinua, b) continua, c) acumulación en el borde, y d) dentada..	19
Figura 10-1:	Factor de correlación cuando $to > 0.25$ mm (0.010in)	21
Figura 11-1:	Operación de torneado	22
Figura 12-1:	Otras operaciones diferentes al torneado que se realizan en un torno	24
Figura 13-1:	Sistema de coordenadas usado en trabajo rotatorio	25
Figura 14-1:	Torno CNC Lathe modelo CK6136A-2.....	26
Figura 15-1:	Estructura de un código G.....	27
Figura 16-1:	Esquema de una sección transversal de la estructura superficial metálica	30
Figura 17-1:	Terminología y símbolos estándar del acabado superficial (u_{in})	32
Figura 18-1:	Coordenadas utilizadas para medir la rugosidad superficial.....	33
Figura 19-1:	Símbolos comunes de direccionalidad superficial	34
Figura 20-1:	Medición de la rugosidad superficial	35
Figura 21-1:	Digital surface roughness tester	36
Figura 1-2:	Proceso para la realización de la investigación.....	48
Figura 1-3:	Corte de los tubos de acero	49
Figura 2-3:	Soldadura de la platina al tubo de acero	49
Figura 3-3:	Horno de crisol a 700°C.....	50
Figura 4-3:	Peso del material reciclado	50
Figura 5-3:	Material depositado en el horno.....	50
Figura 6-3:	Extracción del fundido del horno de crisol	51
Figura 7-3:	Relleno del fundido en los moldes cilíndricos	51
Figura 8-3:	Relleno del fundido en los moldes cuadrados.....	51
Figura 9-3:	Piezas solidificadas	52
Figura 10-3:	Corte de los moldes cilíndricos	52
Figura 11-3:	Corte de los moldes cuadrados.....	52
Figura 12-3:	Piezas extraídas de los moldes	53

Figura 13-3:	Montaje de las herramientas de corte.....	53
Figura 14-3:	Programación de las condiciones de operación	54
Figura 15-3:	Cilindrado de las probetas.....	54
Figura 16-3:	Montaje de la muestra y del STR-6210S	55
Figura 17-3:	Bloque de 9 probetas.....	55
Figura 18-3:	Probetas refrentadas	56
Figura 19-3:	Probeta en el BRUKER Q2 ION.....	56
Figura 20-3:	Pomo	69
Figura 21-3:	Mecanizado	70

ÍNDICE DE ABREVIACIONES

CAM	Manufactura asistida por computadora
CNC	Control numérico computarizado
INEN	Instituto Ecuatoriano de normalización
ISO	Organización Internacional de Estandarización
MEF	Método de elementos finitos
BUE	Borde acumulado o recrecido

SIMBOLOGÍA

N	Velocidad de rotación	rev/min
v	Velocidad de corte	m/min
d	Profundidad de corte	mm
f_r	Velocidad de avance	mm/min
f	Avance	mm/rev
T_m	Tiempo de maquinado	min
L	Longitud de la pieza cilíndrica	mm
R_{MR}	Velocidad de remoción de material	mm ³ /s
NR	Radio de la nariz en la punta de la herramienta	mm
Ra	Valor estimado de la rugosidad real	um
R_q	Rugosidad de la raíz media cuadrática	um
GL	Grados de libertad	
SC	Suma de cuadrados	
CM	Cuadrados medios	
Ft	Valor crítico F de tabla	
Fc	Valor estadístico F	
α	Nivel de confianza	
S_x	Coefficiente de variación	
a	Factor a	
b	Factor b	
c	Factor c	
n	Cantidad de lecturas	

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F (0.05)

ANEXO B: VALORES CRÍTICOS PARA LA PRUEBA DE TUKEY (0.05)

ANEXO C: PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL RUGOSÍMETRO DIGITAL SRT-6210S

RESUMEN

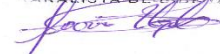
El presente Trabajo de Titulación tuvo como objetivo determinar los parámetros óptimos de mecanizado en la fabricación de partes y piezas automotrices. El material empleado es una aleación de aluminio con un contenido del 5% en peso de cobre, que se obtuvo mediante un proceso de fundición en un horno de crisol fijo. Para la experimentación se desarrolló un diseño de experimentos donde se controlan factores como los parámetros de corte, avance y la herramienta empleada durante las operaciones de cilindrado de un eje, la variable de respuesta está definida por la rugosidad resultante en la superficie al finalizar cada experimento, cada valor se tabula para su posterior tratamiento y análisis estadístico, con la finalidad de determinar los parámetros óptimos de mecanizado con el fin de obtener la menor rugosidad posible, mejorando así los procesos de torneado en aleaciones de aluminio-cobre. Con el objetivo de validar el experimento, se maquinó un elemento automotriz con los resultados obtenidos. Por tanto, se concluyó que el avance y el fluido de corte son los factores más influyentes en la calidad del acabado superficial y por eso se recomienda mecanizar este material con un avance de 1 mm a 600 rev/min y utilizar un refrigerante emulsionado en agua debido a que es el más adecuado a altas velocidades de corte.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <PARÁMETROS DE MECANIZADO>, <ALEACIÓN DE ALUMINIO-COBRE>, <TORNO CNC>, <CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA (CNC)>, <RUGOSIDAD SUPERFICIAL>, <RUGOSÍMETRO>, <ESPECTROMETRÍA>, <ANÁLISIS ESTADÍSTICO>, <DISEÑO EXPERIMENTAL>.

REVISADO

28 ENE 2020

Ing. Jonathan Parraño Guillas, MBA
ANALISTA DE INGENIERÍA



SUMMARY

The purpose of the present degree work was to determine the optimal parameters machined in the manufacture of automotive parts and parts. The material used is an aluminium alloy with a content of 5% by weight of copper, which was obtained by melting in a fixed crucible furnace. An experiments design was developed for the experimentation where factors such as the parameters of cutting, advance and the tool used during the displacement operations of an axis are controlled. The resulting roughness defines the response variable on the surface at the end of each experiment, and each value is tabulated for its subsequent treatment and statistical analysis in order to determine the optimum machining parameters in order to obtain the least possible roughness, thus improving the turning processes in aluminium-copper alloys. An automotive element was machined with the results obtained to validate the experiment. Therefore, it concludes that the feed and the cutting fluid are the most influential factors in the quality of the surface finish and that is why it is recommended to machine this material with a feed of 1 mm at 600 rev/min and use a water-emulsified refrigerant because it is the most suitable at high cutting speeds.

Keywords: <ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGY>, <MACHINING PARAMETERS>, <ALUMINUM-COPPER ALLOY>, <CNC LATHE>, < COMPUTER NUMERICAL CONTROL (CNC)>, <SURFACE RUGOSITY>, <RUGOSIMETER>, <SPECTROMETRY>, <STATISTICAL ANALYSIS>, <EXPERIMENTAL DESIGN>.



INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En el Ecuador la gran mayoría de las partes, piezas y autopartes automotrices son importados debido a que en el país no existen industrias que se dediquen a la fabricación de las mismas y de haberlas son muy pocas, esto no quiere decir que nuestra industria no esté en la capacidad de hacerlo, pues solo basta con mirar la gran cantidad de industria carrocera en el país.

En una superficie pueden existir distintos defectos, dependiendo de la manera en que se haya generado la superficie. Estos defectos (así como diversas texturas superficiales) pueden tener una influencia importante en la integridad superficial de las piezas de trabajo y las herramientas. (Groover, 2007, p. 506)

La tecnología de control numérico por computadora denominado CNC, surgió después de la segunda guerra mundial con el desarrollo potencial de la industria aeroespacial para lo cual las piezas tenían una geometría compleja y debían cumplir ciertos requisitos de precisión. (Industria & Empresas, 2014)

En la década de los 50 se usó por primera vez una computadora con una máquina-herramienta. No paso mucho tiempo hasta que la computación fue incorporada masivamente a la producción de piezas. Luego en la década de los 60 con la invención de los circuitos integrados se reduce el costo de los controladores. (Industria & Empresas, 2014)

En la década de los 60, también se desarrolló el lenguaje de programación conocido como el G-code. El lenguaje consistía en caracteres alfanuméricos que, a través de instrucciones, controlaban los movimientos de la máquina-herramienta. (Industria & Empresas, 2014)

Para los finales de la década de los 60 nació el CNC, pudiendo aplicarse a varios tipos de máquinas y expandiéndose a otras industrias. En 1976 se aplicó el microprocesador a las computadoras, dando un enorme salto en el desarrollo de la tecnología CNC, haciéndose posible las interpolaciones rectas y curvas entre ejes. (Industria & Empresas, 2014)

En la actualidad las maquinas CNC están automatizadas son rápidas, confiables e inteligentes debido a que pueden detectar cambios o problemas en el proceso de manufactura y dar el respectivo aviso o incluso parar la máquina. Estas máquinas CNC ha ido y seguirán evolucionando en función de las necesidades ya sean por la invención nuevos materiales, velocidades más altas de trabajo y calidad del acabado superficial de las piezas entre otros.

Planteamiento del problema

En el país no existen estudios relacionados a determinar los parámetros adecuados para el mecanizado de piezas, partes o autopartes automotrices, para poder garantizar un buen acabado superficial en dichos componentes. Debido a que a la superficie de una pieza presenta irregularidades dependiendo del método empleado para su fabricación, como por ejemplo las operaciones de torneado o fresado, se pueden observar ciertos patrones en su textura superficial que pueden afectar el rendimiento y vida útil del elemento.

Actualmente los principales campos de investigación en los que se está trabajando se centran en aumentar el rendimiento de los motores, reducir el consumo de combustible y optimizar su funcionamiento incorporando dispositivos electrónicos a la estructura base diseñada.

Justificación

Justificación teórica

En el presente trabajo experimental se estudiará y aplicará conceptos teóricos relacionados con el área automotriz acerca del mecanizado de piezas automotrices mediante la tecnología CNC. Por lo que, se aportará con conocimiento sobre el estudio de los parámetros de maquinado adecuados y su efecto en el acabado superficial de una pieza debido a que no existe información e investigaciones respecto con relación al problema. Además, de emplear un material que se puede obtener en el país.

Justificación metodológica

La presente investigación correspondiente a un trabajo experimental se inició con la investigación bibliográfica para sustentar las bases teóricas desde una perspectiva deductiva. Luego se procedió a la obtención de la muestra mediante la fundición de materiales reciclables a través de un horno de crisol usando un molde metálico desechable de forma cilíndrica para adquirir las probetas de aleación de aluminio-cobre con un contenido de 95% de aluminio y 5% de cobre. Después se pasó al mecanizado de las probetas en un torno CNC para poder medir la rugosidad superficial

empleando un rugosímetro. A continuación, se determinó los parámetros de maquinado adecuados que garanticen el mejor acabado superficial para la manufactura de piezas automotrices mediante ensayos de prueba y error. Por último, se mecanizó una pieza con los resultados obtenidos del análisis estadístico para validar el experimento. Durante el desarrollo del proceso práctico y teórico de esta investigación se realizó la aplicación de conocimientos científicos válidos y comprobados que garantiza la fiabilidad de los resultados.

Justificación práctica

Este trabajo de investigación aporta con información práctica relevante sobre el mecanizado de una pieza de aluminio-cobre y su efecto en el acabado superficial. Así aportando al desarrollo tecnológico de la carrera y los procesos de manufactura de las industrias automotrices en el país ya que la tecnología del CNC es muy innovadora debido a que la transmisión de la información de una pieza se puede comunicar mediante una conexión de red, cable de datos o dispositivos portátiles de forma digital.

Objetivos

Objetivo general

- Determinar los parámetros óptimos de mecanizado en la fabricación de partes y piezas automotrices mediante un diseño de experimentos para mejorar los procesos de manufactura empleados en el país.

Objetivos específicos

- Revisión bibliográfica correspondiente al diseño de experimentos acerca del acabado superficial y mecanizado de piezas automotrices para fundamentar los criterios del experimento.

- Determinar los parámetros controlables de la máquina CNC a utilizar que permita realizar un diseño de experimentos para determinar los parámetros adecuados de mecanizado de forma experimental.
- Realizar cada uno de los experimentos sobre probetas de aluminio mediante CNC para medir la rugosidad superficial en cada probeta.
- Comparar cada uno de los experimentos por medio de software estadístico para determinar los parámetros óptimos de mecanizado en función del acabado superficial.
- Mecanizar una pieza automotriz con los parámetros obtenidos en el experimento con el objetivo de validar el estudio.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Procesos de manufactura

La manufactura se puede definir de dos maneras: una tecnológica y la otra económica. En el sentido tecnológico, la manufactura es la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material de inicio dado. (L.A.E & Mejía Estañol, 2000, p. 30)

En el sentido económico, la manufactura es la transformación de los materiales en artículos de valor mayor por medio de uno o más operaciones de procesamiento o ensamblado. (L.A.E & Mejía Estañol, 2000, p. 30)

Los procesos para llevar a cabo la manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual. Entre los distintos procesos (figura 1-1), ha surgido un mayor interés por la fabricación de artículos relativamente duraderos, utilizando materiales metálicos y plásticos, que comúnmente son llamados materiales de ingeniería. (L.A.E & Mejía Estañol, 2000, p. 31)

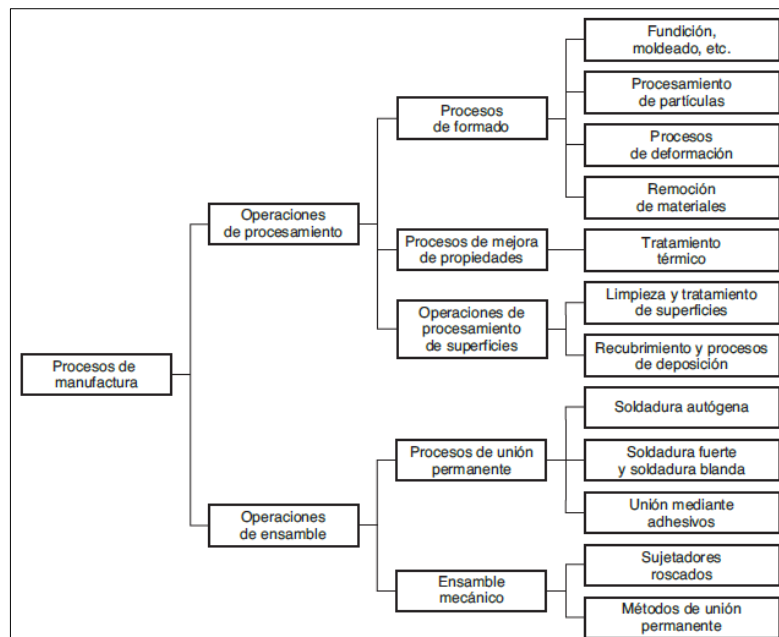


Figura 1-1: Clasificación de los procesos de manufactura

Fuente: (L.A.E & Mejía Estañol, 2000, p. 32)

Los procesos de remoción de material son operaciones que retiran el exceso de material de la pieza de trabajo con que se inicia, de modo que la forma que resulta tiene la geometría buscada. Los procesos más importantes de esta categoría son las operaciones de maquinado tales como torneado, perforado y fresado. (L.A.E & Mejía Estañol, 2000, p. 33)

1.1.1 Maquinado

El maquinado es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una pieza de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la pieza deseada. Es más frecuentemente utilizado para formar metales (Groover, 2007, p. 481)

La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar la viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie. (Groover, 2007, p. 481)

A continuación, se detalla la importancia de las operaciones de maquinado:

- *Amplia gama de materiales de trabajo.* Prácticamente todos los metales sólidos, compuestos plásticos se pueden maquinar solo los cerámicos se realizan mediante procesos de maquinado abrasivo. (Groover, 2007, p. 482)
- *Variedad de formas y características geométricas.* Se puede usar para generar cualquier forma geométrica regular e irregular, como superficies planas, agujeros redondos, hilos de rosca y ranuras en T. (Groover, 2007, p. 483)
- *Precisión dimensional.* Se puede producir dimensiones con tolerancias muy estrechas de menos de ± 0.025 mm (± 0.001 in). Es más preciso que muchos otros procesos. (Groover, 2007, p. 483)
- *Acabados superficiales de calidad.* Es capaz de crear acabados superficiales muy tersos que pueden llegar a ser mejores que 0.4 micras (16 μ -in). Algunos procesos abrasivos pueden lograr mejores acabados aún. (Groover, 2007, p. 483)

Desventajas del maquinado y otros procesos de remoción de material:

- *Desperdicio de material.* La viruta que se genera en la operación de maquinado es material de desperdicio. Aunque, en general, esta viruta puede reciclarse, en términos de la operación unitaria, el material que se remueve significa desperdicio. (Groover, 2007, p. 483)
- *Consumo de tiempo.* Una operación de maquinado, en general, toma más tiempo en formar una pieza determinada que los procesos de formados alternos como el fundido o el forjado. (Groover, 2007, p. 483)

Debido a sus características, el maquinado se realiza generalmente después de otros procesos de manufactura, como fundición o deformación volumétrica (por ejemplo, forjado y estirado de barras). Otros procesos crean la forma general de la pieza y el maquinado produce la forma final, las dimensiones y el acabado. (Groover, 2007, p. 483)

En la figura 2-1, a) se muestra una sección transversal del proceso de maquinado con un ángulo de inclinación de la herramienta de corte positivo y con un ángulo negativo se observa en la b). (Groover, 2007, p. 482)

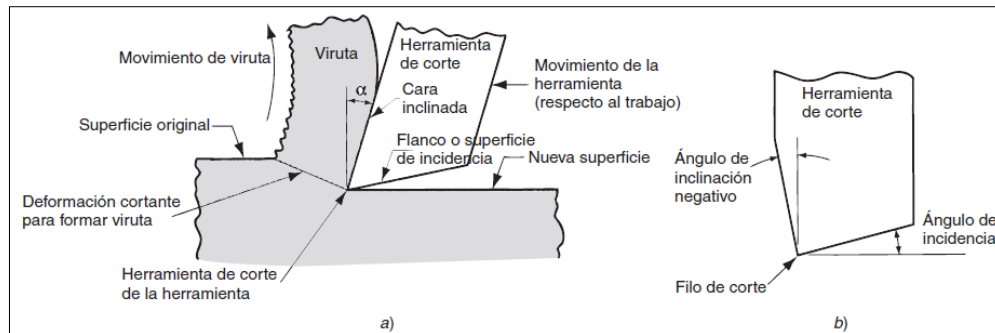


Figura 2-1: Sección transversal de un proceso de maquinado

Fuente: (Groover, 2007, p. 482)

1.1.2 Tecnología de maquinado

El maquinado no es solamente un proceso, sino una familia de procesos. La característica común es el uso de una herramienta de corte que forma una viruta, la cual se remueve de la pieza de trabajo. (Groover, 2007, p. 483)

Para realizar la operación, se requiere movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. Este movimiento relativo se logra por medio de un movimiento primario, llamado la velocidad de corte, y un movimiento secundario, denominado el avance. La forma de la herramienta y su penetración en la superficie del trabajo, combinada con estos movimientos, produce la forma deseada de la superficie resultante del trabajo. (Groover, 2007, p. 483)

1.1.3 Tipos de operaciones de maquinado

Hay muchas clases de operaciones de maquinado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta configuración geométrica y textura superficial. Los tres tipos más comunes son: torneado, taladrado y fresado, que se ilustran en la figura 1-3. (Groover, 2007, p. 483)

En el torneado se usa una herramienta de corte con un borde cortante simple destinado a remover material de una pieza de trabajo giratoria para dar forma a un cilindro, como se ilustra en la figura 3-1 a). El movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la pieza de trabajo giratoria y el movimiento de avance lo realiza la herramienta de corte, moviéndose lentamente en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo. (Groover, 2007, p. 483)

El taladrado se usa para crear un agujero redondo. Esto se realiza generalmente con una herramienta giratoria que tiene dos filos cortantes. La herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación dentro de la pieza de trabajo para formar el agujero redondo, como se ilustra en la figura 3-1 b). (Groover, 2007, p. 483)

En la figura 3-1, se ilustra los tres procesos de maquinado más comunes: a) torneado, b) taladrado y dos formas de fresado c) fresado periférico y d) fresado de frente. (Groover, 2007, p. 484)

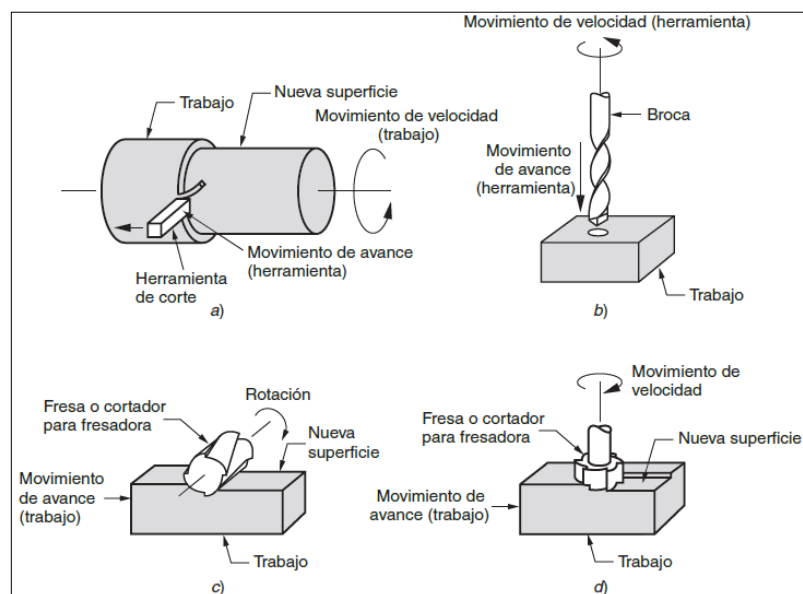


Figura 3-1: Procesos de maquinado comunes

Fuente: (Groover, 2007, p. 484)

En el fresado, una herramienta rotatoria con múltiples filos cortantes se mueve lentamente sobre el material para generar un plano o superficie recta. La dirección del movimiento de avance es perpendicular al eje de rotación. El movimiento de velocidad lo proporciona la fresa rotatoria.

Hay varias formas de fresado; las dos básicas son el fresado periférico y el fresado de frente, como se muestra en la figura 3-1 c) y d). (Groover, 2007, p. 484)

Otras operaciones convencionales del maquinado son perfilado, cepillado, escariado y aserrado. Asimismo, el esmerilado y operaciones abrasivas similares se incluyen con frecuencia en la categoría del maquinado. Estos procesos se utilizan para lograr acabados superficiales superiores. (Groover, 2007, p. 484)

1.1.4 La herramienta de corte

Una herramienta de corte tiene uno o más filos cortantes y está hecha de un material que es más duro que el de trabajo. El filo cortante sirve para separar una viruta del material de trabajo. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 103)

Ligadas al filo cortante hay dos superficies en la herramienta: la cara inclinada y el flanco o superficie de incidencia. La cara inclinada que dirige el flujo de la viruta resultante se orienta en cierto ángulo, llamado ángulo de inclinación α . El mismo se mide respecto a un plano perpendicular a la superficie de trabajo puede ser positivo o negativo. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 103)

El flanco de la herramienta provee un claro entre la herramienta y la superficie de trabajo recién generada; de esta forma protege a la superficie de la abrasión que pudiera degradar el acabado. Esta superficie del flanco o de incidencia se orienta en un ángulo llamado ángulo de incidencia o de relieve. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 103)

Hay dos tipos básicos de herramientas de corte cuyos ejemplos se ilustran en la figura 4-1: a) herramientas de una sola punta y b) herramientas de múltiples filos cortantes. Una herramienta de una sola punta tiene un filo cortante y se usa para operaciones como el torneado. Durante el maquinado la punta de la herramienta penetra bajo la superficie original del trabajo. La punta está generalmente redondeada llamado el radio de la nariz. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 103)

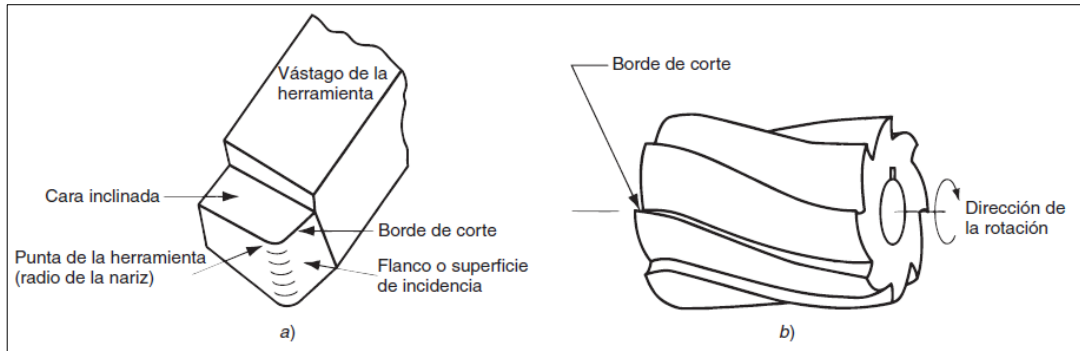


Figura 4-1: a) Herramienta de una sola punta y b) una fresa con bordes cortantes múltiples

Fuente: (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 103)

Las herramientas de múltiples filos cortantes tienen más de un borde de corte y generalmente realizan su movimiento respecto a la pieza de trabajo mediante rotación. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 105)

Las herramientas de una punta se usan en torneado, perforado, perfilado y cepillado. Las herramientas de bordes o múltiples filos cortantes se usan en taladro, rimado, roscado, fresado, escariado y aserrado. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 105)

1.1.4.1 Condiciones de corte

Al conjunto de velocidad, avance y profundidad de corte se le llama condiciones de corte, las cuales se ilustra en la figura 5-1 para herramientas de una sola punta. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 105)

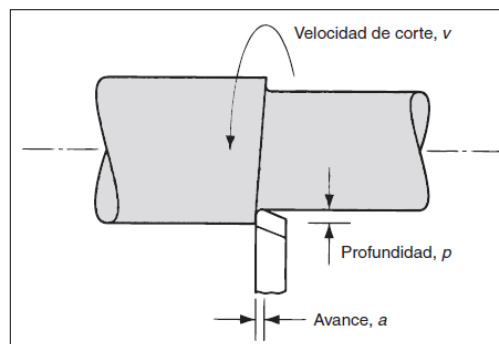


Figura 5-1: Condiciones de corte para una operación de torneado

Fuente: (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 117)

Las operaciones de maquinado se dividen normalmente en dos categorías, distinguidas por el propósito y las condiciones de corte: cortes para desbaste primario y cortes de acabado. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 117)

Los cortes para desbaste primario se usan para remover grandes cantidades de material de la pieza de trabajo inicial tan rápido como sea posible a fin de producir una forma cercana a la requerida, pero dejando algún material en la pieza para una operación posterior de acabado. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 120)

Los cortes de acabado se usan para completar la pieza y alcanzar las dimensiones finales, las tolerancias y el acabado de la superficie. En los trabajos de maquinado para producción se realizan uno o más cortes para desbaste, seguidos de uno o más cortes de acabado. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 120)

Las operaciones para desbaste se realizan a altas velocidades y profundidades; algunos de los avances típicos van de 0.4-1.25 mm/rev (0.015-0.050 in/rev) y profundidades típicas de 2.5-20 mm (0.100-0.750 in). (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 120)

Las operaciones de acabado se realizan a bajas velocidades de avance y a bajas profundidades; avances de 0.125-0.4 mm (0.005-0.015 in/rev) y profundidades de 0.75-2.0 mm (0.030-0.075 in) son típicas. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 120)

En la tabla 1-1 se indican los factores más importantes que influyen en un proceso de maquinado:

Tabla 1-1: Factores influyentes en las operaciones de maquinado

Parámetros	Influencia y relación
Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, fluidos de corte	Fuerzas, potencia, elevación de temperatura, vida útil de la herramienta, tipo de viruta, acabado e integridad superficial.
Ángulos de la herramienta	Influye en la dirección de flujo de la viruta; resistencia al desgaste y astillado de la herramienta.
Viruta continua	Buen acabado superficial; fuerzas estables de corte; indeseable, en particular en la maquinaria automatizada.
Viruta de borde acumulado o recrecido	Acabado e integridad superficial deficientes; si es delgada y estable, el borde acumulado puede proteger las superficies de la herramienta.
Viruta discontinua	Deseable para facilitar la disposición de la viruta; fuerzas fluctuantes de corte; puede afectar el acabado superficial y provocar vibración y traqueteo.
Elevación de la temperatura	Influye en la vida útil de la herramienta, en particular en la craterización y en la precisión dimensional de la pieza de trabajo; puede provocar daño térmico a la superficie de la pieza de trabajo.
Desgaste de la herramienta	Influye en el acabado e integridad superficial, la precisión dimensional, la elevación de la temperatura, las fuerzas y la potencia.

Maquinabilidad	Relacionada con la vida útil de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas y la potencia y el tipo de viruta.
----------------	--

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 610)

Realizado por: Nogales W, 2020

1.1.4.2 *Vida útil de las herramientas*

Hay tres formas posibles de falla en una herramienta de corte que pueden ocurrir durante la operación de maquinado:

1. **Falla por fractura.** Este modo ocurre cuando la fuerza de corte se hace excesiva en la punta de la herramienta, causando una falla repentina por fractura. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 104)
2. **Falla por temperatura.** Esta falla ocurre cuando la temperatura de corte es demasiado alta para el material de la herramienta, causando ablandamiento en la punta, deformación plástica y pérdida de filo en el borde. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 104)
3. **Desgaste gradual.** El desgaste gradual del borde cortante ocasiona pérdida de la forma de la herramienta, reducción en la eficiencia del corte, desgaste acelerado conforme la herramienta se deteriora demasiado y por último falla final de la herramienta en una manera similar a la falla por temperatura. (Rodríguez Montes, et al., 2006, p. 104)

1.1.5 *Tecnología de las herramientas de corte*

La tecnología de las herramientas de corte tiene dos aspectos principales: el material de la herramienta y la configuración geométrica de la herramienta. (UPV/EHU, 2019)

La primera se refiere al uso de materiales que puedan soportar las fuerzas, las temperaturas y la acción de desgaste en el proceso de maquinado. La segunda se ocupa de optimizar la configuración geométrica de la herramienta de corte para el material de la herramienta y para una operación dada. (UPV/EHU, 2019)

1.1.5.1 *Materiales para herramientas*

Tomando como base los modos de falla de la herramienta; las propiedades más importantes que deben poseer los materiales de las mismas son:

- Tenacidad (capacidad de absorber energía sin que falle el material).
- Dureza en caliente (capacidad del material para retener su dureza a altas temperaturas).
- Resistencia al desgaste (capacidad de resistir el desgaste abrasivo).

Desde el punto de vista comercial, los materiales para herramientas más importantes son los aceros de alta velocidad, los carburos cementados, cermet y carburos recubiertos. (UPV/EHU, 2019)

Tabla 2-1: Valores típicos de dureza a temperatura ambiente para herramientas de corte

Material	Dureza	Resistencia a la ruptura transversal	
		MPa	lb/in ²
Acero simple al carbono	60 HRC	5 200	750 000
Acero de alta velocidad	65 HRC	4 100	600 000
Aleación de fundición de cobalto	65 HRC	2 250	325 000
Carburo cementado (WC)			
Bajo contenido de Co	93 HRA, 1 800 HK	1 400	200 000
Alto contenido de Co	90 HRA, 1 700 HK	2 400	350 000
Cermet	2 400 HK	1 700	250 000
Alúmina	2 100 HK	400	60 000
Nitruro cúbico de boro	5 000 HK	700	100 000
Diamante policristalino	6 000 HK	1 000	150 000
Diamante natural	8 000 HK	1 500	215 000

Fuente: (UPV/EHU, 2019)

Realizado por: Nogales W, 2020

El desarrollo cronológico de los materiales de herramienta ha seguido, en general, una trayectoria en la cual los nuevos materiales han permitido ir alcanzando velocidades de corte cada vez más altas. (UPV/EHU, 2019)

Tabla 3-1: Velocidades de corte permisibles para materiales de herramientas

Material de herramienta	Año de uso inicial	Velocidad permisible de corte ^a			
		Corte sin acero		Corte con acero	
		m/min	ft/min	m/min	ft/min
Acero para herramienta simple al carbono	1800	Debajo de 10	Debajo de 30	Debajo de 5	Debajo de 15
Acero de alta velocidad	1900	25-65	75-200	17-33	50-100
Aleaciones de fundición de cobalto	1915	50-200	150-600	33-100	100-300
Carburos cementados	1930	330-650	1 000-2 000	100-300	300-900
Cermets	1950			165-400	500-1 200
Cerámicos	1955			330-650	1 000-2 000
Diamantes sintéticos	1954, 1973	390-1 300	1 200-4 000		
Nitruro de boro cúbico	1969			500-800	1 500-2 500
Carburos recubiertos	1970			165-400	500-1 200

Fuente: (UPV/EHU, 2019)

Realizado por: Nogales W, 2020

Los aceros de alta velocidad (HSS, por sus siglas en inglés) son aceros de herramienta altamente aleados, capaces de mantener su dureza a elevadas temperaturas mejor que los aceros de baja aleación y alto contenido de carbono. (UPV/EHU, 2019)

Su buena dureza en caliente permite el uso de estas herramientas a velocidades de corte más altas. Al compararlos con los materiales para herramienta usados antes de su creación, se merecieron el nombre de “alta velocidad”. (UPV/EHU, 2019)

Se dispone de una amplia variedad de aceros de alta velocidad, pero se pueden dividir en dos tipos básicos: tipo tungsteno, designados como grado-T por el AISI; y el de molibdeno, designados como grado M por el AISI. (UPV/EHU, 2019)

1.1.5.2 Configuración geométrica de las herramientas de una punta

La herramienta de corte debe tener una forma apropiada para las aplicaciones de maquinado. En la figura 6-1 se muestra un diagrama detallado de una herramienta de punta sencilla: a) los siete elementos de la configuración geométrica de una herramienta de una punta y b) la forma convencional de la herramienta. Por ejemplo, una herramienta de una punta que se usa en torneado debe tener la siguiente firma: 5, 5, 7, 7, 20, 15, 2/64 in. (Groover, 2007, p. 559)

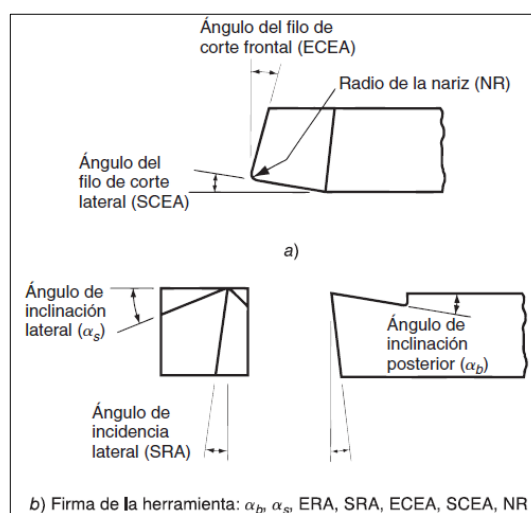


Figura 6-1: Configuración geométrica de una herramienta de punta

Fuente: (Groover, 2007, p. 558)

La eliminación de la viruta es un problema que se encuentra frecuentemente en torneado y otras operaciones continuas representando un peligro para el operador y el acabado de la pieza. Por

eso, se usan rompe virutas junto con las herramientas de una punta; de esta forma se fuerza a la viruta a enrollarse más cerradamente de lo normal, causando su fractura. (Groover, 2007, p. 559)

Existen formas alternas para sostener y presentar el filo de corte de una herramienta de una sola punta véase la figura 7-1. La configuración geométrica de una herramienta de acero de alta velocidad se talla sobre una espiga sólida, como se muestra en el inciso a de la figura 7-1 a). (Groover, 2007, p. 560)

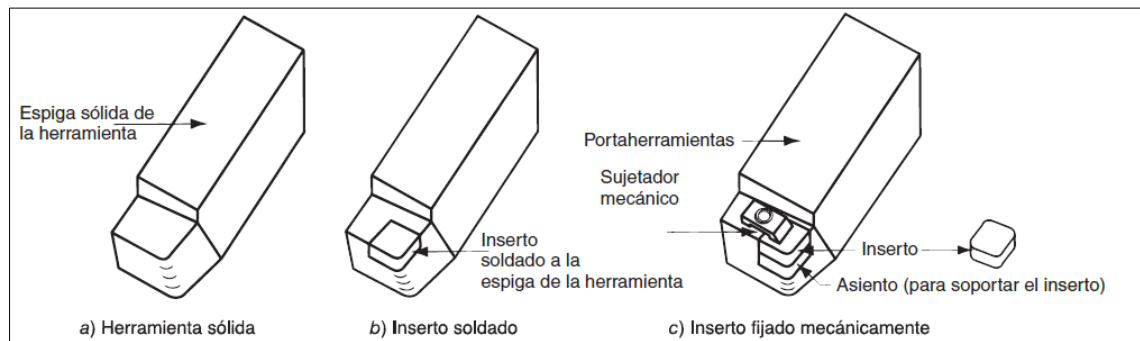


Figura 7-1: Formas para sostener y presentar el borde de corte de una herramienta

Fuente: (Groover, 2007, p. 560)

El costo más alto, las diferencias en las propiedades y los procesamientos de los materiales más duros para herramientas han dado lugar al uso de insertos soldados o adheridos mecánicamente a un portaherramientas. El inciso 7-1 b) muestra un inserto de carburo cementado soldado a una espiga de herramienta. La espiga está hecha de acero para herramienta a fin de proveer resistencia y tenacidad. El inciso 7-1 c) ilustra un posible diseño para sostener mecánicamente un inserto en un portaherramientas. Se usa la sujeción mecánica para carburos cementados, cerámicos y otros materiales duros. (Groover, 2007, p. 560)

Las formas comunes de insertos que se utilizan en las operaciones de torneado se muestran en la figura 8-1: a) redondos, b) cuadrados, c) rombos con dos ángulos de 80° , d) hexágono con tres ángulos de 80° , e) triángulo (equilátero), f) rombo con dos ángulos de 55° , g) rombo con dos ángulos de 35° . Asimismo, se muestran las características típicas de su configuración geométrica. (Groover, 2007, p. 561)

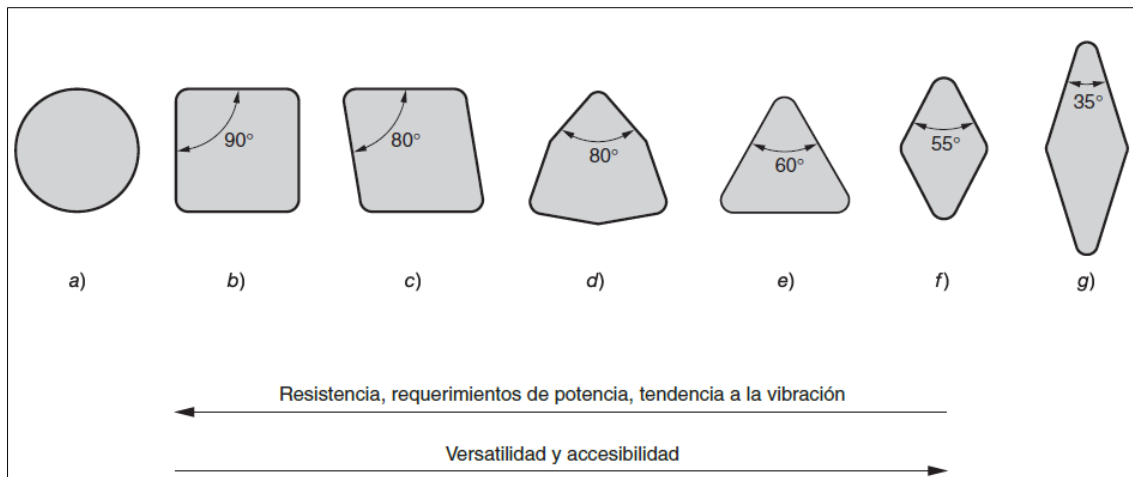


Figura 8-1: Formas comunes de insertos

Fuente: (Groover, 2007, p. 561)

Los insertos para las herramientas de corte se utilizan ampliamente en el maquinado debido a que son económicos y adaptables a muchos tipos diferentes de operaciones de maquinado: el torneado, perforado, roscado, fresado e incluso taladrado. (Groover, 2007, p. 561)

1.1.6 Fluidos para corte

Un fluido para corte es un líquido o gas que se aplica directamente a la operación de maquinado para mejorar el desempeño del corte. (Antonio, 2019)

Los dos problemas principales que atienden los fluidos para corte son: 1) la generación de calor en las zonas de corte y fricción y 2) fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo. (Antonio, 2019)

Además de la remoción del calor y la reducción de la fricción, los fluidos para corte brindan beneficios adicionales como: lavado de las virutas (especialmente en esmerilado y fresado), reducción de la temperatura de la pieza de trabajo para un manejo más fácil, disminuir las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia, mejorar la estabilidad dimensional de la pieza de trabajo y optimizar el acabado superficial. (Antonio, 2019)

De acuerdo con los dos principales problemas de los fluidos para corte, estos se pueden categorizar de forma general en: refrigerantes y lubricantes. (Antonio, 2019)

Los refrigerantes son fluidos para corte diseñados para reducir los efectos del calor en las operaciones de maquinado. Extraen el calor que se genera; de esta manera se reduce la

temperatura de la herramienta y de la pieza de trabajo, y ayuda a prolongar la vida de la herramienta de corte. (Antonio, 2019)

Los fluidos para corte tipo refrigerante parecen ser más efectivos a velocidades de corte relativamente altas, donde la generación del calor y las altas temperaturas son un problema. Por lo general, los refrigerantes son soluciones o emulsiones en agua debido a que ésta tiene propiedades térmicas ideales en estos fluidos para corte. (Antonio, 2019)

Los lubricantes son fluidos basados generalmente en aceite (por sus buenas propiedades lubricantes), formulados para reducir la fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo. (Antonio, 2019)

Los fluidos lubricantes de corte operan por lubricación de presión extrema, una forma especial de lubricación que involucra la formación de una capa delgada de sales sólidas sobre la superficie caliente y limpia del material a través de reacciones químicas con el lubricante. Los compuestos de azufre, cloro y fósforo del lubricante causan la formación de estas capas superficiales, que actúan para separar las dos superficies metálicas (es decir, de la viruta y de la herramienta). (Antonio, 2019)

Los fluidos para procesos de corte tipo lubricante son más efectivos a velocidades bajas de corte; tienden a perder su efectividad a altas velocidades (arriba de aproximadamente 120 mm/min, 400 ft/min), debido a que el movimiento de la viruta a estas velocidades previene que el fluido para corte alcance la interfaz herramienta-viruta. Las operaciones de maquinado como el taladrado y el roscado se benefician por lo general de los lubricantes. (Antonio, 2019)

1.1.6.1 Aplicación de los fluidos para corte

Los fluidos para corte se aplican a las operaciones de maquinado en varias formas. El método más común es la inundación, llamada algunas veces enfriamiento por inundación, debido a que se usa generalmente con fluidos de enfriamiento. En este método se dirige una corriente constante del fluido hacia la interfaz herramienta-trabajo o herramienta-viruta de la operación de maquinado. (Antonio, 2019)

Un segundo método consiste en la aplicación de niebla, usada principalmente en fluidos para corte basados en agua. En este método se dirige el fluido hacia la operación en forma de niebla acarreada a alta velocidad por una corriente de aire presurizado. (Antonio, 2019)

Se usa la aplicación manual del fluido de corte por medio de una aceitera o brocha para aplicar lubricantes en operaciones de roscado, y otras donde las velocidades de corte son bajas y la fricción es un problema. (Antonio, 2019)

Los fluidos para corte se contaminan al cabo del tiempo con una variedad de sustancias extrañas. Además de causar malos olores y riesgos a la salud, los fluidos para corte contaminados no desempeñan sus funciones de forma eficiente. Algunas alternativas para manejar este problema son las siguientes: reemplazar el fluido a intervalos regulares, usar un sistema de filtración y maquinar en seco. (Antonio, 2019)

1.1.6.2 Tipos de virutas producidos en el corte de metales

En la figura 9-1 se muestran los tipos de virutas metálicas que pueden encontrarse en la práctica. Entre los cuales se pueden distinguir cuatro tipos básicos de viruta:

- **Viruta discontinua.** *Cuando se maquinan materiales relativamente frágiles a bajas velocidades de corte, la viruta se forma frecuentemente en segmentos separados (a veces los segmentos están unidos sin cohesión). Esto tiende a impartir una textura irregular a la superficie maquinada. Una alta fricción herramienta-viruta y los avances y profundidades grandes de corte promueven la formación de este tipo de viruta.* (Groover, 2007, p. 489)
- **Viruta continua.** *Cuando se cortan materiales de trabajo dúctiles a velocidades altas con avances y profundidades pequeños, se forman virutas largas y continuas. Cuando se forma este tipo de viruta se obtiene un buen acabado de la superficie. Un borde cortante bien afilado en la herramienta y una baja fricción herramienta-viruta propician la formación de virutas continuas.* (Groover, 2007, p. 489)

Virutas continuas y largas (como en el torneado) pueden generar problemas respecto al desecho de la misma o enredarse. Para solucionar esto, las herramientas de torneado a menudo están equipadas con separadores de viruta. (Groover, 2007, p. 490)

- **Viruta continua con acumulación en el borde.** *Cuando se maquinan materiales dúctiles a velocidades bajas o medias de corte, la fricción entre la herramienta y la viruta tiende a causar la adhesión de porciones de material de trabajo en la cara inclinada de la herramienta cerca del filo cortante. Esta formación se llama acumulación en el borde (BUE).* (Groover, 2007, p. 490)

La formación de BUE es de naturaleza cíclica; se forma y crece, luego se vuelve inestable y se rompe. Gran parte de la acumulación de BUE se la lleva la viruta, a veces llevándose porciones de la cara inclinada de la herramienta con ella, lo cual reduce el tiempo de vida útil de la misma. Sin embargo, algunas porciones del BUE pueden incorporarse a la

superficie de trabajo recién formada, ocasionando que la superficie se vuelva rugosa. (Groover, 2007, p. 490)

- **Viruta dentada o corte localizado.** Estas virutas son semicontinuas en el sentido de que poseen una apariencia de diente de sierra que se produce por una formación cíclica de viruta de alta resistencia alternativa al corte, seguida de una baja. (Groover, 2007, p. 490)

Este tipo de viruta está asociado más cercanamente con ciertos metales difíciles de maquinarse, tales como las aleaciones de titanio, superaleaciones a base de níquel y aceros inoxidables austénicos cuando se maquinan a velocidad de corte elevadas. Sin embargo, dicho fenómeno también sucede en metales de trabajo comunes (por ejemplo, aceros) cuando éstos se cortan a altas velocidades. (Groover, 2007, p. 490)

En la figura 9-1 se ilustra los cuatro de tipos de virutas más comunes:

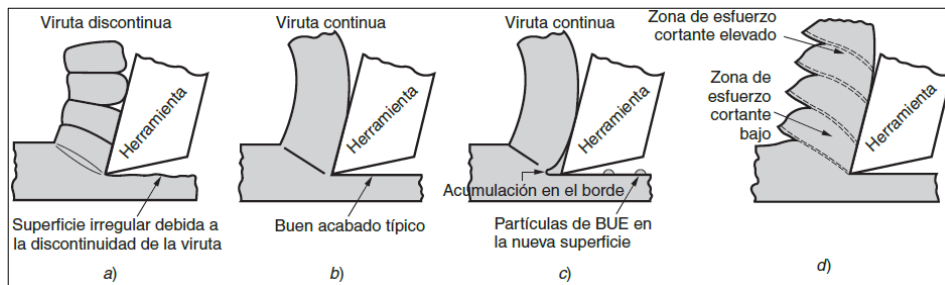


Figura 9-1: Tipos: a) discontinua, b) continua, c) acumulación en el borde, y d) dentada

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 610)

1.1.7 Máquinas herramienta

El término máquina herramienta se aplica a cualquier máquina accionada por fuerza motriz que realice operaciones de maquinado, incluso el esmerilado. (Groover, 2007, p. 486)

Se usa para sostener la pieza de trabajo, poner en posición la herramienta respecto al trabajo y proporcionar la potencia para el proceso de maquinado a la velocidad, avance y profundidad que se han establecido. El control de la herramienta, de las condiciones de corte, del trabajo y de la máquina herramienta permite fabricar piezas con gran precisión y repetitividad a tolerancias de 0.025 mm (0.001 in) o mejores. (EcuRed, 2019)

Las máquinas herramientas usadas tradicionalmente para realizar operaciones de torneado, taladrado y fresado son los tornos, prensas taladradoras y máquinas fresadoras, respectivamente. (EcuRed, 2019)

Las máquinas herramienta convencionales las maneja usualmente un operador, quien carga y descarga las piezas de trabajo, cambia las herramientas de corte y establece las condiciones de corte. Muchas de las máquinas herramienta modernas están frecuentemente diseñadas para realizar sus procesos con un alto grado de automatización, conocido como control numérico por computadora (CNC). (EcuRed, 2019)

La potencia unitaria y la energía específica de una máquina herramienta proporcionan una medida útil de cuánta potencia (o energía) se requiere para remover una pulgada cúbica de metal durante el maquinado. Utilizando dicha medida, es posible comparar los diferentes materiales de trabajo en términos de sus requerimientos de potencia y energía. (Groover, 2007, p. 496)

En la tabla 4-1 se muestra los valores de caballos de fuerza unitarios y energía específica para materiales de trabajos seleccionados, usando herramientas de corte afiladas y un espesor de la viruta antes del corte $t_o = 0.25$ mm (0.010 in). (Groover, 2007, p. 497)

Tabla 4-1: Valores de potencia y energía para determinados materiales de trabajo

Material	Dureza Brinell	Energía específica U o potencia unitaria P_u		Caballos de fuerza unitaria en HP_u hp/(in ³ /min)
		N-m/mm ³	in-lb/in ³	
Acero al carbono	150-200	1.6	240 000	0.6
	201-250	2.2	320 000	0.8
	251-300	2.8	400 000	1.0
Aceros aleados	200-250	2.2	320 000	0.8
	251-300	2.8	400 000	1.0
	301-350	3.6	520 000	1.3
	351-400	4.4	640 000	1.6
Hierros fundidos	125-175	1.1	160 000	0.4
	175-250	1.6	240 000	0.6
Acero inoxidable	150-250	2.8	400 000	1.0
Aluminio	50-100	0.7	100 000	0.25
Aleaciones de aluminio	100-150	0.8	120 000	0.3
Latón	100-150	2.2	320 000	0.8
Bronce	100-150	2.2	320 000	0.8
Aleaciones de magnesio	50-100	0.4	60 000	0.15

Fuente: (Groover, 2007, p. 497)

Realizado por: Nogales W, 2020

Como una guía aproximada, los valores en la tabla deben multiplicarse por un factor entre 1.00 y 1.25, dependiendo del grado de uso de la herramienta. Para herramientas afiladas el factor es 1.00. Para herramientas casi completamente usadas en operaciones de acabado el factor es alrededor de 1.10, y para herramientas casi completamente usadas en operaciones de desbaste primario el factor es de 1.25. (Groover, 2007, p. 497)

En la figura 10-1 se proporciona los valores de este factor de corrección en función a t_o . Los caballos de fuerza unitarios y la energía específica de la tabla 1-4 deben multiplicarse por el factor apropiado de corrección cuando t_o sea diferente a 0.25 mm (0.010 in). (Groover, 2007, p. 497)

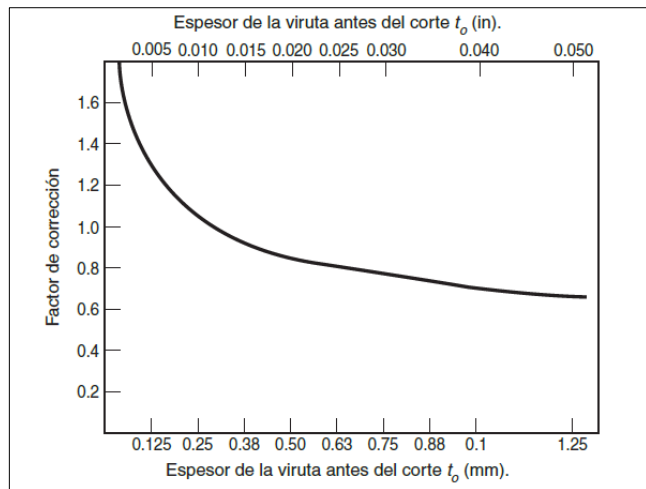


Figura 10-1: Factor de correlación cuando $t_o > 0.25$ mm (0.010in)

Fuente: (Groover, 2007, p. 498)

1.1.8 Temperatura de corte

Casi toda la energía que se consume en el maquinado (aproximadamente 98%) es convertida en calor. Este calor puede hacer que las temperaturas sean muy altas en la interfaz herramienta-viruta; arriba de los 600°C (1100°F) es muy común. La energía restante (alrededor de 2%) se retiene como energía elástica en la viruta. (Groover, 2007, p. 498)

La temperatura es un factor muy importante en el maquinado por sus principales efectos adversos:

- La temperatura excesiva reduce la resistencia, la dureza, la rigidez y la resistencia al desgaste de la herramienta; las herramientas también se pueden reblandecer y sufrir deformación plástica, alterando de esta manera su forma. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 623)
- El aumento de calor provoca cambios dimensionales desequilibrados en la parte que se está maquinando, lo que dificulta el control de su precisión dimensional y de sus tolerancias. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 624)
- La elevación excesiva de temperatura puede ocasionar daños térmicos y cambios metalúrgicos en la superficie maquinada, afectando de manera adversa sus propiedades. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 624)

1.2 Torneado

El torneado es un proceso de maquinado en el cual una herramienta de una sola punta remueve material de la superficie de una pieza de trabajo cilíndrica en rotación; la herramienta avanza linealmente y en una dirección paralela al eje de rotación, como se ilustra en la figura 11-1. (Vásquez, 2015)

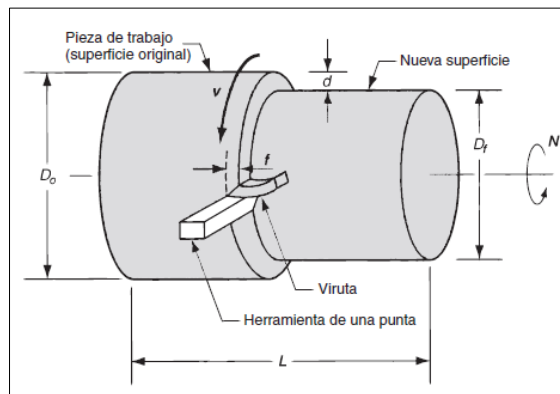


Figura 11-1: Operación de torneado

Fuente: (Vásquez, 2015)

Se lleva a cabo tradicionalmente en una máquina herramienta llamada torno, la cual suministra la potencia para tornear la pieza a una velocidad de rotación determinada con un avance de la herramienta y profundidad de corte especificados. (Vásquez, 2015)

1.2.1 Condiciones de corte en el torneado

La velocidad de rotación en el torneado se relaciona con la velocidad de corte requerida en la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo. (Vásquez, 2015)

Se expresará con la siguiente ecuación:

$$N = \frac{v}{D_o} \quad (1-1)$$

Donde:

N : Velocidad de rotación (rev/min)

v : Velocidad de corte (m/min; ft/min)

D_o : Diámetro original de la pieza (m; ft)

La operación de torneado reduce el diámetro del trabajo D_o al diámetro final D_f . El cambio de diámetro se determina por la profundidad de corte d . (Vásquez, 2015)

Se puede expresar como:

$$D_f = D_o - 2 * d \quad (2-1)$$

El avance en el torneado se expresa generalmente en mm/rev (in/rev). Este avance se puede convertir a velocidad de avance lineal en mm/min (in/min). (Vásquez, 2015)

Se interpreta mediante la ecuación:

$$f_r = N * f \quad (3-1)$$

Donde:

f_r : Velocidad de avance (mm/min; in/min)

f : Avance (mm/rev; in/rev)

El tiempo para maquinar una pieza de trabajo cilíndrica de un extremo a otro está dado por:

$$T_m = \frac{L}{f_r} \quad (4-1)$$

Donde:

T_m : Tiempo de maquinado (min)

L : Longitud de la pieza cilíndrica en (mm; in)

Un cálculo más directo del tiempo de maquinado lo proporciona la ecuación siguiente:

$$T_m = \frac{\pi * D_o * L}{f * v} \quad (5-1)$$

Como práctica general, se añade una pequeña distancia a la longitud al principio y al final de la pieza de trabajo para dar margen a la aproximación y al sobrerrecorrido de la herramienta. (Vásquez, 2015)

La velocidad volumétrica de remoción del material se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$R_{MR} = v * f * d \quad (6-1)$$

Donde:

R_{MR} : Velocidad de remoción de material (mm³/s; in³/min)

En la ecuación (6-1) las unidades de f se expresan simplemente como mm (in), ignorando el efecto de la rotación del torneado. Asimismo, se debe tomar las medidas necesarias para asegurarse de que las unidades de la velocidad sean consistentes con las de v y d . (Vásquez, 2015)

Además del torneado, se puede realizar una gran variedad de operaciones de maquinado en un torno como se ilustran en la figura 12-1: a) careado, b) torneado ahusado, c) torneado de contornos, d) torneado de formas, e) achaflanado, f) tronzado, g) roscado, h) perforado, i) taladrado y j) moleteado. (Groover, 2007, p. 511)

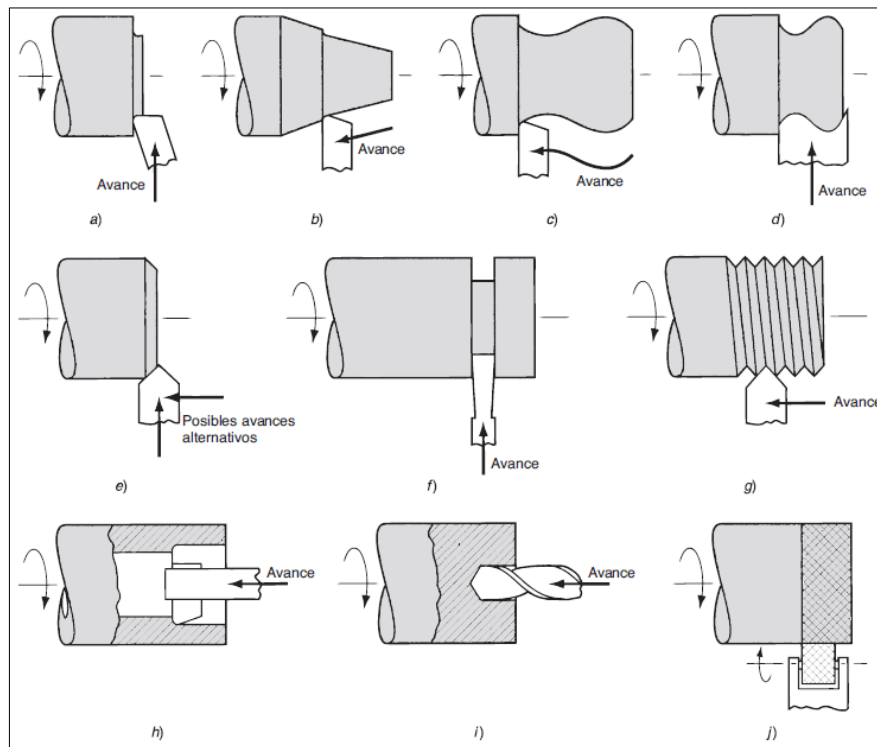


Figura 12-1: Otras operaciones diferentes al torneado que se realizan en un torno

Fuente: (Groover, 2007, p. 511)

Las herramientas de corte para el torneado, careado, ahusado, contorneado, chaflanado y perforado son de una sola punta. Una operación de roscado se ejecuta usando una herramienta plana sencilla, diseñada con la forma de la cuerda a producir. (Vásquez, 2015)

1.2.2 Control numérico

El control numérico (CN) es una forma de automatización programable en la cual un programa que contiene datos alfanuméricos codificados controla las acciones de una parte de la máquina herramienta. (De Máquinas y Herramientas, 2011)

Los datos representan posiciones relativas entre una cabeza de trabajo y una pieza de trabajo. La cabeza de trabajo representa una herramienta u otro elemento de procesamiento y la pieza de trabajo es el objeto que se procesa. (De Máquinas y Herramientas, 2011)

Un sistema de control numérico tiene tres componentes básicos: 1) un programa de piezas, 2) una unidad de control de máquina y 3) el equipo de procesamiento. (Groover, 2007, p. 599)

El programa de piezas es el conjunto detallado de comandos que va a seguir el equipo de procesamiento. Cada comando especifica una posición o movimiento que realizará la cabeza de trabajo en relación con el objeto procesado. (Groover, 2007, p. 599)

En la tecnología moderna de CN, la unidad de control de máquina (MCU) es una microcomputadora que almacena el programa y lo ejecuta, convirtiendo cada comando en acciones mediante el equipo de procesamiento, un comando a la vez. La MCU está constituida por el hardware y el software. (Groover, 2007, p. 599)

Debido a que la MCU es una computadora, se usa el término control numérico por computadora (CNC) para diferenciar este tipo de CN de las tecnologías que le precedieron, las cuales se basaban por completo en dispositivos electrónicos incorporados. (Groover, 2007, p. 599)

El equipo de procesamiento realiza una secuencia de pasos para transformar la pieza de trabajo inicial en una pieza terminada, y funciona bajo el control de la unidad de la máquina herramienta de acuerdo con el conjunto de instrucciones que contiene el programa de piezas. (Groover, 2007, p. 599)

Para especificar las posiciones en el CNC se usa un sistema de ejes de coordenadas estándar, el cual se indica en la figura 13-1.

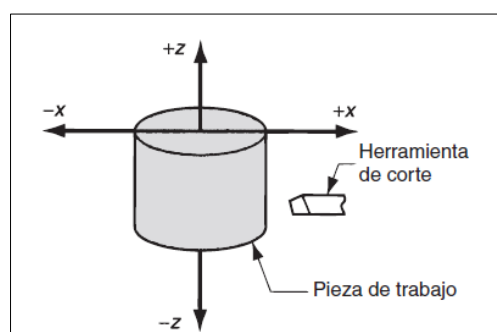


Figura 13-1: Sistema de coordenadas usado en trabajo rotatorio

Fuente: (Groover, 2007, p. 890)

1.2.2.1 Torno CNC

El Torno CNC (figura 14-1) es una máquina herramienta de maquinado, operada mediante el control numérico de un ordenador, el cual está incorporado dentro de él. El control numérico se basa en un sistema de lenguaje que se comunica a través de la emisión de "códigos", que no es más que un sistema de comunicación de tipo alfanumérico empleado en máquinas sofisticadas. (De Máquinas y Herramientas, 2011)



Figura 14-1: Torno CNC Lathe modelo CK6136A-2

Fuente: Nogales W, 2020

Los tornos CNC son muy versátiles ya que realizan funciones de taladrado y giros. Estos últimos, revolucionaron el mercado porque han facilitado la realización de cortes horizontales, verticales, curvos, los cuales anteriormente tomaban muchas horas de realización para los operadores. (De Máquinas y Herramientas, 2011)

Un centro de mecanizado es una máquina altamente automatizada capaz de realizar múltiples operaciones de maquinado en una instalación bajo CNC con la mínima intervención humana. Las operaciones típicas son aquellas que usan herramientas de corte rotatorio, como los cortadores y las brocas. El éxito de los centros de mecanizado CNC ha conducido al desarrollo de centros de torneado CNC. (De Máquinas y Herramientas, 2011)

Un centro de torneado CNC moderno es capaz de desempeñar varias operaciones de torneado y operaciones relacionadas, torneado de contorno y secuenciado automático de herramientas, todas bajo control computarizado. Además, los centros de torneado sofisticado pueden realizar: 1) calibrado de piezas de trabajo (verificación de las dimensiones clave después del maquinado), 2) monitoreo de las herramientas (sensores que indican cuando las herramientas están desgastadas), 3) cambio automático de herramientas cuando se desgastan, y además 4) cambio automático de piezas de trabajo al final de cada ciclo. (Groover, 2007, p. 529)

1.2.3 Estructura de un programa CNC

El programa CNC también denominado código G, debe tener un nombre o un número de identificación, hay ocasiones que algunos controles numéricos solo aceptan números. (Visbal, 2013)

Los programas CNC está conformado por bloques secuenciales (figura 15-1) cada uno de estos con distintas instrucciones para el control. La numeración de los bloques no solamente puede ser enumerados de uno en uno también pueden ser de cinco en cinco o de diez en diez. Esto es conveniente para luego introducir bloques intermedios sin que afecte toda la numeración. (Visbal, 2013)

La numeración debe ser siempre de manera creciente, si existe un bloque luego de la secuencia se lo enumera con un valor menor que el anterior caso contrario de inmediato se detiene la ejecución del programa. (Visbal, 2013)

Para la cual, dentro de cada bloque debe mantenerse ese orden. Sin embargo, no es necesario que estén presentes todos los ítems. La programación puede ser tanto en sistema métrico (mm) o en pulgadas. (Visbal, 2013)



Figura 15-1: Estructura de un código G

Fuente: (Universidad Nacional de la Plata, 2017)

1.3 Acabado superficial

El termino acabado superficial se refiere al grado de acabado que presentan las piezas después de haber terminado su proceso de manufactura. (Universidad de la Coruña, 2019)

1.3.1 Tolerancias y acabado superficial

En cualquier proceso de manufactura existe variabilidad y las tolerancias se usan para establecer los límites permisibles de esa variación. Los valores comunes de estas tolerancias que se trabajan en una operación de torneado se indican en la tabla 5-1. (Universidad de la Coruña, 2019)

Tabla 5-1: Valores de tolerancias típicas y rugosidades superficiales (torneado)

Operación de maquinado	Capacidad de tolerancia-Típica		Rugosidad superficial AA-Típica	
	mm	in	μ m	μ-in
Torneado			0.8	32
Diámetro D < 25 mm	± 0.025	± 0.001		
25 mm < D < 50 mm	± 0.05	± 0.002		
Diámetro D > 25 mm	± 0.075	± 0.003		

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 577)

Realizado por: Nogales W, 2020

1.3.2 Acabado superficial en una operación de torneado

Para determinar matemáticamente la rugosidad de una superficie de una operación de torneado se puede emplear la siguiente ecuación que también puede aplicarse al perfilado y cepillado. (Groover, 2007, p. 580)

$$R_i = \frac{f^2}{32NR} \quad (7-1)$$

Donde:

R_i : Media aritmética teórica de la rugosidad superficial, mm (in)

f : = Avance, mm (in)

NR : Radio de la nariz en la punta de la herramienta, mm (in)

La ecuación (7-1) supone que el radio de la nariz no es cero y que el avance y el radio de la nariz serán los factores principales que determinen la geometría de la superficie. (Groover, 2007, p. 580)

El procedimiento para predecir la rugosidad superficial real en una operación de maquinado es calcular el valor de la rugosidad superficial ideal y después multiplicar este valor por la relación entre la rugosidad real e ideal, esto dependerá del material de trabajo. (Groover, 2007, p. 580)

Esto se puede expresar como:

$$R_a = r_{ai} * R_i \quad (8-1)$$

Donde:

R_a : Valor estimado de la rugosidad real

r_{ai} : Relación del acabado superficial real e ideal

1.3.3 Estructura e integridad estructural

Por lo general al examinar la superficie de una pieza de trabajo metálica, esta consta de varias capas:

1. El metal interior o de volumen (también conocido como substrato metálico) tiene una estructura que depende de la composición y la historia de procesamiento del metal. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1037)
2. *Arriba de este substrato metálico se encuentra una capa, que por lo común ya ha sido deformada plásticamente y endurecida por trabajo, en mayor medida que el volumen durante el proceso de manufactura. La profundidad y las propiedades de la capa endurecida por trabajo (estructura superficial) depende de factores como el método de procesamiento utilizado y la cantidad de deslizamiento por fricción a la que se somete la superficie. Por ejemplo, si ésta se produce por maquinado mediante una herramienta sin filo y desgastada, o se rectifica con un disco de rectificado sin filo, la capa será un tanto gruesa y por lo general tendrá esfuerzos residuales.* (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1037)
3. *A menos que el metal se procese y mantenga en un ambiente inerte (libre de oxígeno) o sea un metal noble (como el oro o platino), se forma una capa de óxido sobre la capa endurecida por trabajo. Por lo común, el óxido en una superficie metálica es mucho más duro que el metal base, de ahí que sea más abrasivo.* (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1037)

En consecuencia, tiene efectos importantes sobre la fricción, el desgaste y la lubricación, por ejemplo:

- El aluminio tiene una capa densa, amorfa (sin estructura cristalina) de Al_2O_3 con una capa gruesa, porosa e hidratada de óxido de aluminio sobre ésta. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1037)
 - El cobre tiene una superficie brillante, resplandeciente cuando se acaba de rayar o maquinar. Sin embargo, poco después desarrolla una capa de Cu_2O , la cual se cubre con una capa de CuO . Esto proporciona al cobre su color un tanto deslustrado. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1037)
4. En condiciones ambientales normales, las capas superficiales de óxido se cubren generalmente con capas adsorbidas de gas y humedad. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1037)
 5. Por último, la superficie extrema del metal puede cubrirse con contaminantes como suciedad, polvo, grasa, residuos de lubricante, residuos de compuestos para limpieza y contaminantes ambientales. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1037)

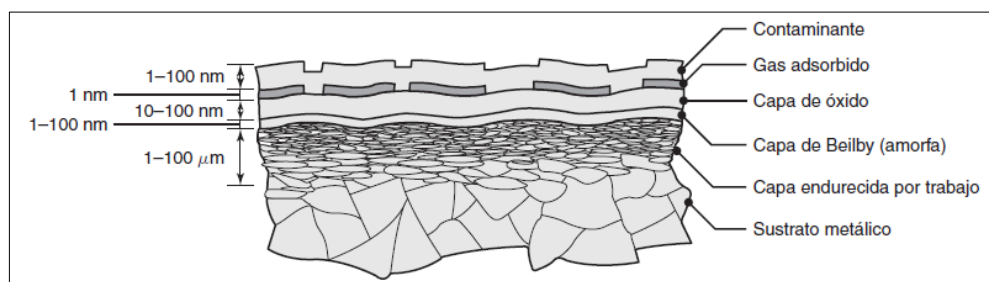


Figura 16-1: Esquema de una sección transversal de la estructura superficial metálica

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1037)

1.3.4 *Integridad superficial*

La integridad superficial describe no sólo los rasgos topológicos (geométricos) de las superficies y sus propiedades físicas y químicas, sino también sus propiedades mecánicas y metalúrgicas. (Universidad de la Coruña, 2019)

La integridad superficial es un factor que debe considerarse en las operaciones de manufactura, debido a que influye en muchas propiedades como resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión y vida útil. (Universidad de la Coruña, 2019)

Diversos defectos superficiales producidos durante la manufactura de componentes pueden ser responsables de que la integridad superficial sea inapropiada. Por lo regular, son causados por una combinación de factores como: (a) defectos en el material original; (b) el método por el que

se produce la superficie, y (c) la falta de control apropiado de los parámetros del proceso (que pueden producir excesivos esfuerzos, temperaturas o deformación superficial. (Universidad de la Coruña, 2019)

A continuación, se definirá los efectos superficiales principales que se encuentran en la práctica:

- **Ataque intergranular:** es el debilitamiento de los límites de los granos debido a la fragilización y corrosión líquido-metal. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1038)
- **Cráteres:** son depresiones profundas.
- **Deformación plástica superficial:** es una deformación superficial severa causada por altos esfuerzos debido a factores como fricción, geometría de los herramientales y matrices, herramientas desgastadas y métodos de procesamiento. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1038)
- **Esfuerzos residuales** (tensión o compresión) en la superficie: se producen por la deformación irregular y la distribución no uniforme de la temperatura. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1038)
- **Grietas:** pueden ser externas o internas; las grietas que requieren una amplificación de 10x o más para poder verse a simple vista se conocen como microgrietas. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1038)
- **Inclusiones:** son elementos o compuestos pequeños, no metálicos, en el material.
- **Picaduras:** son depresiones superficiales profundas, por lo general debido a algún ataque químico o físico. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1038)
- **Salpicadura:** son pequeñas partículas metálicas, fundidas y resolidificadas, que se depositan en una superficie, como durante la soldadura.
- **Transformaciones metalúrgicas:** comprenden cambios microestructurales provocados por los ciclos de temperatura del material; éstos pueden consistir en transformaciones de fase, recristalización, agotamiento de la aleación, descarburado, material fundido y refundido, resolidificado o redepositado. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1038)
- **Traslapes, pliegues y costuras:** son defectos superficiales resultantes del solapamiento de material durante el procesamiento. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1038)
- **Zona afectada por el calor:** es la parte de un metal que se somete a ciclos térmicos sin fundirse.

1.3.5 Textura y rugosidad superficial

Sin importar el método de producción, todas las superficies tienen características que, en conjunto, se conocen como textura superficial. Aunque la descripción de textura superficial como propiedad geométrica es compleja, se han establecido ciertos lineamientos para identificarla en términos de cantidades bien definidas y cuantificables (figura 17-1). (Universidad de la Coruña, 2019)

Lineamientos comunes usados para describir la textura superficial:

- Las **imperfecciones** o **defectos** son irregularidades aleatorias, como raspaduras, grietas, orificios, depresiones, costuras, desgarramientos o inclusiones. (Universidad de la Coruña, 2019)
- La **direccionalidad** o **sesgo** es la dirección del modelo superficial predominante, por lo general perceptible a simple vista. (Universidad de la Coruña, 2019)
- 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. (Universidad de la Coruña, 2019)
- 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 (anchura de ondulación) y la altura entre las crestas y valles de las ondas (altura de ondulación). (Universidad de la Coruña, 2019)

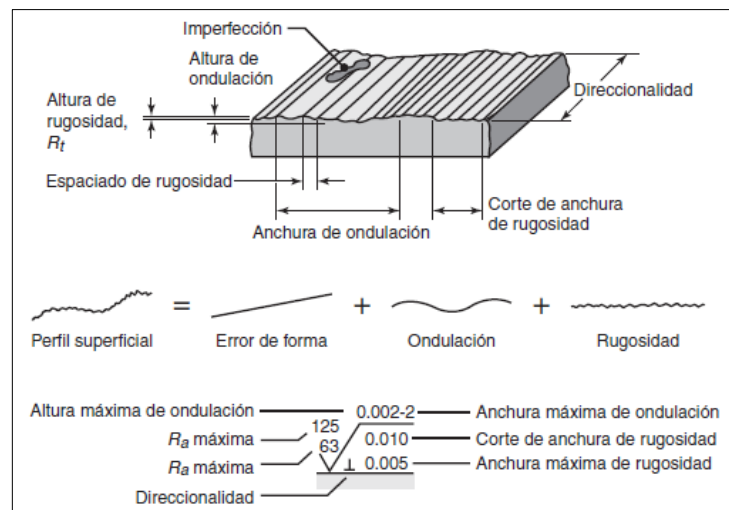


Figura 17-1: Terminología y símbolos estándar del acabado superficial (μin)

Fuente: (Universidad de la Coruña, 2019)

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 1-18. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1040). Se puede expresar como:

$$R_a = \frac{a+b+c+d+ \dots}{n} \quad (9-1)$$

Donde:

a, b, c, d, \dots : Todas las ordenadas son valores absolutos.

n : Cantidad de lecturas.

2. La rugosidad de la raíz media cuadrática (R_q), que anteriormente se identificaba como (RMS) (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1040). Se puede expresar como:

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2+b^2+c^2+d^2+\dots}{n}} \quad (10-1)$$

La línea de referencia AB en la figura 18-1 se localiza de manera que la suma de las áreas arriba de la línea es igual a la suma de las áreas debajo de la misma. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1040)

También se puede utilizar la altura máxima de rugosidad (R_t), que se define como la altura de la depresión más profunda hasta la cresta más elevada. Indica cuánto material tiene que retirarse para obtener una superficie lisa, por ejemplo, mediante pulido. Por lo general, las unidades utilizadas para la rugosidad superficial son μm (micras) o μin . (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1040)

Debido a su simplicidad, el valor medio aritmético (R_a) se adoptó internacionalmente a mediados de la década de 1950 y su uso es amplio en la práctica de ingeniería. Las ecuaciones 2-9 y 2-10 muestran que existe una relación entre R_a y R_q , como se muestra mediante la relación R_q/R_a . Esta relación para superficies comunes producidas mediante procesos de maquinado y acabado es la siguiente: corte, 1.1; rectificado, 1.2 y lapeado y honeado, 1.4. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1040)

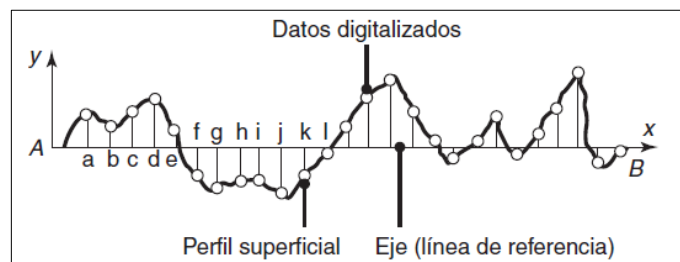


Figura 18-1: Coordenadas utilizadas para medir la rugosidad superficial

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1039)

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. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1040)

El tipo de perfil superficial puede ser significativo en términos de las características de fricción, desgaste y fatiga de un producto manufacturado. Por lo tanto, es importante analizar una superficie con gran detalle, en particular las partes a utilizar en aplicaciones críticas. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1041)

1.3.6 Símbolos para la rugosidad superficial

En los dibujos técnicos, los límites aceptables de la rugosidad superficial se especifican mediante símbolos, que por lo general se muestran alrededor de la marca de verificación en la parte baja véase la figura 19-1; los valores de estos límites se colocan a la izquierda de la marca. (Rubio Alonso, 2019)

En la figura 19-1 se presentan los símbolos y sus significados respecto de la direccionalidad. Obsérvese que el símbolo de direccionalidad se coloca en la parte inferior derecha de la marca. (Rubio Alonso, 2019)


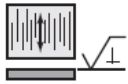
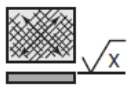
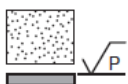
Símbolo de la direccionalidad	Interpretación	Ejemplos
—	Direccionalidad paralela a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
⊥	Direccionalidad perpendicular a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
X	Direccionalidad angular en ambas direcciones a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
P	Direccionalidad picada, protuberante, porosa o de partículas sin dirección	

Figura 19-1: Símbolos comunes de direccionalidad superficial

Fuente: (Rubio Alonso, 2019)

Los símbolos utilizados para describir una superficie especifican sólo su rugosidad, ondulación y direccionalidad; no incluyen las imperfecciones. Por lo tanto, siempre que es necesario se incluye una nota especial en los dibujos técnicos para describir el método que debe usarse a fin de inspeccionar las imperfecciones superficiales. (Rubio Alonso, 2019)

1.4 Medición de la rugosidad superficial

Por lo general, se utilizan instrumentos conocidos como rugosímetros superficiales para medir y registrar la rugosidad superficial. (Keyence, 2019)

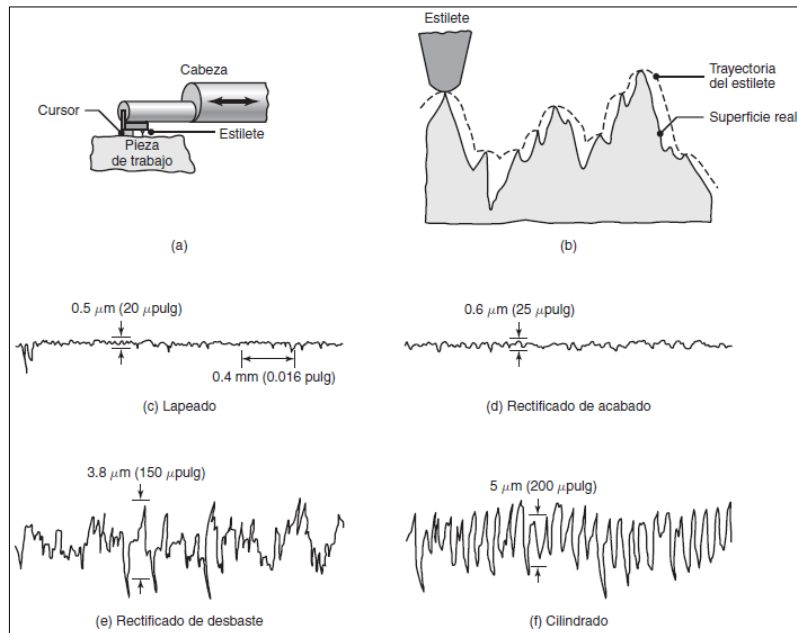


Figura 20-1: Medición de la rugosidad superficial

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1041)

En la figura 20-1 se ilustra: (a) medición de la rugosidad superficial con un estilete. El cursor soporta el estilete y lo protege contra daños. (b) Trayectoria del estilete en mediciones de rugosidad superficial (línea punteada), en comparación con el perfil real de rugosidad. Obsérvese que el perfil de la trayectoria del estilete es más liso que el de la superficie real. (c) a (f) Perfiles superficiales comunes producidos por diversos procesos de maquinado y acabado superficial. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1041)

Un rugosímetro tiene un estilete de diamante que avanza en línea recta sobre la superficie (figura 1-20a). A la distancia que avanza el estilete se le conoce como recorrido, que por lo regular va de 0.08 mm a 25 mm (0.003 a 1 pulgada). Un recorrido de 0.8 mm (0.03 pulgada) es común para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. El método empírico es que el recorrido debe ser lo suficientemente grande para incluir 10 a 15 irregularidades de rugosidad, así como toda la ondulación superficial. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1042)

Para resaltar la rugosidad, se registran las trazas del rugosímetro en una escala vertical y horizontal exagerada (figura 20-1 c a la f); a la magnitud de la escala se le conoce como ganancia

en el instrumento de registro, el cual compensa cualquier ondulación; indica sólo la rugosidad. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1042)

Debido al radio finito de la punta de diamante del estilete, la trayectoria de este último es diferente de la superficie real (obsérvese la fig. 20-1 b). El diámetro de la punta del estilete más utilizado es de 10 mm (400 mpulg). Cuanto más pequeño es el diámetro del estilete y más lisa la superficie, más cercana será la trayectoria del estilete al perfil superficial real. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p. 1042)

La rugosidad superficial puede observarse también de manera directa a través de un microscopio electrónico de barrido u óptico. Las fotografías estereoscópicas son útiles particularmente para vistas tridimensionales de superficies y también se pueden usar para medir la rugosidad. (Keyence, 2019)

1.4.1 Digital surface roughness tester

Este probador de rugosidad superficial es de tamaño pequeño, liviano y fácil de transportar. Aunque complejo y avanzado, es conveniente para usar y operar. Su robustez permite el uso de muchas personas.



Figura 21-1: Digital surface roughness tester

Fuente: (Focus Technology Co., Ltd. T, 2019)

1.4.1.1 Aplicación

Ampliamente utilizado en el lugar de producción para medir la rugosidad de la superficie de varias piezas procesadas por maquinaria, calcular los parámetros correspondientes según las condiciones de medición seleccionadas y mostrar claramente todos los parámetros de medición. (Focus Technology Co., Ltd. T, 2019)

1.4.1.2 Principio

Para medir la rugosidad de una superficie, el sensor se coloca sobre la misma y luego se desliza de manera uniforme a lo largo de la superficie por la conducción del mecanismo dentro del probador. Debido a una sonda incorporada, la aspereza de la pieza provoca el desplazamiento de la sonda produciendo un cambio en la cantidad inductiva de las bobinas de inducción para generar una señal analógica, que es proporcional a la rugosidad de la superficie en el extremo de salida del rectificador sensible a la fase. El DSP integrado procesa, calcula y reproduce los resultados de medición en la pantalla LCD. (Focus Technology Co., Ltd. T, 2019)

1.4.1.3 Características

Principales características del SRT-6210s:

- Es compatible con cuatro niveles de ISO, DIN, ANSI y JIS.
- Varios parámetros de la medición: Ra, Rz, Rq, Rt.
- Sensor de la inductancia altamente sofisticados.
- Cuatro métodos de filtrado de ondas: RC, PC-RC, Gauss y D-P.
- De pequeño tamaño, peso ligero y fácil de usar.
- Manual o automático de apagado.
- Puede memorizar 7 grupos de la medición de resultados y condiciones de medición para uso posterior o descargar para PC. (Focus Technology Co., Ltd. T, 2019)
- Sistema Métrico Imperial /la conversión.
- Utilizar la salida de datos "USB" y "salida" de datos RS-232 para conectar al PC.
- Proporcionar "salida de datos Bluetooth™" elección.

En la tabla 6-1 se indican las especificaciones más importantes del SRT-6210S.

Tabla 6-1: Especificaciones del SRT-6210S

Normas	GB/T6062, ISO4287, DIN4768, JIS B, 46.1 ANSI	
Parámetros	Ra, Rq, rz, Rt.	
Rango de medición	Ra, Rq: 0.005~16.00μm Rz, Rt: 0.020~160.0μm /0.020~629.9μinch /0.078~6299μinch	
La precisión	≤ ±10%	
La fluctuación del valor de pantalla	< 6%	
La resolución	0.001/0.01/0, 1	
El sensor	Sonda de radio de la patilla	5μm
	Material de la clavija de la sonda	Diamond
	La fuerza de la sonda de medición	4mN(0.4gf)
	Ángulo de la sonda	90°
	Radio vertical de guiar a la cabeza	48 mm
	La carrera de conducción máxima	17, 5mm/0.7inch
	La longitud de corte(l)	0.25mm, 0, 8, 2, 5 mm
La velocidad de conducción	El muestreo	Cuando la longitud=0.25mm, Vt=0, 135 mm/seg.
		Cuando la longitud=0, 8mm, Vt=0, 5 mm/seg.
		Cuando la longitud = 2, 5 mm, Vt=1mm/seg.
	Retroceso	Vt=1mm/seg.
Filtro Digital perfil	RC, PC-RC, GAUSS, D-P	
Longitud de la evaluación	1~5L opcional	
Memorizar Datos	7 grupos	
Las condiciones de funcionamiento	0~50Temp: °C Humedad: < 80% de HR	
Fuente de alimentación	4x1.5V AAA(UM-4) Batería	
Dimensiones	Tamaño de la unidad principal: 149x67x29mm La base de medición de Tamaño: 185x56x47mm	
El peso	485g	
Accesorios estándar	La unidad principal	
	Placa de muestra estándar SSP-100	
	Sensor estándar SRP-100	
	Destornillador pequeño	
	La base de medición	
	Bolsa de transporte (B09).	
	Manual de operación	
Accesorios	Cable RS-232C con el software	
	Adaptador Bluetooth con el software	
	Varilla de extensión ser-150	
	Lápiz Groove SSP-110	
	Sonda de curvatura SRP-120	
	Soporte de medición de la SRS-1	

Fuente: (Focus Technology Co., Ltd. T, 2019)

Realizado por: Nogales W, 2020

1.4.2 Rugosidad superficial en la práctica de ingeniería

Los requisitos para el diseño de la rugosidad superficial en las aplicaciones comunes de ingeniería varían hasta por dos órdenes de magnitud. (Keyence, 2019)

A continuación, se citan algunos ejemplos:

- Bolas de rodamientos - 0.025 μm (1 μpulg)
- Rodamientos de cigüeñales – 0.32 μm (13 μpulg)
- Tambores de frenos - 1.6 μm (63 μpulg)
- Caras de discos de embragues - 3.2 μm (125 μpulg)

Debido a las diversas variables de materiales y procesos comprendidos, el intervalo de rugosidad producida, incluso dentro del mismo proceso de manufactura, puede ser significativo. (Keyence, 2019)

1.5 Hipótesis

Hipótesis nula (H_0): La relación entre los diferentes factores no generan un mejor acabado superficial.

Hipótesis alternativa (H_1): La relación entre los diferentes factores si generan un mejor acabado superficial.

1.5.1 Variables de la hipótesis

1.5.1.1 Variable independiente

Parámetros de mecanizado de las probetas de aleación de aluminio-cobre.

1.5.1.2 Variable dependiente

La rugosidad superficial obtenida en las probetas de aleación de aluminio-cobre mecanizadas.

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

2.1 Introducción

Según Balestrini (2006, p. 125) señala que el marco metodológico “es el conjunto de procedimientos lógicos, tecno operacionales implícitos en todo proceso de investigación, con el objeto de ponerlos de manifiesto y sistematizarlos; a propósito de permitir descubrir y analizar los supuestos del estudio y de reconstruir los datos, a partir de los conceptos teóricos convencionalmente operacionalizados”

En otras palabras, es la estructura sistemática de la investigación que incluye los métodos, procedimientos e instrumentos que se utilizaron para la recolección y análisis de la información para dar solución a un problema y alcanzar los objetivos propuestos del experimento, así también obtener resultados confiables.

2.2 Nivel de la investigación

El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio. (Arias, 2006, p. 23)

De acuerdo con el tema y los objetivos propuestos del presente estudio se hizo énfasis en un nivel de investigación tipo exploratoria y explicativa.

La investigación exploratoria es aquella que se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado, por lo que sus resultados constituyen una visión aproximada de dicho objeto, es decir, un nivel superficial de conocimientos. (Arias, 2006, p. 23)

La investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos. (Arias, 2006, p. 26)

2.3 Enfoque de la investigación

El presente estudio fue elaborado bajo el planeamiento metodológico del enfoque cuantitativo, porque es el mejor que se adapta a las características y necesidades de la investigación.

El enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías. (Hernández, et al., 2014, p. 4)

Del enfoque cuantitativo se tomó la técnica de observación indirecta y pruebas estandarizadas para observar la composición química y medir la rugosidad superficial de las piezas mecanizadas que contienen una aleación de aluminio-cobre como material estructural.

2.4 Diseño de la investigación

De acuerdo con Balestrini (2006, p. 131) señala que el diseño de la investigación es “un plan global de investigación que integra de un modo coherente y adecuadamente correcto las técnicas de recolección de datos a utilizar, análisis previstos y objetivos; intenta dar de una manera clara y no ambigua respuestas a las preguntas planteadas en la misma”.

Dado que el objetivo de esta investigación fue determinar los parámetros óptimos de mecanizado de una aleación de aluminio – cobre para la fabricación de partes y piezas automotrices mediante un diseño de experimentos, se recurrió a un diseño experimental tipo experimento trifactorial porque es el más adecuado. También se aplicó la investigación exploratoria porque es un tema poco estudiado en nuestro entorno y la investigación explicativa debido a que se buscó correlacionar los parámetros de mecanizado con la rugosidad superficial obtenida en la pieza después de una operación de torneado.

El diseño experimental busca una situación de control en la cual se manipulan, de manera intencional, una o más variables independientes (causas) para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efectos). (Hernández, et al., 2014, p. 130)

Los diseños factoriales manipulan dos o más variables independientes e incluyen dos o más niveles o modalidades de presencia en cada una de las variables independientes. Se utilizan muy a menudo en la investigación experimental. La preparación básica de un diseño factorial consiste en que todos los niveles o modalidades de cada variable independiente son tomados en combinación con todos los niveles o modalidades de las otras variables independientes. (Hernández, et al., 2014, p. 148)

De acuerdo con Condo & Pazmiño (2015, p. 11) “Un experimento factorial es aquel en que se estudia simultáneamente más de un factor, de modo que los tratamientos se forman por todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. Estos experimentos son útiles también en campos de estudios complejos en los que se sabe que un factor no actúa independientemente sino en estrecha relación con otros factores”.

En función de lo antes mencionado se puede describir que un diseño tipo experimental tri-factorial como su nombre lo indica se manipula tres variables (factores) de estudio. En el cual, se observa el efecto y relación entre las variables independientes y dependientes.

Cabe destacar que en el diseño tipo experimental factorial, conforme incluya más factores el análisis estadístico e interpretación de los resultados son más complicados, así como también aumento el número de unidades experimentales por lo que, en consecuencia, es más costoso.

2.5 Población y muestra

2.5.1 Población

La población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio. (Arias, 2006, p. 81)

Para este trabajo experimental, la población de objeto de estudio estuvo conformado por las probetas de aleación de aluminio-cobre que se obtuvieron mediante la fundición de materiales reciclables en un horno de crisol usando molde permanente y un posterior mecanizado mediante un torno CNC.

2.5.2 Muestra

La muestra es un subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de está. (Hernández, et al., 2014, p. 173)

Para la elaboración de este trabajo experimental se utilizó un método de muestreo no probabilístico.

La muestra no probabilística o dirigida es un subgrupo de la población en la que la elección de los elementos no depende de la probabilidad sino de las características de la investigación. (Hernández, et al., 2014, p. 176)

El número de muestras que se usaron en la investigación fueron 27 probetas de una aleación de aluminio-cobre con un contenido del 95% de Al y 5% Cu, de las cuales también se tomaron para realizar el ensayo espectrométrico en el laboratorio tomando como referencia los criterios de la norma ASTM E3-11. En estas probetas también se midió la rugosidad superficial ya que el ensayo al que se sometieron no provoca variación en los resultados.

2.6 Operación de las variables

2.6.1 Variables independientes

Parámetros de mecanizado de las probetas de aleación de aluminio-cobre.

2.6.1.1 Parámetros de corte

Velocidad de rotación del mandril del torno CNC:

- 500 rev/min
- 600 rev/min.
- 700 rev/min.

Avance longitudinal de la herramienta de corte:

- 1 mm.
- 2 mm.
- 3 mm.




Profundidad (Penetración):

- 2 mm (material en bruto).
- 1.5 mm (acabado).
- 0.5 mm (acabado final).

2.6.1.2 Herramientas de corte

Las cuchillas que se usaron en el torno CNC para mecanizar las probetas se indican en la tabla 1-2.

Tabla 1-2: Cuchillas usadas para la operación de torneado

N.º	CUCHILLA	OPERACIÓN	FIGURA
1	Cuchilla cuadrada de acero rápido HSS 3/8 x 3/8	DESBASTE ACABADO	
2	Cuchilla de carburo de tungsteno	ACABADO	
3	Cuchilla porta inserto de torneado exterior MWLNR2020K08 empleando un inserto WNMG 431-UA	ACABADO	

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

2.6.2 Variable dependiente

Indica la rugosidad superficial después del torneado de las probetas usando las cuchillas de la tabla 1-2 con las diferentes combinaciones de los parámetros de corte.

2.7 Materiales y equipos

Los materiales y equipos más importantes para el desarrollo del experimento se ilustran en la tabla 2-1:

Tabla 2-2: Materiales y equipos

MATERIALES/EQUIPOS	FIGURA
Horno de crisol	
Soldadora invertir PPK 250 A / 220 V	
Torno CNC LATHE CK6136A-2	
Espectrómetro de emisión óptica BRUKER Q2 ION	
Rugosímetro Digital SRT-6210S	
Material reciclable (aluminio y cobre)	

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

Las herramientas adicionales y equipo de seguridad necesario para la operación de los equipos mostrados en la tabla anterior fueron proporcionados por el propio taller de fundición.

2.8 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

2.8.1 Técnicas de recolección de datos

Se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información. (Arias, 2006, p. 67)

Una técnica de recolección de datos usada en la investigación fue la observación indirecta la cual se realizó en el laboratorio de resistencia de materiales ya que para determinar la composición de las probetas de aleación de aluminio-cobre se recurrió al uso de un espectrómetro de emisión óptica donde la calibración del equipo, el procedimiento del ensayo y entrega de resultados están bajo normativa. Otra técnica utilizada fue la prueba y error durante la operación de torneado en el torno CNC para determinar los parámetros óptimos de mecanizado de las probetas en función de la calidad del acabado. Posteriormente estos resultados fueron ordenados, corroborados, tabulados para realizar un análisis estadístico de los mismos con el fin de comparar y concluir; con cual herramienta de corte se obtiene una menor rugosidad superficial.

La observación es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos. (Arias, 2006, p. 69)

La prueba y error consisten en ir probando alternativas y verificar si estas funcionan por lo que se puede dar solución a problemas mediante la observación por lo tanto es un método muy conocido y usado ya sea de forma empírica o experimental.

Como primer punto se inició abordando el problema propuesto con ayuda de los fundamentos teóricos desarrollados hasta ahora, y con ayuda bibliográfica de la biblioteca de la ESPOCH, la facultad, así como también bibliotecas virtuales para sustentar la base teórica de la investigación, así también diseñar el procedimiento experimental para el control de las variables para probar la hipótesis y cumplir los objetivos planteados.

2.8.2 Instrumentos de recolección de datos

Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información. (Arias, 2006, p. 68)

El instrumento usado es una escala de estimación tipo numérica y gráfica debido a que los resultados se presentan en valores numéricos, pero luego se representaran mediante los gráficos estadísticos.

Una escala de estimación consiste en una escala que busca medir cómo se manifiesta una situación o conducta. (Arias, 2006, p. 71)

Por su parte, la escala de estimación numérica asigna las categorías o ítems descriptivos que conforman la escala mientras la escala de estimación gráfica está caracterizada por líneas rectas o curvas con sus respectivas rayas divisorias que ayuda a evaluar los resultados.

2.9 Procesamiento de datos

La técnica que se utilizó para el procesamiento de los datos fue la estadística descriptiva la cual consiste en un conjunto de métodos y procedimientos que tienen como objetivo reducir una gran cantidad de datos y transmitirla mediante tablas y gráficos en los cuales se puede observar la media, la varianza, desviación estándar, entre otros.

2.9.1 Herramienta para el procesamiento de datos

Una herramienta de procesamiento de datos es un medio físico que me permite tabular o medir la información.

Los registros y representación de los datos que se obtuvieron durante la investigación se llevaron a cabo mediante hojas de cálculo del programa Microsoft Excel 2016 y el software estadístico Minitab 2017.

2.10 Procedimiento experimental

El proceso que se llevó a cabo para la realización de este trabajo experimental se detalla en la figura 1-2.

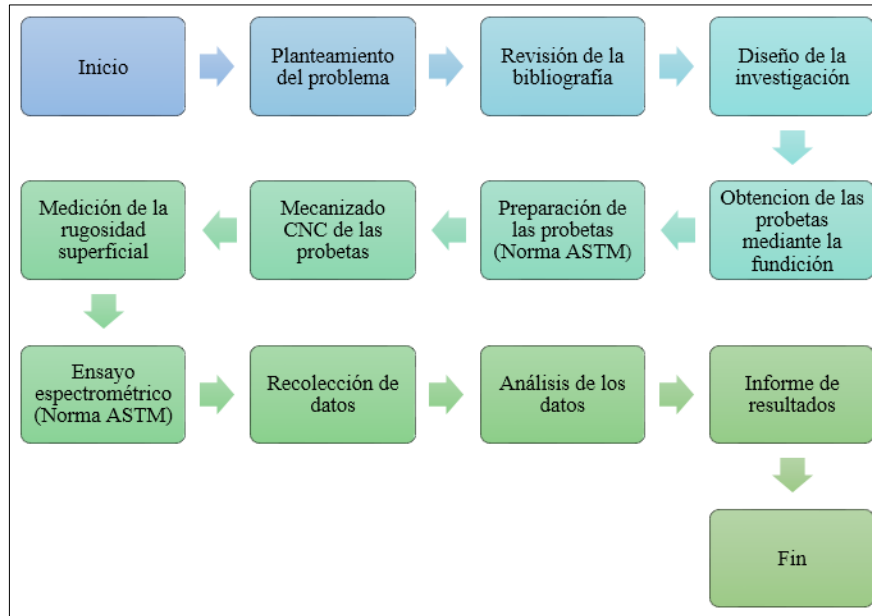


Figura 1-2: Proceso para la realización de la investigación

Fuente: Nogales W, 2020

CAPÍTULO III

3 MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1 Obtención de las probetas

Para la obtención de las probetas se realizó el siguiente procedimiento:

1. Recolección de material como cables de alta tensión de la red eléctrica ya que tienen un alto porcentaje de pureza de aluminio y cables eléctricos para obtener el cobre.
2. Diseño y construcción de los moldes metálicos desechables, los cuales tendrán forma cilíndrica para ello se utilizó un tubo de acero con un diámetro de 1¼, luego se pasó a realizar los cortes usando la amoladora donde cada molde tiene una longitud de 80 cm (figura 1-3). Por último, se suelda una platina en uno de los extremos de los tubos (figura 2-3); haciéndose un total de 6 moldes. También se construyeron dos moldes metálicos desechables con una forma de cuadrado de 10 x 10 cm con una longitud de 20 cm (figura 8-3) a los cuales también se suelda la platina respectiva en uno de sus extremos.



Figura 1-3: Corte de los tubos de acero

Fuente: Nogales W, 2020



Figura 2-3: Soldadura de la platina al tubo de acero

Fuente: Nogales W, 2020

3. Se calienta el horno de crisol a una temperatura de 700°C.



Figura 3-1: Horno de crisol a 700°C

Fuente: Nogales W, 2020

4. Se procede a pesar el material reciclado en la balanza: 30 lb de aluminio y 1.5 lb para conseguir la aleación de aluminio-cobre con una concentración de 95.05% (Al) y 4.95% (Cu).



Figura 4-3: Peso del material reciclado

Fuente: Nogales W, 2020

5. El material reciclado se carga en el horno de crisol para que se funda luego se añade bórax para descontaminar la fundición, sal que da brillo al material y 1/2 pastilla de cloro para eliminar los gases del fundido.



Figura 5-3: Material depositado en el horno

Fuente: Nogales W, 2020

6. Se deposita el fundido en el crisol para luego pasar a rellenar los moldes y se espera hasta que solidifique el material.



Figura 6-3: Extracción del fundido del horno de crisol

Fuente: Nogales W, 2020



Figura 7-3: Relleno del fundido en los moldes cilíndricos

Fuente: Nogales W, 2020



Figura 8-3: Relleno del fundido en los moldes cuadrados

Fuente: Nogales W, 2020

7. Para extraer las piezas solidificadas de los respectivos moldes se corta los tubos de acero por mitad a ambos lados de los mismos con la amoladora de igual manera las platinas. El mismo proceso se aplicó para los moldes cuadrados.



Figura 9-3: Piezas solidificadas

Fuente: Nogales W, 2020



Figura 10-3: Corte de los moldes cilíndricos

Fuente: Nogales W, 2020



Figura 11-3: Corte de los moldes cuadrados

Fuente: Nogales W, 2020

8. Una vez realizado la extracción de las piezas de sus moldes se pudo continuar con el siguiente punto del proceso de la investigación.



Figura 12-3: Piezas extraídas de los moldes

Fuente: Nogales W, 2020

La fundición de los materiales reciclados se debe desarrollar usando el equipo de protección adecuado con las medidas de seguridad apropiadas para que en caso de algún accidente evitar lesiones graves durante el trabajo.

3.2 Medición de la rugosidad superficial

Para medir la rugosidad superficial de las probetas se realizó el siguiente procedimiento:

1. Primero se procedió a quitar el material excedente de las piezas fundidas para luego dividir y cortar los 6 moldes en probetas de 160 mm de largo, así se obtuvieron las 27 muestras con diámetro de 26 mm para realizar el respectivo maquinado.
2. Después se pasó a preparar el torno CNC:
 - Montaje del material en bruto (probeta) en el mandril.
 - Montaje de la herramienta de corte (acero rápido, carburo de tungsteno y de inserto).

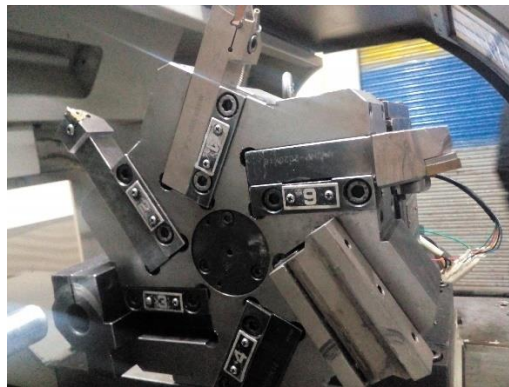


Figura 13-3: Montaje de las herramientas de corte

Fuente: Nogales W, 2020

- Deposición del refrigerante (taladrina: agua + aceite refrigerante soluble).
3. Se enciende el torno CNC y se pasó a programar la pieza en lenguaje código G para codificar las condiciones de operación del torneado.

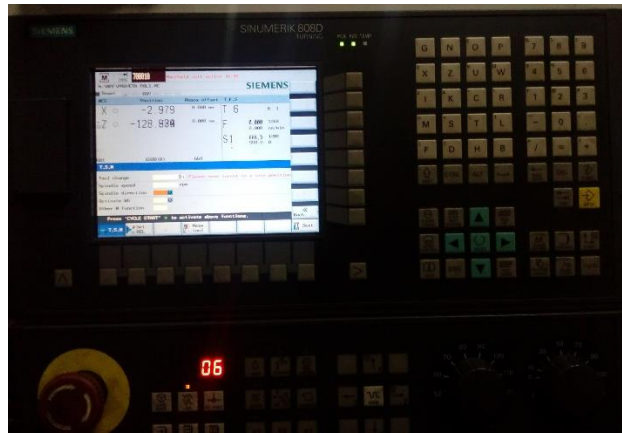


Figura 14-3: Programación de las condiciones de operación

Fuente: Nogales W, 2020

4. Se manda a ejecutar; primero haciendo una operación desbaste de 2 mm a 500 rev/min, luego se realiza un acabado con un avance de 1.5 mm terminando con un pase de 0.5 mm a 700 rev/min, este proceso se hizo para todas las probetas intercambiando la herramienta de corte diferente por cada bloque.

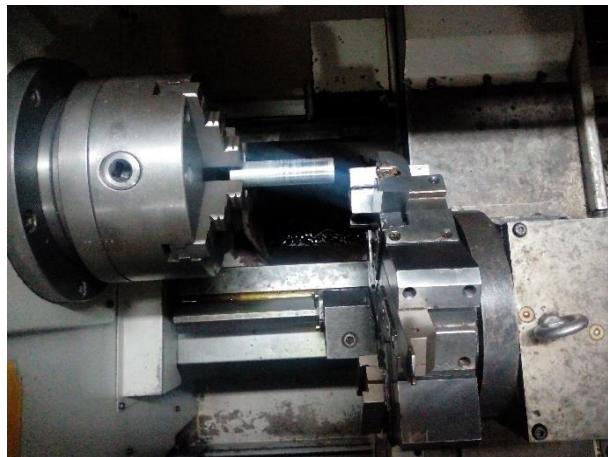


Figura 15-3: Cilindrado de las probetas

Fuente: Nogales W, 2020

5. A continuación, se preparó las probetas y el Surface Roughness Tester (STR-6210S):
 - Para ello se requirió de una base para sostener la sonda y nivelarla. Así también se necesitó de una prensa para sujetar la probeta y evitar que la misma realice cualquier tipo de movimiento con el fin de obtener una medición precisa.



Figura 16-3: Montaje de la muestra y del STR-6210S

Fuente: Nogales W, 2020

- Para que la lectura sea correcta después encender el Surface Roughness Tester (STR-6210S) primero se debe ir al estado de calibración presionando la tecla (CAL) donde se toma el valor de la medición de la muestra basándose en un parámetro estándar, después se presiona la tecla (SAVE) o (READ) para ajustar la lectura a un valor estándar, esto se repite hasta que la precisión sea correcta.
- Por último, se procede a registrar las lecturas de las mediciones por bloque de 9 muestras.



Figura 17-3: Bloque de 9 probetas

Fuente: Nogales W, 2020

6. Este procedimiento se aplica para cada una de las probetas por lo que esto se repitió 27 veces.
7. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 2-3, 3-3 y 4-3 de este capítulo.

3.3 Espectrometría

Para conocer la composición química de la aleación de aluminio-cobre se realizó un ensayo espectrométrico bajo la norma ASTM E3-11 (Guía estándar para la preparación de las muestras metalográficas). Para ello las probetas que anteriormente se realizó una operación de cilindro se sometieron a un refrentado usando el torno CNC para obtener una superficie plana en sus caras, consiguiendo las siguientes dimensiones; 160 mm de largo y 26 mm de diámetro evitando tocar con los dedos las caras ya que la grasa puede alterar los elementos químicos de la aleación.



Figura 18-3: Probetas refrentadas

Fuente: Nogales W, 2020

A continuación, para analizar el material se montan las probetas en el BRUKER Q2 ION, logrando así determinar la composición química de las mismas. Los resultados obtenidos en el equipo se muestran en la tabla 1-3.




Figura 19-3: Probeta en el BRUKER Q2 ION

Fuente: Nogales W, 2020

3.3.1 Composición química de la muestra con 5% de Cu

En la tabla 1-3 se muestra la composición química de la muestra de aluminio-cobre:

Tabla 1-3: Composición química de la muestra con un contenido de 5% de Cu

Bruker Analysis Report				
Sample:				
Analysis Time: 26.07.2019 15:45:20		Method: Al100		
Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅ 0,165	0,397	4,994	0,011	0,040
Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅ <0,0020	0,017	0,030	<0,0020	<0,050
Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Cd [%]
∅ 0,021	<0,0030	0,0031	<0,0020	<0,0050
Co [%]	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Ca [%]
∅ 0,0037	<0,0010	<0,0010	<0,0060	0,024
Al [%]				
∅ 94,26				

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

Como se observa en la tabla 1-3 se corrobora que las probetas obtenidas mediante la fundición de materiales reciclados tienen un contenido de 4,994 % de Cu y 94,26 % de Al lo que garantizó la fiabilidad de los datos obtenidos durante el ensayo de tracción.

3.4 Tabulación de datos

En las siguientes tablas 2-3, 3-3 y 4-3 se presentan los resultados de las mediciones de la rugosidad superficial luego del mecanizado CNC de las probetas.

Tabla 2-3: Medición de la rugosidad superficial del primer bloque

Número de bloque	Variables independientes		Variable dependiente		
			Rugosidad superficial (μm)		
	Velocidad de corte (rev/min)	Avance (mm)	Herramienta 1	Herramienta 2	Herramienta 3
A1	500	1	2.091	1.148	1.203
A1	500	2	1.379	1.523	1.065
A1	500	3	1.853	4.168	4.168
A1	600	1	2.257	1.977	0.715
A1	600	2	1.109	2.447	0.580
A1	600	3	0.945	4.902	2.010
A1	700	1	3.136	2.825	2.310
A1	700	2	1.830	2.632	1.400
A1	700	3	2.072	4.769	3.201

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

Tabla 3-3: Medición de la rugosidad superficial del segundo bloque

Número de Bloque	Variables independientes		Variable dependiente		
			Rugosidad superficial (μm)		
	Velocidad de corte (rev/min)	Avance (mm)	Herramienta 1	Herramienta 2	Herramienta 3
B2	500	1	2.464	1.531	1.126
B2	500	2	1.950	2.098	1.026
B2	500	3	3.361	4.121	2.276
B2	600	1	2.609	1.279	1.144
B2	600	2	3.424	2.052	1.768
B2	600	3	4.175	4.637	3.244
B2	700	1	1.692	1.356	1.590
B2	700	2	1.783	2.223	1.780
B2	700	3	3.876	3.619	3.046

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

Tabla 4-3: Medición de la rugosidad superficial del tercer bloque

Número de Bloque	Variables independientes		Variable dependiente		
			Rugosidad superficial (μm)		
	Velocidad de corte (rev/min)	Avance (mm)	Herramienta 1	Herramienta 2	Herramienta 3
B3	500	1	3.136	2.825	2.310
B3	500	2	1.830	2.632	1.400
B3	500	3	2.072	4.769	3.201
B3	600	1	1.692	1.356	1.590
B3	600	2	1.783	2.223	1.780
B3	600	3	3.876	3.619	3.046
B3	700	1	2.155	1.420	1.360
B3	700	2	1.819	1.727	2.687
B3	700	3	3.263	3.880	3.747

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

3.5 Análisis estadístico de los datos

Para evaluar los datos obtenidos, se tomó en consideración un diseño de bloques completamente al azar, bajo un DBCA con arreglo combinatorio. Para ello se revisó el tomo 3 del libro “Diseño experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias agropecuarias” de Condo & Pazmiño (2015), de la sección de “experimentos tri-factoriales”.

3.5.1 Condiciones iniciales

Factor A (Variedad):

A1 = Bloque A1

A2 = Bloque A2

A3 = Bloque A2

Factor B (Velocidad de corte):

B1 = 500 rev/min

B2 = 600 rev/min

$$B3 = 700 \text{ rev/min}$$

Factor C (Avance):

$$C1 = 1 \text{ mm}$$

$$C2 = 2 \text{ mm}$$

$$C3 = 3 \text{ mm}$$

Al tratarse de un experimento tri-factorial, los datos tabulados anteriormente fueron ordenados como se muestran en la tabla 5-3 para proceder con el análisis estadístico respectivo.

Tabla 5-3: Valores de rugosidad superficial en función de la probeta mecanizada

Variedad	Tratamientos		Repeticiones			Suma (μm)	Media (μm)
	Velocidad (rpm)	Avance (mm)	M I (μm)	M II (μm)	M III (μm)		
A1	500	1	2.091	1.148	1.203	4.443	1.481
A1	500	2	1.379	1.523	1.065	3.967	1.322
A1	500	3	1.853	4.168	4.168	10.189	3.396
A1	600	1	2.257	1.977	0.715	4.949	1.650
A1	600	2	1.109	2.447	0.580	4.135	1.378
A1	600	3	0.945	4.902	2.010	7.857	2.619
A1	700	1	3.136	2.825	2.310	8.271	2.757
A1	700	2	1.830	2.632	1.400	5.862	1.954
A1	700	3	2.072	4.769	3.201	10.042	3.347
A2	500	1	2.464	1.531	1.126	5.121	1.707
A2	500	2	1.950	2.098	1.026	5.074	1.691
A2	500	3	3.361	4.121	2.276	9.757	3.252
A2	600	1	2.609	1.279	1.144	5.033	1.678
A2	600	2	3.424	2.052	1.768	7.244	2.415
A2	600	3	4.175	4.637	3.244	12.056	4.019
A2	700	1	1.692	1.356	1.590	4.638	1.546
A2	700	2	1.783	2.223	1.780	5.786	1.929
A2	700	3	3.876	3.619	3.046	10.541	3.514
A3	500	1	1.733	2.727	1.967	6.427	2.142
A3	500	2	1.613	3.200	1.660	6.473	2.158
A3	500	3	3.800	4.614	3.287	11.701	3.900
A3	600	1	1.098	1.017	1.553	3.668	1.223
A3	600	2	2.033	3.520	3.113	8.667	2.889
A3	600	3	3.820	4.173	3.807	11.800	3.933
A3	700	1	2.155	1.420	1.360	4.935	1.645
A3	700	2	1.819	1.727	2.687	6.233	2.078

A3	700	3	3.263	3.880	3.747	10.890	3.630
Total=			63.342	75.585	56.833	195.760	65.253
Promedio=			65.253			7.250	2.417

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

3.5.2 Cálculos teóricos

Para ello se consideró en forma general que: SC = Suma de cuadrados, X = Valor de la medición y \bar{x} = Promedio de las mediciones, los cuales se pueden adaptar para el cálculo de cada factor.

$$SC_{Total} = \sum(X - \bar{x})^2$$

$$SC_{Total} = (2,091 - 2,417)^2 + (1,148 - 2,417)^2 + (1,203 - 2,417)^2 + \dots + (3,747 - 2,417)^2 = 98,417$$

$$SC_{Tratamientos} = \frac{\sum(\sum x_{Tra} - \sum \bar{x}_{Tra})^2}{r}$$

Donde: r = Número de repeticiones.

$$SC_{Tratamientos} = \frac{(4,443 - 7,25)^2 + (3,967 - 7,25)^2 + \dots + (10,809 - 7,25)^2}{3} = 64,351$$

$$SC_{Repeticiones} = \frac{\sum(\sum x_{Rep} - \sum \bar{x}_{Rep})^2}{abc}$$

Donde: a, b y c son los niveles de los factores.

$$\sum \bar{x}_{Rep} = \frac{195,760}{3} = 65,253$$

$$SC_{Repeticiones} = \frac{(63,342 - 65,253)^2 + (75,585 - 65,253)^2 + (56,833 - 65,253)^2}{3 * 3 * 3} = 6,715$$

En la tabla 6-3 se muestra la interacción de los factores AB:

Tabla 6-3: Interacción variedad x velocidad de corte

Variedad	Velocidad de corte (rev/min)			Xi..
	500	600	700	
A1	18.599	16.941	24.175	59.715
A2	19.952	24.333	20.966	65.251
A3	24.601	24.135	22.057	70.793
X.j.	63.152	65.409	67.198	195.760

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

$$SC_A = \frac{\sum(\sum\sum x_A - \sum\sum\bar{x}_A)^2}{rbc}$$

$$SC_A = \frac{(59,715 - 65,253)^2 + (65,251 - 65,253)^2 + (70,793 - 65,253)^2}{3 * 3 * 3} = 2,273$$

$$SC_B = \frac{\sum(\sum\sum x_B - \sum\sum\bar{x}_B)^2}{rac}$$

$$SC_B = \frac{(63,152 - 65,253)^2 + (65,409 - 65,253)^2 + (67,198 - 65,253)^2}{3 * 3 * 3} = 0,304$$

$$SC_{AB} = \frac{\sum(\sum\sum x_{AB} - \sum\sum\bar{x}_{AB})^2}{rc} - SC_A - SC_B$$

$$\sum\sum\bar{x}_{AB} = \frac{195,760}{9} = 21,751$$

$$SC_{AB} = \frac{(18,599 - 21,751)^2 + (16,941 - 21,751)^2 + \dots + (22,057 - 21,751)^2}{3 * 3} - 2,273 - 0,304 = 4,463$$

En la tabla 7-3 se muestra la interacción de los factores AC:

Tabla 7-3: Interacción variedad x avance

Variedad	Avance (mm)			Xi..
	1	2	3	
A1	17.663	13.965	28.088	59.715
A2	14.792	18.105	32.354	65.251
A3	15.030	21.373	34.391	70.793
X.j.	47.485	53.442	94.833	195.760

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

$$SC_C = \frac{\Sigma(\Sigma\Sigma\Sigma x_C - \Sigma\Sigma\Sigma \bar{x}_C)^2}{rab}$$

$$SC_C = \frac{(47,485 - 65,253)^2 + (53,442 - 65,253)^2 + (94,833 - 65,253)^2}{3 * 3 * 3} = 49,266$$

$$SC_{AC} = \frac{\Sigma(\Sigma\Sigma x_{AC} - \Sigma\Sigma \bar{x}_{AC})^2}{br} - SC_A - SC_C$$

$$\Sigma\Sigma \bar{x}_{AC} = \frac{195,760}{9} = 21,751$$

$$SC_{AC} = \frac{(17,663 - 21,751)^2 + (13,965 - 21,751)^2 + \dots + (34,391 - 21,751)^2}{3 * 3} - 2,273$$

$$- 49,266 = 3,653$$

En la tabla 8-3 se muestra la interacción de los factores BC:

Tabla 8-3: Interacción velocidad de corte x avance

Velocidad de corte (rev/min)	Avance (mm)			Xi..
	1	2	3	
500	15.991	15.515	31.647	63.152
600	13.650	20.046	31.713	65.409
700	17.844	17.881	31.473	67.198
X.j.	47.485	53.442	94.833	195.760

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

$$SC_{BC} = \frac{\Sigma(\Sigma\Sigma x_{BC} - \Sigma\Sigma \bar{x}_{BC})^2}{ar} - SC_B - SC_C$$

$$\Sigma\Sigma \bar{x}_{BC} = \frac{195,760}{9} = 21,751$$

$$SC_{BC} = \frac{(15,991 - 21,751)^2 + (15,515 - 21,751)^2 + \dots + (31,473 - 21,751)^2}{3 * 3} - 0,304$$

$$- 49,266 = 1,822$$

Interacción de los tres factores ABC:

$$SC_{ABC} = SC_{Trat} - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC}$$

$$SC_{ABC} = 64,351 - 2,273 - 0,304 - 49,266 - 4,463 - 4,463 - 3,653 - 1,822 = 2,57$$

Error total:

$$SC_{Error} = SC_{Total} - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{BC} - SC_{AC} - SC_{BC} - SC_{ABC}$$

$$SC_{Error} = 98,417 - 2.273 - 0,304 - 49,266 - 4,463 - 3,653 - 1.822 - 2,57 = 34,066$$

3.5.3 Análisis de varianza (ADEVA)

Para completar la tabla del ADEVA (tabla 10-3) de los datos obtenidos, se utilizó las fórmulas indicadas en la tabla 9-3, los cuales corresponde a la distribución de Fisher.

Tabla 9-3: Fórmulas para calcular la tabla ADEVA mediante Fisher

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medio	Fisher
				Cal
Total	$abc - 1$	SC_T		
Repeticiones	$r - 1$	SC_r	$CM_r = \frac{SC_r}{GL_r}$	$F_r = \frac{CM_r}{CM_E}$
Tratamientos	$t - 1$	SC_t	$CM_t = \frac{SC_t}{GL_t}$	$F_t = \frac{CM_t}{CM_E}$
Variedad moldes	$a - 1$	SC_A	$CM_A = \frac{SC_A}{GL_A}$	$F_A = \frac{CM_A}{CM_E}$
Velocidad de corte	$b - 1$	SC_B	$CM_B = \frac{SC_B}{GL_B}$	$F_B = \frac{CM_B}{CM_E}$
Avance	$c - 1$	SC_C	$CM_C = \frac{SC_C}{GL_C}$	$F_C = \frac{CM_C}{CM_E}$
Interacción AB	$(a - 1)(b - 1)$	SC_{AB}	$CM_{AB} = \frac{SC_{AB}}{GL_{AB}}$	$F_{AB} = \frac{CM_{AB}}{CM_E}$
Interacción AC	$(a - 1)(c - 1)$	SC_{AC}	$CM_{AC} = \frac{SC_{AC}}{GL_{AC}}$	$F_{AC} = \frac{CM_{AC}}{CM_E}$
Interacción BC	$(b - 1)(c - 1)$	SC_{BC}	$CM_{BC} = \frac{SC_{BC}}{GL_{BC}}$	$F_{BC} = \frac{CM_{BC}}{CM_E}$
Interacción ABC	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	SC_{ABC}	$CM_{ABC} = \frac{SC_{ABC}}{GL_{ABC}}$	$F_{ABC} = \frac{CM_{ABC}}{CM_E}$
Error	$GL_T - GL_A - GL_B - GL_C - GL_{AB} - GL_{AC} - GL_{BC} - GL_{ABC}$	SC_E	$CM_E = \frac{SC_E}{GL_E}$	

Fuente: (Condo & Pazmiño, 2015)

Realizado por: Nogales W, 2020

En la tabla 10-3 se muestran los resultados que se obtuvieron al realizar el ADEVA de los datos en forma manual.

Tabla 10-3: Resultados del ADEVA de los datos

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medio	Fisher		
				Cal	Valor P	Significancia
Total	80	98.417				
Repeticiones	2	6.715	3.358	5.322	0.008	**
Tratamientos	26	64.351	2.475	3.923	0.000	**
A: Variedad moldes	2	2.273	1.136	1.801	0.175	N.S.
B: Velocidad de corte	2	0.304	0.152	0.241	0.786	N.S.
C: Avance	2	49.266	24.633	39.048	0.000	**
Interacción AB	4	4.463	1.116	1.769	0.149	N.S.
Interacción AC	4	3.653	0.913	1.448	0.231	N.S.
Interacción BC	4	1.822	0.455	0.722	0.581	N.S.
Interacción ABC	8	2.570	0.321	0.509	0.844	N.S.
Error	54	34.066	0.631			

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

N.S. = No significativo.

** = Altamente significativo.

A continuación, en la tabla 11-3 se ilustran los resultados obtenidos del análisis de varianza mediante el software estadístico Minitab.

Tabla 11-3: Análisis de varianza mediante Minitab

Análisis de Varianza						
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	
Modelo	26	64.3511	2.4750	3.92	0.000	
Lineal	6	51.8434	8.6406	13.70	0.000	
A	2	2.2726	1.1363	1.80	0.175	
B	2	0.3045	0.1522	0.24	0.786	
C	2	49.2663	24.6331	39.05	0.000	
Interacciones de 2 términos	12	9.9381	0.8282	1.31	0.239	
A*B	4	4.4629	1.1157	1.77	0.149	
A*C	4	3.6532	0.9133	1.45	0.231	
B*C	4	1.8220	0.4555	0.72	0.581	
Interacciones de 3 términos	8	2.5696	0.3212	0.51	0.844	
A*B*C	8	2.5696	0.3212	0.51	0.844	
Error	54	34.0659	0.6309			
Total	80	98.4170				

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

Si comparamos los valores obtenidos del análisis de varianza de la tabla 10-3 y 11-3 se puede notar que los mismos son idénticos. Por tanto, los resultados encontrados son confiables lo que garantiza la validez de la investigación.

De acuerdo con el valor de probabilidad de Fisher a un nivel de significancia de 0,05 en ambos casos se observó que la mayor fuente de variación es el factor C, es decir es la que más efecto tiene sobre el acabado superficial de las probetas durante la operación de cilindrado provocando que los datos estén más dispersos respecto a la media.

Coefficiente variación (CV):

$$CV = \frac{\sqrt{CM_{error}}}{\bar{x}} * 100$$

$$CV = \frac{\sqrt{0,63}}{2,417} * 100 = 32,86\%$$

Debido a que existe una alta interacción significativa del factor C respecto a las otras medias por eso se recurrió a una prueba de separación de medias empleando Tukey con un nivel de confianza del 95% con el fin de analizarlo más a profundidad.

Por tanto, se propone una hipótesis nula que dice que todas las medias son iguales y una alterna que dicta que no todas las medias son iguales. Para analizar la alta significancia del factor C de forma manual, primero se necesita calcular el error estándar de las medias:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{CM_{error}}{r * c}}$$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{0,526}{3 * 3}} = 0,241$$

Los resultados que se obtienen al realizar la prueba de Tukey del factor C de forma manual se indican en la tabla 12-3.

Tabla 12-3: Distribución de medias para el factor C

Avance (mm)	Media	Q	RSQ	LIS	Grupo
3	3.512	3.416	0.826	2.687	A
2	1.979	2.842	0.687	1.292	B
1	1.759	-	-	-	B

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

A continuación, se indican en la tabla 13-3 los resultados obtenidos de la prueba de Tukey del factor C por medio del software estadístico Minitab.

Tabla 13-3: Prueba de Tukey del factor C

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%			
C	N	Media	Agrupación
3	27	3.512	A
2	27	1.979	B
1	27	1.759	B

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

Como se puede observar tanto en la tabla 12-3 y 13-3 estas presentan valores similares por lo que los resultados son fiables. En base a esto se toma la decisión de aceptar la hipótesis alterna ya que las medias no comparten una letra común por tanto son significativamente diferentes.

3.6 Prueba de hipótesis

La prueba de la hipótesis se hizo por medio de la Distribución de Fisher.

3.6.1 Hipótesis

Hipótesis nula (H_0): La relación entre los diferentes factores no generan un mejor acabado superficial.

Hipótesis alternativa (H_1): La relación entre los diferentes factores si generan un mejor acabado superficial.

3.6.2 Modelo matemático

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1: \mu_1 = \mu_2 \neq \mu_3$$

3.6.3 Nivel de significancia

Para esta investigación se trabajó con un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia del 5%.

3.6.4 Grados de libertad

GDL del numerador: $k-1$

GDL del denominador: $n-k$

Donde: k : número de tratamientos y n : número de observaciones.

3.6.5 Cálculo del valor estadístico y crítico F

Para encontrar el F_t se empleó las tablas de valores críticos de la distribución F ($\alpha = 0.05$).

El F_c se obtuvo mediante el ANOVA de los datos tabulados de la medición de rugosidad superficial de las probetas.

Tabla 14-3: Comparación entre los valores críticos de Fisher

Fuente de variación	F_c	F_t	Decisión
A: Variedad moldes	1.801	3.168	No se rechaza H_0
B: Velocidad de corte	0.241	3.168	No se rechaza H_0
C: Avance	39.048	3.168	Se rechaza H_0
Interacción AB	1.769	2.543	No se rechaza H_0
Interacción AC	1.448	2.543	No se rechaza H_0
Interacción BC	0.722	2.543	No se rechaza H_0
Interacción ABC	0.509	2.115	No se rechaza H_0

Fuente: Autor

Realizado por: Nogales W, 2020

Regla de decisión:

- Si $F_c \leq F_t$ no se debe rechazar H_0 .
- Si $F_c > F_t$ se debe aceptar H_1 .

3.6.6 Toma de decisión y conclusión

Como se observa en la tabla 14-3, el factor C después de analizarlo mediante Tukey y realizado la prueba de hipótesis se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa que menciona: “La relación entre los diferentes factores no generan un mejor acabado superficial”. Por tanto, es el factor que presenta mayor incidencia en la rugosidad superficial de las probetas produciendo excesiva variación en los resultados. Mientras que para las demás factores e interacciones se acepta la hipótesis nula.

Luego de haber analizado los datos y comprobado la hipótesis se concluye que la relación entre los diferentes factores genera un mejor acabado superficial en las probetas de aluminio-cobre.

3.7 Mecanizado experimental

Finalmente, para validar este estudio el mismo se complementó con el mecanizado de una pieza automotriz con los parámetros óptimos encontrados en función del acabado superficial. Para lo cual, al analizar los datos se pudo determinar que el mejor acabado de las probetas se obtiene con un avance de 1 mm a 600 rev/min usando la cuchilla de carburo tungsteno, los cuales se tomaron en cuenta para el mecanizado de la pieza.

El material en bruto empleado para esta operación se obtuvo durante la fundición en conjunto con las demás probetas por lo que la aleación de aluminio-cobre tiene la misma concentración. La pieza seleccionada es un pomo de una palanca de cambios, como se ilustra en la figura 20-3.

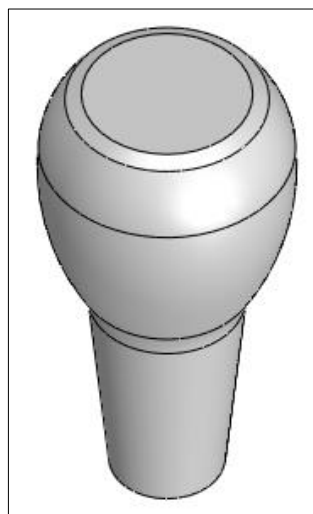


Figura 20-3: Pomo

Realizado por: Nogales W, 2020

Para el maquinado del pomo se tomó en consideración los parámetros de óptimos previamente mencionados y el diseño de la misma se realizó en el Software SolidWorks para luego ingresarla al torno CNC. La apariencia final de la pieza luego del mecanizado se observa en la figura 21-3.



Figura 21-3: Mecanizado

Realizado por: Nogales W, 2020

CONCLUSIONES

El experimento tri-factorial es un método de análisis estadístico muy confiable porque permite estudiar el efecto de cada factor sobre una variable de respuesta mediante diferentes combinaciones entre los factores limitado por el nivel de los mismos, permitiendo analizar más eficientemente las fuentes de variación.

Mediante el ensayo espectrométrico se comprobó que el porcentaje de Al y Cu presente en las probetas es similar al que se planteó teóricamente obtener durante la fundición de los materiales reciclados. Por tanto, se eliminó el exceso de impurezas con gran eficacia, pero no se pudo evitar la formación de gran cantidad poros en las probetas debido a una mala desgasificación de la colada.

Los valores registrados de la medición de la rugosidad superficial de las probetas están por encima del valor normal debido a la porosidad presente en la estructural del material propicio un aumento del valor de la rugosidad superficial, lo que influye directamente en la calidad del acabado de las muestras.

Al realizar el análisis estadístico de los datos mediante la distribución de Fisher se logró determinar que el avance es el factor que tiene mayor incidencia en la obtención de un buen acabado superficial de las probetas. El cual también se corrobora con el análisis por medio del software estadístico Minitab. Por tanto, los resultados obtenidos del ADEVA son fiables así validando el estudio.

Los parámetros óptimos de mecanizado para un torno CNC encontrados al analizar los datos se obtienen al trabajar con un avance de 1 mm a 600 rev/min empleando una cuchilla de carburo de tungsteno ya que fue donde se observó el mejor acabado superficial en las probetas que luego se verifico con un mecanizado experimental. Además, estos resultados se pueden tomar como referencia para las operaciones de mecanizado en otras máquinas CNC permitiendo optimizar el proceso de mecanizado con este material en nuestro medio.

RECOMENDACIONES

Realizar la revisión bibliografía necesaria con el fin de diseñar la metodología más adecuada para abordar la problemática de esta investigación. Así también fundamentar los criterios para este experimento ya que se busca optimizar los procesos de manufactura de piezas automotrices empleando un material determinado.

Durante la fundición es aconsejable añadir bórax, sal y cloro a la colada depositada en el horno de crisol fijo para aumentar la pureza de la aleación y eliminar los gases atrapados que inducen la formación de poros en las piezas provocando que a la hora de mecanizar estas puedan llegar a la rotura, así como también afecta el acabado de las mismas e influye en la medición de la rugosidad superficial.

Durante las operaciones de mecanizado de las probetas en el torno CNC, otro factor indispensable para obtener una mejor calidad del acabado superficial y que no se tomó en cuenta en el desarrollo del estudio es la selección del refrigerante o un lubricante ya que los mismos están estrictamente relacionados con la velocidad de corte. Para este caso, se recomienda usar un refrigerante debido a que se trabaja con altas velocidades de corte

No es recomendable utilizar la función de calibración del Surface Roughness Tester (STR-6210S) con demasiada frecuencia debido a que se pueda descalibrar, así dando lecturas no fiables. Por tanto, el fabricante menciona que el instrumento ha sido probado exhaustivamente antes de salir a la venta para garantizar que el error del valor de visualización sea menor que el 10% por esa razón, es preferible revisar el manual de operación.

BIBLIOGRAFÍA

ANTONIO, M.. *PROYECTO Fittema – Antena de transferencia de tecnología – Fluidos de corte.* [En línea] 2019. [Consulta: 15 julio 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/23011568/PROYECTO_Fittema_Antena_de_transferencia_de_tecnolog%C3%ADa_Fluidos_de_corte_FLUIDOS_DE_CORTE_QU%C3%89_SON

ARIAS, Fidias. *El proyecto de investigación.* 6ª ed. Caracas-Venezuela: Episteme, C.A., 2006, pp.23-81.

BALESTRINI, Mirian. *Como se elabora un proyecto de investigación.* 7ª ed. Caracas-Venezuela: BL Consultores Asociados, 2006, pp. 125-131.

CONDO, L.; & PAZMIÑO, J.. *Diseño experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias agropecuarias.* 1ª ed. Riobamba-Ecuador: ESPOCH, 2015, pp. 11-59.

DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS. *Torno CNC.* [En línea] 2011. [Consulta: 01 Diciembre 2019]. Disponible en: <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/torno-cnc>

ECURED. *Máquina herramienta.* [En línea] 2019. [Consulta: 20 junio 2019]. Disponible en: https://www.ecured.cu/M%C3%A1quina_herramienta

FOCUS TECHNOLOGY CO., LTD. T. *Medidor de rugosidad, independiente de la rugosidad superficial Tester SRT-6210S.* [En línea] 2019. [Consulta: 04 diciembre 2019]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_bestone-meter/product_Roughness-Meter-Separate-Surface-Roughness-Tester-Srt-6210s_eroygghg.html

GROOVER, Mikell. *Fundamentos de manufactura moderna.* 3ª ed. México: McGraw-Hill/Interamericana, S.A., 2007, pp. 481-599.

HERNÁNDEZ, Roberto; et al. *Metodología de la investigación.* 6ª ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2014, pp. 130-176.

IDUSTRIA & EMPRESAS. *Industrias&empresas.* [En línea] 2014 . [Consulta: 09 septiembre 2019]. Disponible en: <http://industriasyempresas.com.ar/node/2088>

KALPAKJIAN, Serope; & SCHMID, Steven. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología.* 5ª ed. México: Pearson Educación de Mexico, S.A., 2008, pp. 610-1042.

KEYENCE. *Medidores de Rugosidad.* [En línea] 2019. [Consulta: 10 noviembre 2019]. Disponible en: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/measurementsselection/type/roughness.jsp>

L.A.E; & MEJÍA, Raúl. *Tecnología aplicada a los procesos de manufactura.* 1ª ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2000, pp. 30-34.

RODRÍGUEZ, Julián; et al. *Procesos Industriales.* 2º ed ed. Madrid-España: Vision Net, 2006, pp. 103-120.

RUBIO, H.. *Rugosidades superficiales.* [En línea] 2019. [Consulta: 24 octubre 2019]. Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_rugosidades

UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA. *Tema III: Acabado Superficial.* [En línea] 2019. [Consulta: 20 octubre 2019]. Disponible en: <http://lim.ii.udc.es/docencia/iin-tecmec/docs/TemaIII.pdf>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA. *Estructura de un programa CNC.* [En línea] 2017. [Consulta: 14 diciembre 2019]. Disponible en: http://www.electroensaimada.com/uploads/9/0/8/9/9089783/codigo_iso.pdf

UPV / EHU. *Mecanizado por arranque de viruta.* [En línea] 2019. [Consulta: 14 julio 2019]. Disponible en: http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/727_ca.pdf

VÁSQUEZ, M.. *Fundamentos de corte.* [En línea] 2015. [Consulta: 02 junio 2019]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/CIEZAKAR/fundamentos-de-corte>

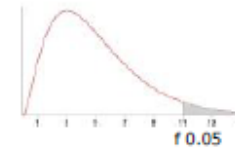
VISBAL, C.. *Estructura del programa CNC.* [En línea] 2013. [Consulta: 01 septiembre 2019]. Disponible en: <https://es.calameo.com/books/002987479c659c2233b52>

ANEXOS

ANEXO A: VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F (0.05)

Cátedra: Probabilidad y Estadística
Facultad Regional Mendoza
UTN

Tabla D.9: VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F (0,05)



área a la derecha del valor crítico = 0,05

g.d.l	Grados de libertad del Numerador															g.d.l
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,0	243,9	244,7	245,4	245,9	1
2	18,513	19,000	19,164	19,247	19,296	19,330	19,353	19,371	19,385	19,396	19,405	19,413	19,419	19,424	19,429	2
3	10,128	9,552	9,277	9,117	9,013	8,941	8,887	8,845	8,812	8,786	8,763	8,745	8,729	8,715	8,703	3
4	7,709	6,944	6,591	6,388	6,256	6,163	6,094	6,041	5,999	5,964	5,936	5,912	5,891	5,873	5,858	4
5	6,608	5,786	5,409	5,192	5,050	4,950	4,876	4,818	4,772	4,735	4,704	4,678	4,655	4,636	4,619	5
6	5,987	5,143	4,757	4,534	4,387	4,284	4,207	4,147	4,099	4,060	4,027	4,000	3,976	3,956	3,938	6
7	5,591	4,737	4,347	4,120	3,972	3,866	3,787	3,726	3,677	3,637	3,603	3,575	3,550	3,529	3,511	7
8	5,318	4,459	4,066	3,838	3,687	3,581	3,500	3,438	3,388	3,347	3,313	3,284	3,259	3,237	3,218	8
9	5,117	4,256	3,863	3,633	3,482	3,374	3,293	3,230	3,179	3,137	3,102	3,073	3,048	3,025	3,006	9
10	4,965	4,103	3,708	3,478	3,326	3,217	3,135	3,072	3,020	2,978	2,943	2,913	2,887	2,865	2,845	10
11	4,844	3,982	3,587	3,357	3,204	3,095	3,012	2,948	2,896	2,854	2,818	2,788	2,761	2,739	2,719	11
12	4,747	3,885	3,490	3,259	3,106	2,996	2,913	2,849	2,796	2,753	2,717	2,687	2,660	2,637	2,617	12
13	4,667	3,806	3,411	3,179	3,025	2,915	2,832	2,767	2,714	2,671	2,635	2,604	2,577	2,554	2,533	13
14	4,600	3,739	3,344	3,112	2,958	2,848	2,764	2,699	2,646	2,602	2,565	2,534	2,507	2,484	2,463	14
15	4,543	3,682	3,287	3,056	2,901	2,790	2,707	2,641	2,588	2,544	2,507	2,475	2,448	2,424	2,403	15
16	4,494	3,634	3,239	3,007	2,852	2,741	2,657	2,591	2,538	2,494	2,456	2,425	2,397	2,373	2,352	16
17	4,451	3,592	3,197	2,965	2,810	2,699	2,614	2,548	2,494	2,450	2,413	2,381	2,353	2,329	2,308	17
18	4,414	3,555	3,160	2,928	2,773	2,661	2,575	2,510	2,456	2,412	2,374	2,342	2,314	2,290	2,269	18
19	4,381	3,522	3,127	2,895	2,740	2,628	2,542	2,477	2,423	2,378	2,340	2,308	2,280	2,256	2,234	19
20	4,351	3,493	3,098	2,866	2,711	2,599	2,514	2,447	2,393	2,348	2,310	2,278	2,250	2,225	2,203	20
21	4,325	3,467	3,072	2,840	2,685	2,573	2,488	2,420	2,366	2,321	2,283	2,250	2,222	2,197	2,176	21
22	4,301	3,443	3,048	2,817	2,661	2,549	2,464	2,397	2,342	2,297	2,259	2,226	2,198	2,173	2,151	22
23	4,279	3,422	3,028	2,796	2,640	2,528	2,442	2,375	2,320	2,275	2,236	2,204	2,175	2,150	2,128	23
24	4,260	3,403	3,009	2,776	2,620	2,508	2,422	2,355	2,300	2,255	2,216	2,183	2,155	2,130	2,108	24
25	4,242	3,385	2,991	2,759	2,603	2,490	2,405	2,337	2,282	2,236	2,198	2,165	2,136	2,111	2,089	25
26	4,225	3,369	2,975	2,743	2,587	2,474	2,388	2,321	2,265	2,220	2,181	2,148	2,119	2,094	2,072	26
27	4,210	3,354	2,960	2,728	2,572	2,459	2,373	2,305	2,250	2,204	2,166	2,132	2,103	2,078	2,056	27
28	4,196	3,340	2,947	2,714	2,558	2,445	2,359	2,291	2,236	2,190	2,151	2,118	2,089	2,064	2,041	28
29	4,183	3,328	2,934	2,701	2,545	2,432	2,346	2,278	2,222	2,177	2,138	2,104	2,075	2,050	2,027	29
30	4,171	3,316	2,922	2,690	2,534	2,421	2,334	2,266	2,211	2,165	2,126	2,092	2,063	2,037	2,015	30
31	4,160	3,305	2,911	2,679	2,523	2,409	2,323	2,255	2,199	2,153	2,114	2,080	2,051	2,026	2,003	31
32	4,149	3,295	2,901	2,668	2,512	2,399	2,313	2,244	2,188	2,142	2,103	2,070	2,040	2,015	1,992	32
33	4,139	3,285	2,892	2,659	2,503	2,389	2,303	2,235	2,179	2,133	2,093	2,060	2,030	2,004	1,982	33
34	4,130	3,276	2,883	2,650	2,494	2,380	2,294	2,225	2,170	2,123	2,084	2,050	2,021	1,995	1,972	34
35	4,121	3,267	2,874	2,641	2,485	2,372	2,285	2,217	2,161	2,114	2,075	2,041	2,012	1,986	1,963	35
40	4,085	3,232	2,839	2,606	2,449	2,336	2,249	2,180	2,124	2,077	2,038	2,003	1,974	1,948	1,924	40
60	4,001	3,150	2,758	2,525	2,368	2,254	2,167	2,097	2,040	1,993	1,952	1,917	1,887	1,860	1,836	60
80	3,960	3,111	2,719	2,486	2,329	2,214	2,126	2,056	1,999	1,951	1,910	1,875	1,845	1,817	1,793	80
90	3,947	3,098	2,706	2,473	2,316	2,201	2,113	2,043	1,986	1,938	1,897	1,861	1,830	1,803	1,779	90
100	3,936	3,087	2,696	2,463	2,305	2,191	2,103	2,032	1,975	1,927	1,886	1,850	1,819	1,792	1,768	100
120	3,920	3,072	2,680	2,447	2,290	2,175	2,087	2,016	1,959	1,910	1,869	1,834	1,803	1,775	1,750	120
inf.	3,841	2,996	2,605	2,372	2,214	2,099	2,010	1,938	1,880	1,831	1,789	1,752	1,720	1,692	1,666	inf.

ANEXO B: VALORES CRÍTICOS PARA LA PRUEBA DE TUKEY (0.05)



















Tabla VI.- Valores críticos para la prueba de Tukey.
 $Q_{\alpha}(v_1, v_2)$

v_2 ↓	α ↓	v_1									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17	0.05	2.98	3.63	4.02	4.30	4.52	4.71	4.86	4.99	5.11	5.21
	0.01	4.10	4.74	5.14	5.43	5.66	5.85	6.01	6.15	6.27	6.38
18	0.05	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.82	4.96	5.07	5.17
	0.01	4.07	4.70	5.09	5.38	5.60	5.79	5.94	6.08	6.20	6.31
19	0.05	2.96	3.59	3.98	4.25	4.47	4.65	4.79	4.92	5.04	5.14
	0.01	4.05	4.67	5.05	5.33	5.55	5.73	5.89	6.02	6.14	6.25
20	0.05	2.95	3.58	3.96	4.23	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11
	0.01	4.02	4.64	5.02	5.29	5.51	5.69	5.84	5.97	6.09	6.19
24	0.05	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01
	0.01	3.96	4.54	4.91	5.17	5.37	5.54	5.69	5.81	5.92	6.02
30	0.05	2.89	3.49	3.84	4.10	4.30	4.46	4.60	4.72	4.83	4.92
	0.01	3.89	4.45	4.80	5.05	5.24	5.40	5.54	5.65	5.76	5.85
40	0.05	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.74	4.82
	0.01	3.82	4.37	4.70	4.93	5.11	5.27	5.39	5.50	5.60	5.69
60	0.05	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	4.73
	0.01	3.76	4.28	4.60	4.82	4.99	5.13	5.25	5.36	5.45	5.53
120	0.05	2.80	3.36	3.69	3.92	4.10	4.24	4.36	4.48	4.56	4.64
	0.01	3.70	4.10	4.50	4.71	4.87	5.01	5.12	5.21	5.30	5.38
∞	0.05	2.77	3.31	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	4.55
	0.01	3.64	4.12	4.40	4.60	4.76	4.88	4.99	5.08	5.16	5.23

ANEXO C: PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL RUGOSÍMETRO DIGITAL SRT-6210S

4. Measuring Procedures

4.1 Preparations for measurement

- A.** Switch on to test if the battery voltage is normal.
- B.** The instrument automatically restores conditions of the last measurement before it is turned off since these conditions are automatically stored. Meanwhile, the second line of 2 digits on display shows the groups stored in the memory. Before taking measurement, preparations have to be made and checked.
- C.** To check if the cutoff length selected is right. If not, Depress the  to select. For the recommended cutoff length, please see the table in 10.7 on page 15.
- D.** To check if the evaluation length selected is right. If not, depress the key , then  or  to select. To save and quit, just depress the key  again.
- E.** To check if the profile filter selected is right. If not, Depressing the  And not releasing it till 'FIL T' on Display. It takes about 4 seconds from starting pressing the . And then pressing key  or  key to cycle between RC, PC-RC, GAUSS, D-P or vice versa. To quit, just press any key other than  key or  key.
- F.** To check if the measurement unit selected is right. If not, depressing the key  and not releasing it till 'UNIT' on the Display. It takes about 8 seconds from starting depressing key . And then pressing  or  to switch between the metric system and the British system. To quit, just press any key other than  key or  key.
- G.** To check if the parameter selected is right. If not, depress the key  to select. This step is very important.
- H.** To clear the surface of the part to be measured;
- I.** Refer to Figure 4-1 and Figure 4-2 to place the instrument correctly, stably and reliably on the surface to be measured.
- J.** Refer to Figure 4-2, the sliding trail of the sensor must be vertical to the direction of process line of the measured surface.
- K.** Adjustable leg and sheath of sensor When the measured surface of the part is smaller than the measured surface of