



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE MECANIZADO EN EL PROCESO DE
ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE
ALUMINIO CON ELECTRODOS DE COBRE Y GRAFITO Y SU RELACIÓN
CON LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL RESULTANTE”**

AUTOR: Carlos Javier Santamaría Zambrano

TUTOR: Ing. Mg. Cristian Pérez

AMBATO - ECUADOR

2016

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En calidad de Tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE MECANIZADO EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO CON ELECTRODOS DE COBRE Y GRAFITO Y SU RELACIÓN CON LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL RESULTANTE”**, elaborado por el Señor Carlos Javier Santamaría Zambrano, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Certifico:

- El presente trabajo experimental es original del autor.
- Ha sido revisado en cada uno de sus capítulos.
- Está concluido en su totalidad y puede continuar con el trámite correspondiente.

Ambato, Noviembre de 2016

.....

Ing. Mg. Cristian Pérez

Tutor

AUTORÍA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Yo, Carlos Javier Santamaría Zambrano, portador de la C.I. 1804605184 tengo a bien indicar que los criterios, análisis, conclusiones y recomendaciones emitidos en este trabajo experimental con el tema **“ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE MECANIZADO EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO CON ELECTRODOS DE COBRE Y GRAFITO Y SU RELACIÓN CON LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL RESULTANTE”**, son de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor.

Ambato, Noviembre de 2016

EL AUTOR

.....

Carlos Javier Santamaría Zambrano

C.I. 180460518-4

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la institución

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste trabajo experimental dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Noviembre de 2016

EL AUTOR

.....

Carlos Javier Santamaría Zambrano

C.I. 180460518-4

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental realizado por el estudiante Carlos Javier Santamaría Zambrano de la carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: “ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE MECANIZADO EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO CON ELECTRODOS DE COBRE Y GRAFITO Y SU RELACIÓN CON LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL RESULTANTE”

Ambato, Enero del 2017

Para constancia firman:

.....

Ing. Mg. Segundo Espín

.....

Ing. Mg. Diego Núñez

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a mi Dios, porque me ha brindado sabiduría y bendiciones para seguir adelante en cada etapa de mi vida.

A mi Papá que desde el cielo me ha enviado sus bendiciones para salir adelante y a mi Mamá por su apoyo incondicional, consejos, motivación, esfuerzo y sacrificio a lo largo de mi vida estudiantil.

A mis hermanos por siempre apoyarme y brindarme palabras de aliento para seguir adelante en especial a mi hermana Bethy por ser mi segunda madre y a mi hermana Isabel por ser mi amiga y consejera.

A mí enamorada Graciela por su apoyo y cariño incondicional.

Carlos Javier

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida y las bendiciones recibidas, a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato en especial a los docentes que formaron parte de toda mi formación académica en la Carrera de Ingeniería Mecánica por todos los conocimientos adquiridos los cuales me han servido para formarme como profesional y como persona.

A mi tutor Ing. Mg. Cristian Pérez por su apoyo y guía en la elaboración de la investigación

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	I
AUTORÍA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	II
DERECHOS DE AUTOR.....	III
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	VI
RESUMEN EJECUTIVO	XII

CAPÍTULO I

1.1 TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	1
1.2 ANTECEDENTES	1
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	5
1.4.1 OBJETIVO GENERAL:.....	5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	5

CAPÍTULO II

2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
2.1.1 MÉTODOS NO CONVENCIONALES DE MECANIZADO	6
2.1.2 MECANIZADO POR EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN.....	7
2.1.2.1 Definición.....	7
2.1.2.2 Principios del mecanizado por electroerosión.....	8
2.1.2.3 Explicación física del fenómeno de la erosión.....	8
2.1.3 TIPOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN	10

2.1.3.1 Electroerosión por penetración.....	10
2.1.3.2 Corte por electroerosión por hilo	11
2.1.3.3 Rectificado por electroerosión	12
2.1.4 MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA POR PENETRACIÓN	12
2.1.4.1 Partes de una máquina electroerosionadora por penetración	13
2.1.5 EL GENERADOR	15
2.1.5.1 Generadores de Relajación.....	15
2.1.5.2 Generadores de impulsos transistorizados	16
2.1.5.3 Tipos de generadores transistorizados.....	17
2.1.6 FLUIDO DIELÉCTRICO	19
2.1.6.1 Tipos de dieléctricos utilizados	20
2.1.7 PARÁMETROS DE LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN	21
2.1.7.1 Tipos de impulsos.....	21
2.1.7.2 Arcos	22
2.1.8 POTENCIA Y ENERGÍA DE IMPULSO	23
2.1.9 VALOR MEDIO DE INTENSIDAD Y TENSIÓN	25
2.1.10 MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO	28
2.1.11 ELECTRODOS PARA EL MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN	31
2.1.11.1 Electrodo de grafito	31
2.1.11.2 Electrodo de cobre.....	33
2.1.12 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL (MRR)	35
2.1.13 RUGOSIDAD	36
2.1.13.1 Rugosidad media y rugosidad total.....	36
2.1.13.2 Grado de rugosidad superficial	37
2.1.13.3 Factores de los que depende la rugosidad	40
2.1.13.4 Medición de la rugosidad	40

2.2 HIPÓTESIS	42
2.3 SEÑALAMIENTO DE LAS VARIABLES DE LAS HIPÓTESIS	42
2.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE	42
2.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE	42

CAPÍTULO III

3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	43
3.1.1 DESCRIPTIVA.....	43
3.1.2 EXPLORATORIA	43
3.1.3 CORRELACIONAL.....	43
3.1.4 EXPERIMENTAL	43
3.1.5 EXPLICATIVA	43
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	44
3.2.1 POBLACIÓN.....	44
3.2.2 MUESTRA.....	44
3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	47
3.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE	47
3.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE	48
3.4 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	49
3.5 PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	49
3.5.1 Dimensionamiento de las probetas de microfundición de aluminio y electrodo	52
3.5.2 Preparación de la probeta de microfundición de aluminio.....	53
3.5.3 Selección de las herramientas de operación, dieléctrico y tipo de electrodo	55
3.5.4 Selección de parámetros de operación	58
3.5.5 Preparación de la máquina para el mecanizado	58

CAPÍTULO IV

4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS	60
--------------------------------	----

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	81
4.3 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS	93

CAPÍTULO V

5.1 CONCLUSIONES	98
5.2 RECOMENDACIONES	99
1. BIBLIOGRAFÍA.....	101
2. ANEXOS.....	104

ÍNDICE FIGURAS

Fig. 2.1: Descarga ramificada en un medio gaseoso [7].	8
Fig. 2.2: Lugar de máxima proximidad entre el electrodo y la pieza [8].	9
Fig. 2.3: Tipos de mecanizado por electroerosión [9].	10
Fig. 2.4: Electroerosión por penetración [10].	10
Fig. 2.5: Corte por electroerosión por hilo [10].	11
Fig. 2.6: Rectificado por electroerosión [10].	12
Fig. 2.7: Partes de una máquina de electroerosión [11].	13
Fig. 2.8: Generador Lazarenko circuito [12].	16
Fig. 2.9: Función conceptual de un generador [13].	16
Fig. 2.10: Función conceptual de un generador [13].	17
Fig. 2.11: Generador isofrecuencial de baja tensión de encendido [13].	18
Fig. 2.12: Generador isofrecuencial de alta tensión de encendido [13].	19
Fig. 2.13: Impulso vacío [14].	21
Fig. 2.14: Impulso en cortocircuito [14].	22
Fig. 2.15: Tensión y corriente continuas aplicadas a una resistencia [15].	23
Fig. 2.16: Potencia y energía de impulso [16].	24
Fig. 2.17: Corriente continua [16].	25
Fig. 2.18: Valor medio de la tensión y la intensidad [16].	26
Fig. 2.19: Intensidad media con diferentes tipos de impulsos [16].	28
Fig. 2.20: Perfil real de una pieza mecanizada [21].	36
Fig. 2.21: Perfil de una pieza [21].	37

Fig. 2.22: Rugosímetro MITUTOYO SJ 210. [25]	41
Fig. 2.23: Rugotest [26].	41
Fig. 3.1: Diagrama de flujo para operación de electroerosión por penetración	51
Fig. 3.2: Diseño del electrodo.	52
Fig. 3.3: Diseño de la probeta	53
Fig. 3.4: Corte de la probeta	54
Fig. 3.5: Diseño que se va erosionar	54
Fig. 3.6: Numeración de las probetas	54
Fig. 3.7: Máquina electroerosionadora Chevalier DM-540. Taller de ingeniería del acero y matriceria.	55
Fig. 3.8: Electroodos de grafito	57
Fig. 3.9: Electroodos de cobre	57
Fig. 3.10: Medición de probetas mediante Rugosímetro Mitutoyo SJ210	59
Fig. 4.1: Rugosidad superficial obtenida con electrodos de grafito y cobre en probeta de microfundición de aluminio	81
Fig. 4.2: Comportamiento de la rugosidad bajo condiciones de la tabla 4.2	84
Fig. 4.3: Comportamiento de la rugosidad bajo condiciones de la tabla 4.3	85
Fig. 4.4: Comportamiento de la rugosidad bajo condiciones de la tabla 4.4	86
Fig. 4.5: Tiempos de mecanizado de las diferentes probetas	87
Fig. 4.6: Comportamiento de la rugosidad vs el tiempo de mecanizado con electrodo de grafito.	88
Fig. 4.7: Comportamiento de la rugosidad vs el tiempo de mecanizado con electrodo de cobre.	89
Fig. 4.8: Comportamiento del amperaje vs el tiempo de mecanizado.	90
Fig. 4.9: Comportamiento de la rugosidad en función del amperaje de acabado y tiempo de mecanizado con electrodos de grafito y cobre en el mecanizado en electroerosión por penetración en microfundición de aluminio.	91
Fig. 4.10: Distribución T-Student [28].	95
Fig. 4.11: Campana de la distribución t-Student.	97
Fig. 1: Comparación de la rugosidad superficial en desbaste vs el tipo de electrodo	112
Fig. 2: Comparación de la rugosidad superficial en desbaste vs el amperaje	113
Fig. 3: Tiempos de mecanizado de las diferentes probetas en desbaste	114

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1: Procesos de mecanizado no convencionales	7
Tabla 2.2: Composición química de la aleación de aluminio	29
Tabla 2.3: Propiedades físicas de la aleación de aluminio	30
Tabla 2.4: Propiedades físicas de la aleación de aluminio	30
Tabla 2.5: Propiedades de los electrodos	34
Tabla 2.6: Grados de rugosidad superficial.....	37
Tabla 2.7: Valores típicos de rugosidad superficial	38
Tabla 2.8: Procesos de mecanizado, rango de rugosidad y valores de cut-off.....	39
Tabla 3.1: Valores de rugosidad superficial promedio	45
Tabla 3.2: Número de parámetros variables para la realización del experimento	46
Tabla 3.3: Operacionalización de variable independiente	47
Tabla 3.4: Operacionalización de variable dependiente.....	48
Tabla 3.5: Parámetros de operación en electroerosión.....	58
Tabla 4.1: Valores de rugosidad superficial promedio obtenidos en el mecanizado de electroerosión por penetración con electrodos de grafito y cobre	81
Tabla 4.2: Parámetros de operación utilizados para el mecanizado por electroerosión por penetración a 6 amperios	84
Tabla 4.3: Parámetros de operación utilizados para el mecanizado por electroerosión por penetración a 5 amperios	85
Tabla 4.4: Parámetros de operación utilizados para el mecanizado por electroerosión por penetración a 4 amperios	86
Tabla 4.5: Tiempo de mecanizado en electroerosión por penetración.....	87
Tabla 4.6: Tiempo de mecanizado en electroerosión por penetración en función de los amperajes.....	89
Tabla 4.7: Parámetros óptimos en el mecanizado en electroerosión por penetración.	92
Tabla 4.8: Rugosidad promedio obtenida en este estudio	95
Tabla 1: Valores de rugosidad superficial promedio obtenidos en el mecanizado de electroerosión por penetración en desbaste con electrodos de grafito y cobre	112
Tabla 2: Parámetros de operación utilizados para el mecanizado por electroerosión por penetración en desbaste	113
Tabla 3: Tiempo de mecanizado en electroerosión por penetración en desbaste	114

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo experimental tiene como objetivo principal: estudiar los parámetros que influyen en la rugosidad superficial resultante en el mecanizado por el proceso de electroerosión por penetración en microfundición de aluminio con electrodos de grafito y cobre para minimizar la misma, para lo cual en una probeta de microfundición de aluminio de 72 x 60 x 12 mm de longitud, se mecanizó con electrodos de grafito y cobre de 25.4 mm de diámetro y 50 mm de longitud, 9 probetas se mecanizaron con electrodos de grafito y 9 con electrodos de cobre, en total 18 probetas, se utilizó como fluido dieléctrico diésel.

La máquina en la cual se realizó el mecanizado fue una máquina electroerosionadora marca Chevalier modelo DM-540.

El proceso de desbaste y acabado por electroerosión de la microfundición de aluminio se realizó con electrodos de grafito y cobre para lo cual se seleccionó los parámetros adecuados para minimizar la rugosidad superficial como son: Nivel de intensidad (amperaje), tiempo de impulso, profundidad de corte y el tipo de electrodo.

Finalmente se midió la rugosidad superficial (Ra) obtenida en las probetas mecanizadas con un rugosímetro Mitutuyo SJ210 bajo la norma ISO 1997, con lo cual se pudo determinar que el nivel de rugosidad es menor con electrodo de cobre que con electrodo de grafito, a medida que el amperaje disminuye la rugosidad también disminuye, el tiempo de impulso debe ser mayor para el desbaste y menor para el acabado, bajo estas condiciones la menor rugosidad obtenida con electrodo de grafito es de 3,593 μm y la menor rugosidad obtenida con electrodo de cobre es de 1,996 μm con lo cual genera un porcentaje de mejora considerable de 34,44%.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

“ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE MECANIZADO EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO CON ELECTRODOS DE COBRE Y GRAFITO Y SU RELACIÓN CON LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL RESULTANTE”

1.2 ANTECEDENTES

El presente proyecto toma como punto de partida para su desarrollo cuatro trabajos realizados: dos tesis previas y dos líneas de investigación en diferentes universidades, en el área de ingeniería.

En la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones de la Universidad de Cantabria de España, se realizó un trabajo de fin de grado con el tema de, “Optimización del proceso de electroerosión”, en mayo de 2014. En donde se concluye que: Al realizar una serie de ensayos en una máquina de electroerosión por penetración, para la optimización de los diferentes parámetros se determinó que los más importantes parámetros son: la intensidad de descarga, los tiempos que intervienen en el proceso como el tiempo de impulso, el tiempo de trabajo, entre otros parámetros con el fin de reducir los tiempos de trabajo, el costo que representa y el desgaste de las herramientas a utilizar [1].

Otro estudio realizado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de México, como trabajo de maestría en ingeniería bajo el tema “Diseño de un generador de pulsos para un sistema de microfactura por electroerosión”, en agosto de 2013. En donde el autor concluye que: el diseño de un generador electrónico para la generación de descargas eléctricas y su aplicación en el sistema de electroerosión, se basa en el desarrollo un prototipo electrónico con el cual identifiqué los parámetros que influyen en dicho sistema, seguido de pruebas de funcionamiento para fijar los

límites de operación del sistema. Se obtuvo un prototipo electrónico funcional capaz de realizar micro manufactura EDM por penetración el cual permite controlar la energía del proceso. Se identificaron sus parámetros de operación, como intensidad, tiempos de operación entre otros, habilitándolo para operar durante tiempos prolongados de maquinado sin presentar síntomas de malfuncionamiento o sobrecalentamiento [2].

En la Universidad de Holguín se desarrolló un Paper bajo el tema de, “Análisis multivariable en el sistema de corte Electro abrasivo por hilo para su aplicación en un sistema CAPP”, en septiembre de 2014. Donde el autor concluye que: La variable más relevante para la evaluación es la rugosidad superficial en donde determinó los parámetros adecuados para el mecanizado con lo cual obtendría una buena calidad superficial. Para ello utilizó como base la Planificación de Procesos Asistido por Computadora (CAPP), para tener un enlace entre el Diseño Asistido por Computadora (CAD) y la Manufactura Asistida por Computadora (CAM), con esto permitiría garantizar piezas con una vida útil deseada optimizando tiempos de fabricación y ahorro de material [3].

En la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, se desarrolló una revista con el tema de, “Estudio y diseño de una fuente eléctrica para aplicaciones de electroerosión”, en noviembre de 2015, en donde se concluye que: La industria exige altos niveles de eficiencia en el proceso de mecanizado de metales, además de bajos niveles de rugosidad y un reducido espacio, lo cual no se ha satisfecho. Propone como solución para el mecanizado de materiales metálicos, una fuente eléctrica resonante, la cual se emplea en el proceso denominado mecanizado por descarga eléctrica (EDM). La fuente se compone de tres etapas: una de alimentación DC, un inversor resonante y un circuito eléctrico que emula la descarga eléctrica en el dieléctrico. Además concluye que para obtener bajos niveles de rugosidad se deben tomar en cuenta diferentes parámetros como son: nivel de intensidad, tiempo de impulso y el tipo de materiales a utilizar [4].

Los trabajos antes mencionados son de gran ayuda ya que fueron el punto de partida para conocer los parámetros de operación en el mecanizado en electroerosión por

penetración que intervienen en la rugosidad superficial, además estos trabajos aportaron los valores iniciales de operación para poder realizar los ensayos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La electroerosión es un método de mecanizado de materiales, que se enmarca dentro de los procesos de mecanizado no convencionales, de reciente aparición y de poca aplicación en el ámbito local, por lo que los parámetros característicos implicados en el proceso como son la velocidad de avance y la intensidad de corriente aplicada deben ser estudiados a fondo con el fin de optimizar tiempos de operación y mejorar la calidad de los productos obtenidos en el proceso [5].

En la actualidad existen dos tipos principales en el mecanizado por electroerosión como son: Electroerosión por penetración y por hilo. Para este análisis se utilizará la electroerosión por penetración debido a que es la de mayor aplicación en el medio. En electroerosión por penetración la herramienta empleada para el mecanizado de los materiales es denominada electrodo, siendo los materiales de electrodo más comunes el grafito y el cobre. Las cavidades generadas por electroerosión por penetración están directamente relacionadas con la geometría del electrodo empleado para su mecanizado, puesto que la geometría de la cavidad representará el negativo correspondiente al electrodo en la pieza, lo cual estará en directa dependencia con los parámetros de mecanizado aplicados ya que al no ser estos los adecuados se podrían obtener resultados no deseados, mala calidad superficial en los elementos resultantes y la pérdida tanto de material como de electrodos.

El estado superficial en electroerosión no es unidireccional como en otros procesos, sino multidireccional. Es por ello que la rugosidad superficial es un factor muy importante de estudio debido a que se deben analizar los parámetros que influyen en la rugosidad para que esta se minimice, obteniendo además menores tiempos de trabajo y por consiguiente la optimización de los recursos utilizados.

El material empleado para el estudio será el aluminio, ya que es de muy amplia utilización en el medio local para la fabricación de matrices a partir de microfundición de aluminio, por ello los parámetros de mecanizado para este material son muy importantes debido a que este es un material delicado y de costo elevado, además de que la aplicación de éste en matrices requiere una buena calidad superficial.

La utilidad de este proyecto es amplia debido que al obtener los parámetros de mecanizado adecuados se podrán elaborar distintos elementos en serie ya que los parámetros de operación influyen en el acabado superficial y se podrá regular la máquina para que el elemento resultante tenga bajos niveles de rugosidad.

El análisis de los parámetros de mecanizado en el proceso de electroerosión por penetración es factible realizar ya que se cuenta con requerimientos necesarios para su ejecución, se cuenta con citas bibliográficas, y la máquina electroerosionadora, también se cuenta con el personal calificado con conocimiento del tema y experiencia de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato y los conocimientos adquiridos durante la Carrera de Ingeniería Mecánica.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL:

- Determinar los parámetros óptimos de mecanizado en electroerosión por penetración en microfundición de aluminio para minimizar la rugosidad superficial.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Establecer los parámetros que influyen en el mecanizado en electroerosión por penetración así como el rango de rugosidad superficial que debe tener un elemento mediante este proceso de mecanizado.
- Identificar las propiedades mecánicas y físicas de los electrodos de grafito y cobre, así como establecer sus dimensiones para mecanizado en electroerosión por penetración.
- Realizar ensayos de mecanizado en electroerosión por penetración en microfundición de aluminio para diferentes parámetros de operación.
- Medir la rugosidad superficial obtenida para cada uno de los ensayos realizados utilizando un rugosímetro y verificar que se encuentre en un rango aceptable con el fin de establecer los parámetros óptimos de operación.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN

2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1.1 MÉTODOS NO CONVENCIONALES DE MECANIZADO

La industria metalmecánica ha utilizado por años los procesos mediante la acción de una herramienta para la remoción de material como es el caso del torneado, fresado y taladrado, debido al amplio tiempo de utilización se obtuvo un perfeccionamiento de su técnica y maquinaria, con lo cual se logró la reducción de tiempos de producción en el sector.

En la actualidad se ha dado un gran incremento en la demanda de elementos que poseen ángulos y cavidades los cuales son difíciles de diseñar, los cuales no se podían alcanzar con los métodos convencionales de mecanizado, por lo cual se desarrolló nuevas técnicas para la remoción de material en la industria, dichas técnicas facilitarían la manipulación de los metales y la creación de elementos con altos grados de dificultad, y que además no generen un impacto negativo en las propiedades físicas del material.

Debido a esta razón, se desarrolló diferentes métodos de trabajo con la evolución de la remoción de material mediante herramientas de corte, conocidos como mecanizados no convencionales, estos realizan la remoción del material sin que la herramienta entre en contacto directo sobre la parte que se va a mecanizar, con ello sin afectar la dureza y tenacidad del metal se logra obtener piezas con formas y ángulos más definidos.

La clasificación de los procesos de mecanizado no convencional como se observa en la tabla 2.1 se da en base al tipo de energía que se va utilizar como puede ser mecánica, química o térmica, es decir se clasifica en tres grupos que en la actualidad en las industrias como la electrónica, militar y aeroespacial se obtienen elementos de óptima calidad.

Tabla 2.1: Procesos de mecanizado no convencionales

Mecanizados No Convencionales		
Mecánico	Térmico	Químico
Ultrasonido	Haz de electrones	Electro-químico
Chorro abrasivo	Electroerosión	

Fuente: [6]

2.1.2 MECANIZADO POR EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN

2.1.2.1 Definición

El proceso de electroerosión se puede definir como el arranque de material mediante el uso de descargas eléctricas que se producen entre un electrodo el cual es la herramienta de trabajo y el elemento a mecanizar, todo esto efectuado en un medio dieléctrico.

Según los regímenes de mecanizado la chispa tiene una duración corta y durante la electroerosión la temperatura puede alcanzar hasta decenas de miles de grados centígrados ya que se da un gran incremento de la misma.

Debido a que la rapidez de la chispa no es favorable a la propagación del calor por conducción a través de todo el volumen del elemento, se da una concentración del efecto térmico solo en un volumen muy reducido de material, cuyo resultado genera la fusión y en ocasiones la evaporación de dicho volumen de material.

Una vez que se produce la descarga eléctrica en un medio dieléctrico se obtiene un cráter de forma semiesférica en el elemento, cuyo volumen depende de diferentes factores como son el tipo de dieléctrico utilizado, la energía y el tiempo de descarga, las propiedades físicas y la naturaleza tanto del material del electrodo y del elemento a erosionar.

Los efectos de la chispa que se producen cuando el dieléctrico utilizado es líquido como son el caso de los aceites son mayores si las descargas se producen en un medio gaseoso.

Al observar la figura 2.1 se puede notar que el resultado es lógico debido a que la descarga en un medio gaseoso se ramifica, mientras que al efectuar la descarga en un medio líquido impide que se ramifique ya que concentra su efecto sobre el elemento.



Fig. 2.1: Descarga ramificada en un medio gaseoso [7].

Por ello es muy importante que el medio en el que se encuentra el electrodo y el elemento sea dieléctrico es decir que tenga baja conductividad eléctrica, para que así se produzca una descarga en forma de avalancha, con lo que se logrará efectos más adecuados.

2.1.2.2 Principios del mecanizado por electroerosión

El mecanizado por electroerosión se basa principalmente en dos de sus propiedades.

- a) Mediante este proceso se puede mecanizar aceros, metales o aleaciones duras o refractarias que muchas veces no son aptas para ser mecanizadas por procesos convencionales de arranque de viruta, debido a que en este proceso el arranque del material depende de sus propiedades térmicas y eléctricas y no de sus propiedades mecánicas. Por lo que este proceso permite siempre y cuando los materiales sean suficientemente conductores el mecanizado de los aceros templados y en general.

- b) La gran aptitud de este proceso para realizar formas complejas es otro principio fundamental, debido a que el electrodo que se utiliza el cual normalmente es cobre o grafito se puede mecanizar en cualquier tipo de geometría, ya que la misma geometría del electrodo reflejará la forma en el elemento.

2.1.2.3 Explicación física del fenómeno de la erosión

Como se menciona anteriormente, el mecanizado por electroerosión se produce mediante el salto de descargas eléctricas entre el electrodo y el elemento a erosionar

las cuales deben estar sumergidas en un medio dieléctrico y sometido a una determinada tensión.

Existen diversos fenómenos que se producen al momento de la descarga y cuando se da el arranque del material del elemento los cuales son de gran complejidad debido a que las circunstancias que concurren en su observación son muy críticas.

El tiempo de duración de la descarga eléctrica como se menciona anteriormente varía entre microsegundos y milisegundos, así como las distancias interelectródicas van de unas centésimas o quizá alguna décima de milímetro.

Para una mejor comprensión sobre el desarrollo de la descarga eléctrica, es preferible situarse en el nivel microscópico en que esto se produce.

Debido a la rugosidad natural que presentan los materiales y tomando en cuenta el poco espacio entre el electrodo y el elemento, las variaciones de cota entre los materiales representan variaciones de aproximación del orden de un 20% a un 40% respecto del plano medio de dichas superficies.

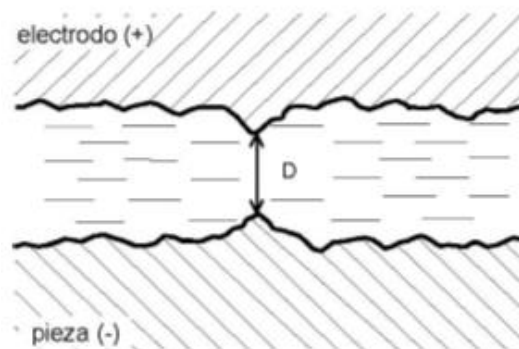


Fig. 2.2: Lugar de máxima proximidad entre el electrodo y la pieza [8].

Con el paso del tiempo y debido a que la intensidad del campo eléctrico aumenta con la proximidad entre el electrodo y la pieza (“D” como se observa en la figura 2.2), habrá un momento en el que se supere la tensión de disrupción del dieléctrico que los separa, formándose un canal de alta conductividad lo que dará origen a la formación de la chispa.

2.1.3 TIPOS DE MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN

Los diferentes tipos de mecanizado por electroerosión se dan de acuerdo a la forma del electrodo y el movimiento relativo del mismo, con lo cual se presentan las siguientes subdivisiones dentro del concepto general de mecanizado por electroerosión como se puede observar en la figura 2.3.

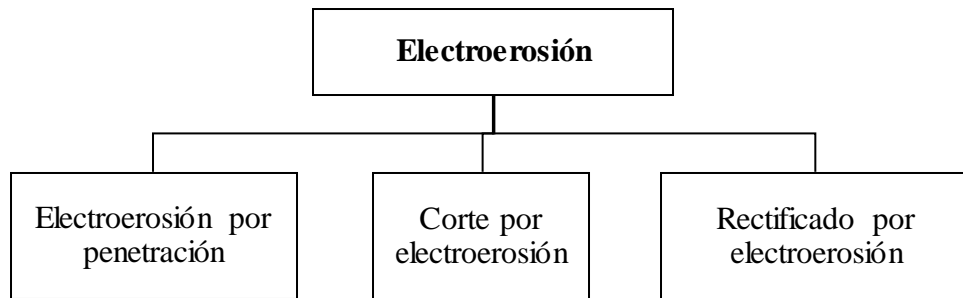


Fig. 2.3: Tipos de mecanizado por electroerosión [9].

2.1.3.1 Electroerosión por penetración

La electroerosión por penetración es la más universal. Consiste en el avance continuo, y servocontrolado de un electrodo que es la herramienta que penetra en el elemento a erosionar en presencia de un líquido dieléctrico.

Se puede obtener diferentes formas de geometrías complicadas, dependiendo de la forma del electrodo y la profundidad que se de en la erosión del elemento como se puede observar en la figura 2.4.

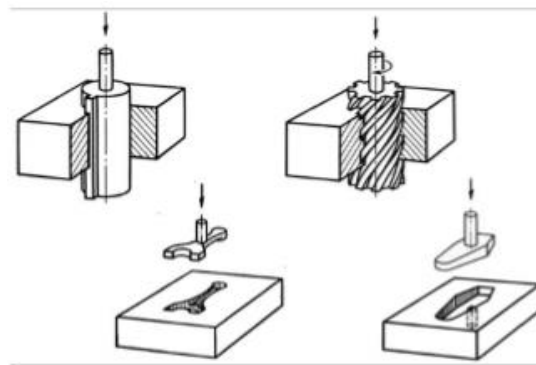


Fig. 2.4: Electroerosión por penetración [10].

El aceite mineral es el líquido dieléctrico actualmente más utilizado en la electroerosión por penetración, aunque también depende de la máquina electroerosionadora ya que algunas funcionan con agua u otros líquidos especiales.

2.1.3.2 Corte por electroerosión por hilo

Otro tipo de mecanizado es el corte por electroerosión por hilo el cual se diferencia de la electroerosión por penetración en que la forma del electrodo no influye directamente en la forma del elemento a obtener, debido a que no se obtiene una copia de la forma del electrodo sino solo se quiere realizar un corte en el elemento.

Debido a que en este tipo de mecanizado el electrodo tiene la forma de un hilo su costo se reduce de manera considerable ya que no necesita ser mecanizado, esto hace que sea muy accesible en el mercado, como se indica en la figura 2.5 el electrodo tiene la forma de hilo y es utilizado para realizar cortes.

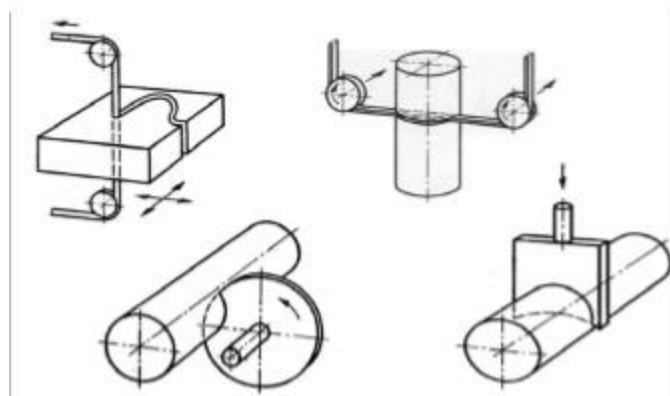


Fig. 2.5: Corte por electroerosión por hilo [10].

El diámetro del hilo es pequeño, puede ir de 0,25 o 0,3 mm., sin embargo estos diámetros se pueden reducir hasta valores de 0,025 mm los cuales son utilizados en aplicaciones de micromecánica, un CNC controla el movimiento relativo entre el hilo y el elemento.

El dieléctrico más utilizado en este tipo de electroerosión es el agua desionizada, aunque existen máquinas que utilizan aceite.

Las ventajas de la electroerosión por hilo son las siguientes:

- Rapidez, ya que el electrodo no es mecanizado.
- El desgaste del hilo no influye en la precisión de los elementos, al estar el hilo animado de un movimiento de desplazamiento que permite que la zona ya desgastada vaya reponiéndose en modo continuo.

2.1.3.3 Rectificado por electroerosión

En este tipo de electroerosión el electrodo tiene un movimiento de rotación, por lo que este tipo de mecanizado es similar a una operación de rectificado convencional, con la diferencia que el arranque del material se realiza sin contacto directo entre el electrodo y el elemento mediante descargas eléctricas como se observa en la figura 2.6. El campo de aplicación de este tipo de máquina es muy reducido.

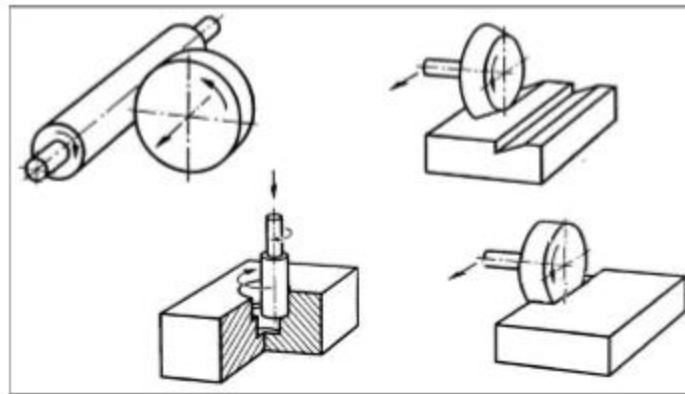


Fig. 2.6: Rectificado por electroerosión [10].

2.1.4 MÁQUINA ELECTROEROSIONADORA POR PENETRACIÓN

Las primeras máquinas electroerosionadoras eran en su totalidad por penetración, con el paso de los años y el avance de la tecnología surgieron las primeras máquinas de corte por hilo a finales de los años setenta.

La principal diferencia en los dos tipos de máquinas es el tipo de electrodo-herramienta ya que en las máquinas por penetración el electrodo tiene una forma tridimensional y puede ser mecanizado con diferentes tipos de geometría y al ser erosionado generan una cavidad tridimensional en el elemento, mientras que en las máquinas por hilo el electrodo tiene forma de un alambre el cual va cortando el elemento según las especificaciones deseadas.

Es por esta diferencia que tanto la estructura de la máquina como el número de ejes e incluso el dieléctrico empleado sean diferentes en cada tipo de máquina, sin embargo las partes básicas son las mismas en ambos tipos de máquina.

2.1.4.1 Partes de una máquina electroerosionadora por penetración

En una máquina de electroerosión por penetración las partes fundamentales son las siguientes:

- Un armazón o bancada, la cual soporta las diferentes partes de la máquina.
- La mesa de trabajo, en la cual se realiza las diferentes operaciones de mecanizado.
- La unidad de filtrado, con el sistema de circulación de dicho líquido, su filtrado, enfriamiento, etc.
- El generador de impulsos, el mismo que puede estar incorporado en la bancada, pero que normalmente se halla en un armario aparte, y se sitúa al lado de la máquina.
- Una unidad de CNC, que permite unos muy elevados niveles de automatización, aunque tales unidades pueden no estar incorporadas en todas las máquinas.

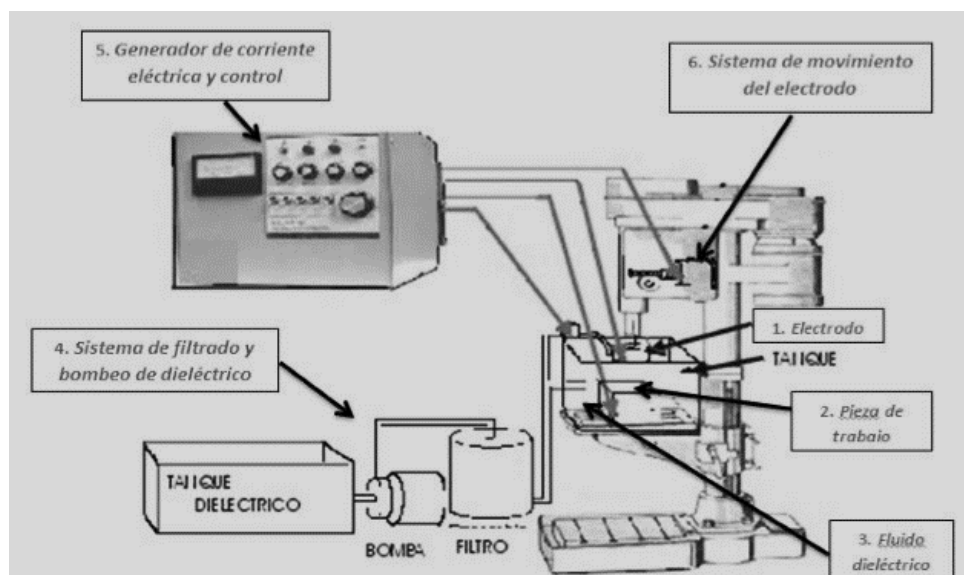


Fig. 2.7: Partes de una máquina de electroerosión [11].

2.1.4.1.1 Armazón

Es básicamente el esqueleto de la máquina. Puede tener formas diferentes pero su función es servir de base y sujeción a todos los elementos y dispositivos utilizados para la electroerosión. En las máquinas de penetración soporta al sistema portaelectrodos y la mesa de trabajo con el tanque para el fluido dieléctrico.

El generador normalmente está separado en un armario que está junto a la máquina. Esto se ha realizado debido a que si el generador no está separado puede generar calor y por ende puede producirse distorsiones mecánicas debido a que el generador presenta un gran número de variantes para poder alimentar a la máquina.

2.1.4.1.2 El cabezal

En una máquina de electroerosión por penetración el cabezal es un elemento esencial, debido a que en dicho elemento se encuentra todo el sistema de mecanizado automático.

El servosistema de control que actúa sobre el portaelectrodos es su parte principal, la rigidez de estos elementos es muy cuidada debido a que de esto depende el desplazamiento vertical del electrodo, el cual es siempre sobre el mismo eje.

El gap que es la distancia entre el electrodo y el elemento a erosionar se mantiene constante gracias al servosistema de control. Si el gap aumenta a consecuencia del desgaste del electrodo y el elemento se separa el electrodo del elemento. El nivel de intensidad de la descarga y el tiempo de impulso son los que determinan la velocidad de arranque de material y el desgaste que se produce.

2.1.4.1.3 Mesa de trabajo

Dependiendo de la construcción de la máquina y mediante el sistema de coordenadas puede ser que el elemento móvil sea la mesa o exista desplazamiento entre el electrodo y el elemento. El elemento a electroerosionarse debe ser fijado en la mesa de trabajo para su mecanización.

La precisión del recorrido del portaelectrodos es de algunas micras en el total de su carrera y la precisión de desplazamiento relativo entre la mesa y el electrodo es del orden de 0,01 mm; en carreras de unos 350 mm, debido a que las máquinas de electroerosión por penetración se pueden considerar como semipunteadoras.

El tanque de trabajo en el cual se llena el líquido dieléctrico se encuentra envolviendo a la mesa de trabajo para efectuar el mecanizado, el volumen del tanque depende del tamaño del elemento que se va a mecanizar y la potencia que tiene el generador.

2.1.4.1.4 Unidad de filtrado

Mediante la unidad de filtrado se puede retirar los residuos del material arrancado del líquido dieléctrico durante el proceso de electroerosión.

Esta unidad tiene los dispositivos necesarios para que el líquido llegue al tanque de trabajo con lo cual se podrá ejecutar la limpieza de la zona de trabajo, ya que posee los elementos necesarios para su función principal que es la filtración.

2.1.5 EL GENERADOR

Uno de los elementos fundamentales en la máquina de electroerosión por penetración es el generador. Con el paso del tiempo se han ido desarrollando diversos tipos. Principalmente se pueden distinguir dos grandes grupos:

- Generadores de relajación.
- Generadores de impulsos transistorizados.

Los impulsos o descargas erosivas son proporcionados por el generador tiene como finalidad generar la tensión necesaria para el encendido de la descarga eléctrica además para su mantenimiento, la tensión depende de la pareja de metales del electrodo y el elemento y es independiente de la corriente de la descarga.

Otra función del generador es limitar la corriente de la descarga así como imponer el tiempo que va a durar y la frecuencia con la que se da las descargas.

2.1.5.1 Generadores de Relajación

Se denomina “Circuito Lazarenko” nombre atribuido por los investigadores que lo desarrollaron es el primer circuito generador de descargas eléctricas en la electroerosión.

El elemento principal en el circuito Lazarenko que es muy simple es un condensador el cual es alimentado por medio de una fuente de corriente a través de una resistencia como se observa en la figura 2.8.

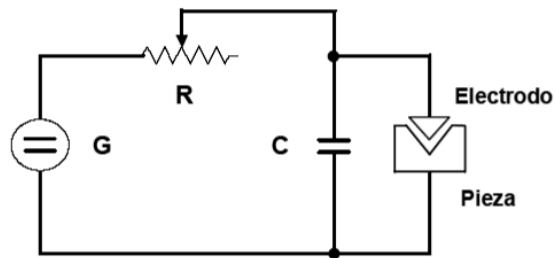


Fig. 2.8: Generador Lazarenko circuito [12].

En este circuito el condensador está conectado al electrodo y la pieza en paralelo, para que la tensión en los extremos del condensador supere a la tensión de disrupción del dieléctrico, el cual está situado entre el electrodo y pieza, éste se ionizará y la energía almacenada en el condensador se descargará bruscamente por el canal de descarga abierto en el dieléctrico, en la zona de erosión.

2.1.5.2 Generadores de impulsos transistorizados

Este tipo de generadores pretende pulsar la corriente de descarga es por ello que en 1959 se presenta en París el primer generador de impulsos transistorizados, el cual posee diferentes variables como son:

- Tiempo de impulso (t_i)
- Tiempo de pausa (t_o)
- Intensidad del impulso (i_f)

Estos generadores están alimentados por una corriente trifásica de la red normal alterna, entre 220 ó 380 V, la salida corresponde a una serie de impulsos consecutivos, dichos impulsos son aplicados directamente a la herramienta de trabajo (electrodos), como se observa en la figura 2.9.

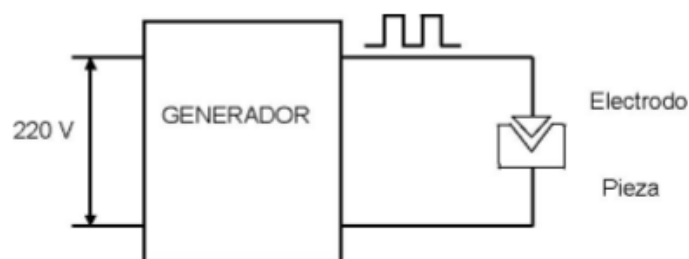


Fig. 2.9: Función conceptual de un generador [13].

2.1.5.3 Tipos de generadores transistorizados

Existen dos grupos genéricos de generadores transistorizados que se encuentran disponibles en el mercado como son:

- Generadores isoenergéticos.
- Generadores isofrecuenciales.

2.1.5.3.1 Generadores isoenergéticos

En este tipo de generadores cuando se da el total encendido de la descarga se obtiene impulsos de energía constante como se puede observar en la figura 2.10.

Al presentar una igualdad de la energía de los impulsos tiene la característica de que la rugosidad es constante.

Existe un considerable desgaste del electrodo debido a que las pausas entre cada dos impulsos pueden llegar a ser muy grande, como consecuencia de las descargas tras el encendido ya que no se considera el tiempo que se emplea para conseguirlo.

Además, disminuye ligeramente la capacidad de arranque ya que al aumentar el tiempo de duración de las pausas disminuye la frecuencia.

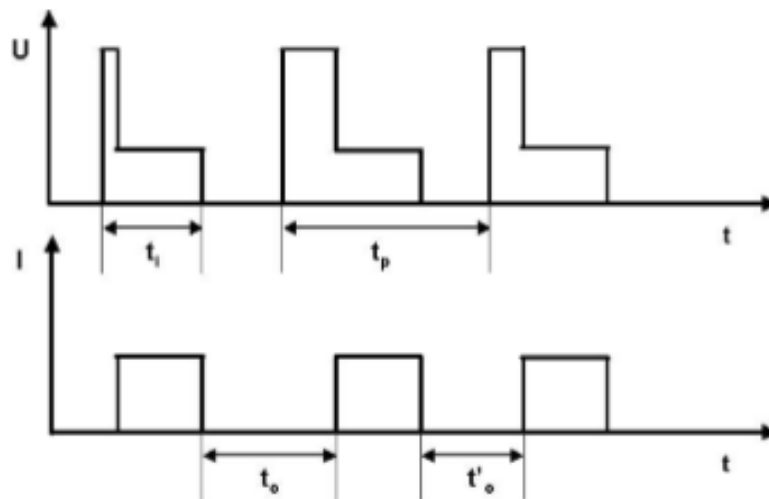


Fig. 2.10: Función conceptual de un generador [13].

2.1.5.3.2 Generadores isofrecuenciales.

La característica fundamental de estos generadores es que la frecuencia de chispeo se mantiene constante, sin que influya la duración de las pausas por el retardo del encendido de las descargas, existen dos tipos de generadores isofrecuenciales que son:

- a) Generadores isofrecuenciales de baja tensión de encendido.

Al ser un generador isofrecuencial, la frecuencia de chispeo es constante como se observa en la figura 2.11.

Un inconveniente que presenta este tipo de generador es que existe una pérdida de energía, debido al retardo en el encendido de la descarga por lo cual algunas descargas serán de menor potencia con lo cual no habrá constancia en la rugosidad de la pieza.

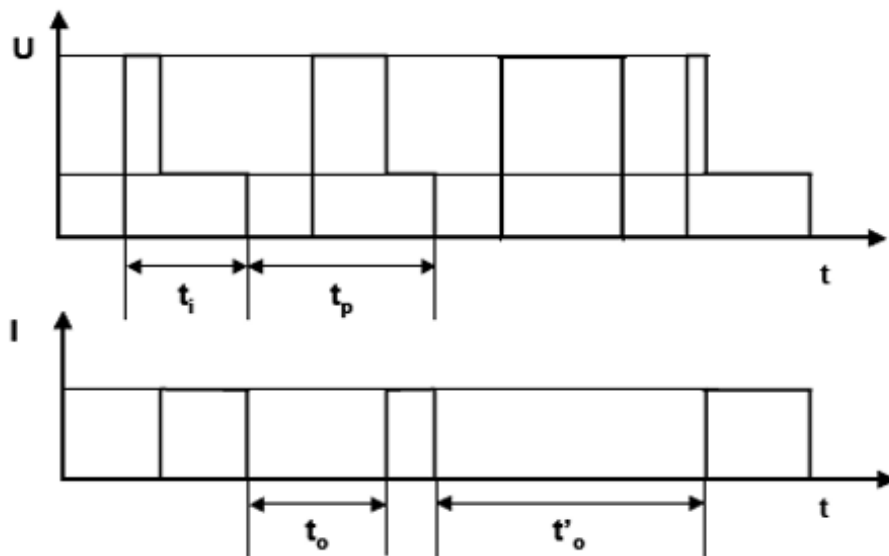


Fig. 2.11: Generador isofrecuencial de baja tensión de encendido [13].

- b) Generadores isofrecuenciales de alta tensión de encendido.

Este generador posee las características de los isofrecuenciales, y además se asemeja al trabajo realizado por los generadores de tipo isoenergético, gracias a que tiene alta tensión de encendido y por ende será más rápido, por su alta tensión el gap es mayor lo cual facilita que las partículas erosionadas sean arrastradas como se observa en la figura 2.12.

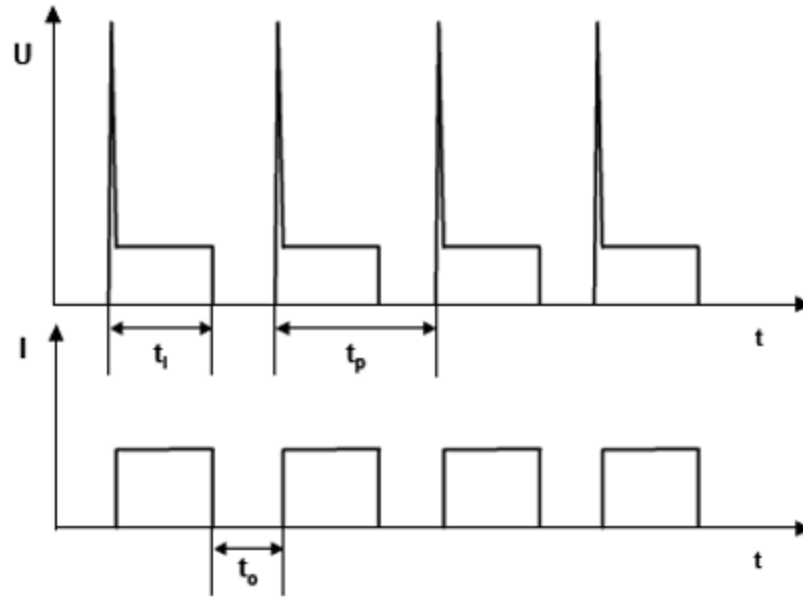


Fig. 2.12: Generador isofrecuencial de alta tensión de encendido [13].

2.1.6 FLUIDO DIELECTRICO

Es de gran importancia el fluido dieléctrico que se emplea en la electroerosión. Es por ello que se debe utilizar un dieléctrico que posea buenas características y que este sea filtrado adecuadamente.

La misión del líquido dieléctrico, que se introduce a presión en el gap (distancia entre el electrodo y el elemento a erosionar), es concentrar la descarga en un punto. Con ello se logra una capacidad de erosión muy superior a la que se daría si entre ambos electrodos hubiese un gas o aire.

La función del fluido dieléctrico es concentrar la descarga en un punto para que la erosión sea superior a la que se daría si se realiza con gas o aire. También debe actuar como aislante entre los dos electrodos. La característica eléctrica principal de un aislante es la rigidez dieléctrica.

Cuando se aumenta la tensión entre el electrodo y la pieza, se da el paso de una pequeña corriente eléctrica debido a que el líquido se ioniza. Al aumentar la ionización la resistencia eléctrica del líquido desciende bruscamente y se genera una descarga en forma de avalancha la cual caracteriza a las descargas erosivas. Luego el fluido debe desionizarse cuando se termina el impulso para que se dé la siguiente descarga.

Otra función del fluido dieléctrico es arrastrar las partículas que han sido erosionadas de la zona en la que se está trabajando y refrigerar el electrodo y la pieza.

Las características más importantes que debe tener un fluido dieléctrico son:

- Buen aislamiento eléctrico
- Reducción al mínimo de la superficie de descarga
- Buena capacidad de filtración
- Alta velocidad de ionización y desionización
- Baja viscosidad y baja tensión superficial
- Volatilidad baja
- Punto de inflamación alto
- No debe generar vapores nocivos
- Fácil adquisición

2.1.6.1 Tipos de dieléctricos utilizados

Los diferentes tipos de dieléctricos que se utilizan son los hidrocarburos, los aceites minerales y el agua.

Debido a que el dieléctrico debe tener una temperatura de inflamación alto los aceites minerales son los más adecuados debido a que esta temperatura oscila entre 120 y 150°C.

El dieléctrico debe tener baja viscosidad representada en centistokes (cSt), que es la unidad de viscosidad cinemática, es por ello que se da las siguientes recomendaciones:

- Aceites entre 1,75 Y 1,85 cSt a 20°C. Para la erosión de geometrías simples con altos requisitos de rugosidad.
- Aceites entre 2,1 Y 2,4 cSt a 20°C. Para erosionar geometrías algo más complejas manteniendo la precisión y una buena rugosidad.
- Aceites entre 2,65 y 3 cSt a 20°C. Para operaciones con intensidades de corriente media-alta, tras las cuales se requiere una buena rugosidad.
- Aceites entre 3,3 y 3,5 cSt a 20°C. Para operaciones de desbaste, con intensidades superiores a 70 A.

Por su parte el agua se utiliza solo en ciertas ocasiones la cual debe ser desmineralizada y se utiliza en micromecanizados y en general para electroerosión de corte por hilo.

2.1.7 PARÁMETROS DE LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

A continuación se verán los diferentes parámetros de la electroerosión como tipos de impulsos y la influencia de las variables eléctricas en el arranque, en el desgaste y en la rugosidad.

2.1.7.1 Tipos de impulsos

Los impulsos más comunes son los impulsos erosivos normales con los cuales se logra un mayor rendimiento. Sin embargo se pueden dar algunas variaciones bajo ciertas circunstancias con lo cual se tienen los siguientes impulsos:

2.1.7.1.1 Impulso vacío

Cuando el espacio existente entre el electrodo y el elemento en el cual se dan las descargas o gap es demasiado grande, debido a que el servo no lo ha mantenido constante se produce un impulso vacío es decir no hay descarga eléctrica como se observa en la figura 2.13.

Si se dan muchos impulsos de este tipo y debido a que los mismos no son erosivos, tiene como consecuencia bajar el rendimiento de la máquina.

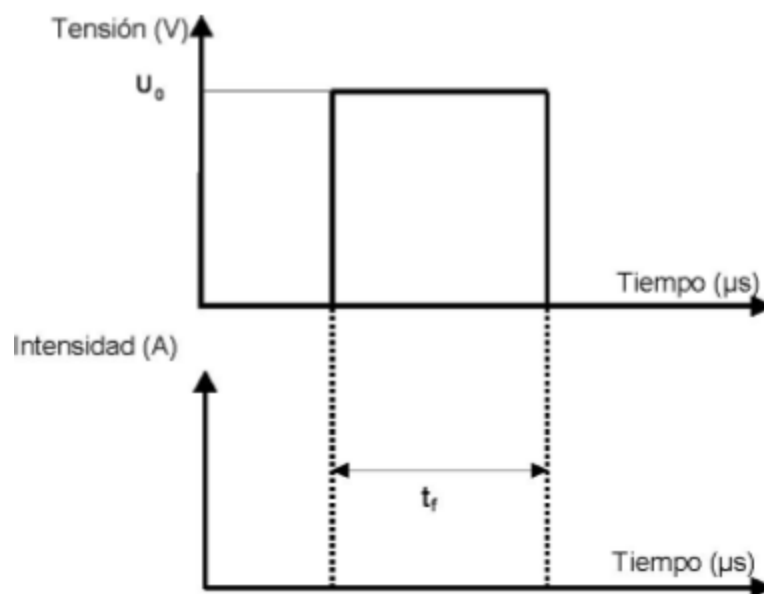


Fig. 2.13: Impulso vacío [14].

2.1.7.1.2 Impulso en cortocircuito

El impulsos en cortocircuito se produce cuando el electrodo y la pieza a erosionar se ponen en contacto, ya se directamente al chocar entre sí o bien por medio de alguna partícula arrancada del material durante la erosión, que toca a ambos elementos. Cuando ocurre esto la tensión existente se anula como se observa en la figura 2.14.

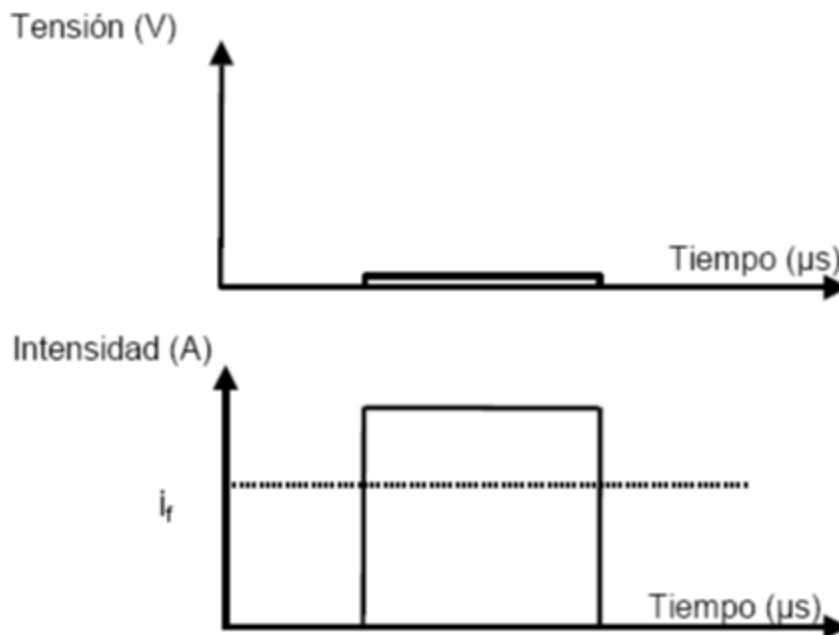


Fig. 2.14: Impulso en cortocircuito [14].

2.1.7.2 Arcos

Los arcos voltaicos se forman cuando la tensión de descarga (U_f) es menor de 20 V y esto sucede cuando el gap se hace demasiado pequeño, pero sin llegar a tocarse los electrodos lo que produce que la intensidad no es controlable.

Es por ello que la función principal del servosistema de control es mantener el gap en una distancia adecuada para que la tensión de descarga quede fijada en un valor óptimo el cual depende del tipo de máquina y del material del electrodo y el elemento a mecanizar.

Entonces el servosistema de control deberá reaccionar rápidamente acercando los electrodos cuando se produce un impulso al vacío, o alejando los electrodos si se produce impulso en cortocircuito o arcos voltaicos.

2.1.8 POTENCIA Y ENERGÍA DE IMPULSO

Durante el proceso de electroerosión la energía de los impulsos depende de una serie de parámetros eléctricos. Durante la erosión existen una multitud de factores que influyen en el proceso y hacen que éstos disten mucho de ser óptimos, es por ello que el cálculo de la energía no resulta tan inmediato como podría derivarse de las leyes básicas de la Física.

A pesar de ello, a título totalmente teórico y con el fin de facilitar la comprensión de los conceptos, se incluye a continuación un estudio sobre la potencia y energía de los impulsos.

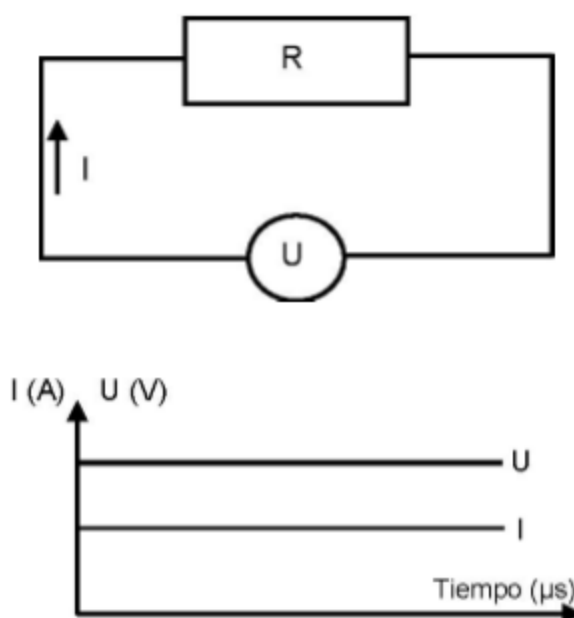


Fig. 2.15: Tensión y corriente continuas aplicadas a una resistencia [15].

En física se dice que, la potencia desarrollada por una corriente continua al paso por una resistencia como se observa en la figura 2.15, viene dada por las ecuaciones 2.1 y 2.2 según Camprubí Graell, 2007 [16].

$$P = R * I^2 = \frac{U^2}{R} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$R = U/I \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

U: Tensión aplicada medida en voltios (V)

I: Intensidad que pasa por la resistencia R medida en amperios (A).

R: Resistencia medida en ohmios Resistencia-capacitor (Ω).

P: Potencia medida en vatios (w).

Asimismo si esta corriente pasa durante un cierto tiempo, se desarrolla una energía dada por la ecuación 2.3 según Camprubí Graell, 2007 como se muestra a continuación.

$$W = P * t = R * I^2 * t = \frac{U^2 * t}{R} = U * I * t \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

W: Energía desarrollada en julios (J).

t: Tiempo (s).

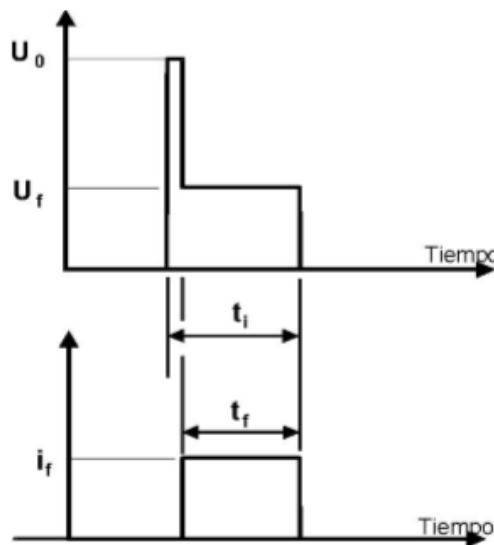


Fig. 2.16: Potencia y energía de impulso [16].

Como se observa en la figura 2.16 una descarga de duración t_f , es como una corriente continua de valor i_f con una tensión U_f que es la tensión de descarga.

Debido a las características de los generadores de alta tensión de encendido se puede suponer que $t_f \approx t_i$.

Un impulso es como una corriente continua que dura t_f (μs). La potencia y energía de impulso de dicha corriente está representada por la ecuación 2.4 y 2.5 respectivamente según Camprubí Graell, 2007.

$$P = U_f * I_f \quad \text{Ecuación 2.4}$$

La energía de un impulso es:

$$W = U_f * I_f * t_f = P * t_f \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Como se ve, la energía de los impulsos es una función directa de su potencia.

La cantidad arrancada de material en la unidad de tiempo depende de la energía del impulso. Asimismo, también la rugosidad obtenida depende de la energía del impulso. Cuanto mayor es dicha energía la rugosidad es mayor.

2.1.9 VALOR MEDIO DE INTENSIDAD Y TENSIÓN

En los generadores se ubican medidas de intensidad y tensión que no son valores reales y concretos de intensidad y tensión que se dan en los trenes de impulsos sino son valores medios.

En el paso de una corriente continua de valor I , la carga eléctrica (Q) que se mueve desde un tiempo t_1 hasta un tiempo t_2 está representada por la ecuación 2.6 según Camprubí Graell, 2007.

$$Q = I * (t_2 - t_1) \quad \text{Ecuación 2.6}$$

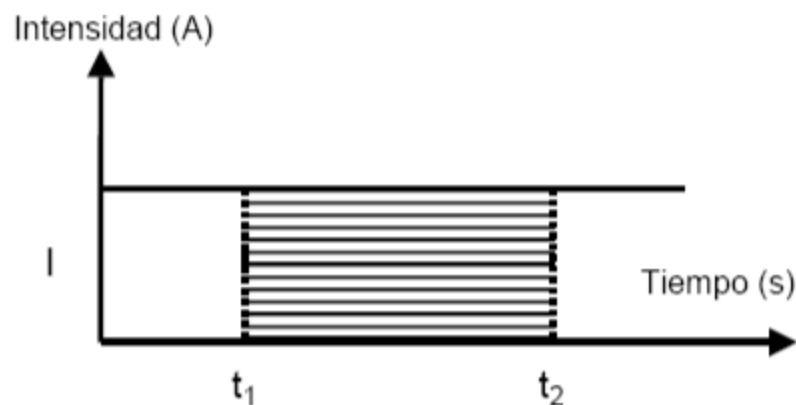


Fig. 2.17: Corriente continua [16].

Es decir, el área rayada en la figura 2.17 representa la carga eléctrica movida.

Suponiendo ahora un tren de impulsos de intensidad en el caso de la electroerosión se puede observar en la figura 2.18, lo siguiente:

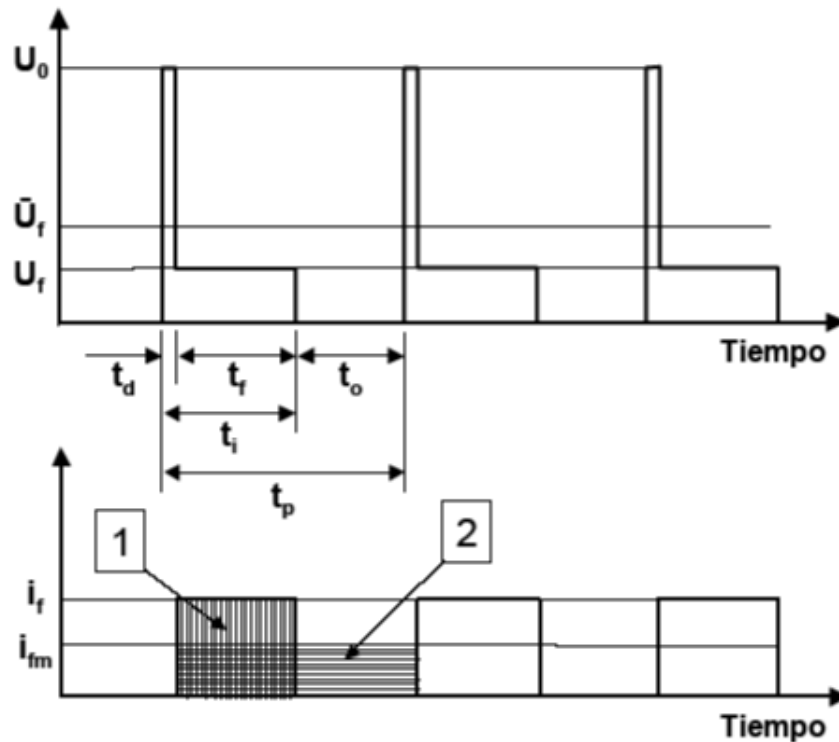


Fig. 2.18: Valor medio de la tensión y la intensidad [16].

Durante un tiempo t_f pasa una corriente i_f , luego durante el tiempo de pausa (t_o) no pasa corriente por al gap ni tampoco pasa corriente durante el tiempo de retraso del encendido (t_d). El tiempo de impulso (t_i) es el tiempo en que se producen las descargas eléctricas es decir es el tiempo en que se produce la electroerosión en el elemento a mecanizar.

Por tanto en un período (t_p) la cantidad de carga eléctrica (Q) que se mueve vendrá dada por el área contenida en el impulso de intensidad, mediante la ecuación 2.7 según Camprubí Graell, 2007.

$$Q = i_f * t_f \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Suponiendo que todos los impulsos son iguales, se define la intensidad media como una intensidad de corriente que fuese continua, de valor I_{fm} , y que durante un período moviese la misma cantidad de carga que en un impulso de intensidad i_f .

Es decir:

- Cantidad de carga del impulso en un período $Q = i_f \cdot t_f$ (área marcada 1, rayado vertical).
- Cantidad de carga de la corriente continua en un período $Q = I_{fm} \cdot t_p$ (área marcada 2, rayado horizontal).

Se le llama valor medio o intensidad media (I_{fm}) de una corriente pulsada a aquel valor con el que se cumple que las cargas recorridas por ambas corrientes, impulso rectangular (corriente pulsada) y corriente continua, son iguales (áreas iguales) y viene dada por la ecuación 2.8 según Camprubí Graell, 2007.

$$I_f \cdot t_f = I_{fm} \cdot t_p \quad \text{Ecuación 2.8}$$

El valor medio de la intensidad viene dada por la ecuación 2.9:

$$I_{fm} = I_f \cdot \frac{t_f}{t_p} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Para calcular la tensión media de trabajo se utiliza el mismo procedimiento. Igualar el área del impulso con el área de la tensión media (\bar{U}_f), durante un período t_p .

Área del impulso: $U_f \cdot t_f + U_o \cdot t_d$

Área tensión media: $\bar{U}_f \cdot t_p$

Si se igualan: $\bar{U}_f \cdot t_p = U_f \cdot t_f + U_o \cdot t_d$

Y por tanto la tensión media de trabajo será calculada mediante la ecuación 2.10:

$$U_f = \frac{U_f \cdot t_f + U_o \cdot t_d}{t_p} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Todo lo definido anteriormente sería válido si todos los impulsos fuesen iguales y normales. Sin embargo los cortocircuitos, impulsos vacíos y arcos modifican estas cantidades medias. Por ello, en ciertos momentos del proceso, se pueden dar oscilaciones en los aparatos de medida.

Se pueden tener intensidades medias iguales con muy diferentes tipos de impulsos como se observa en la figura 2.19.

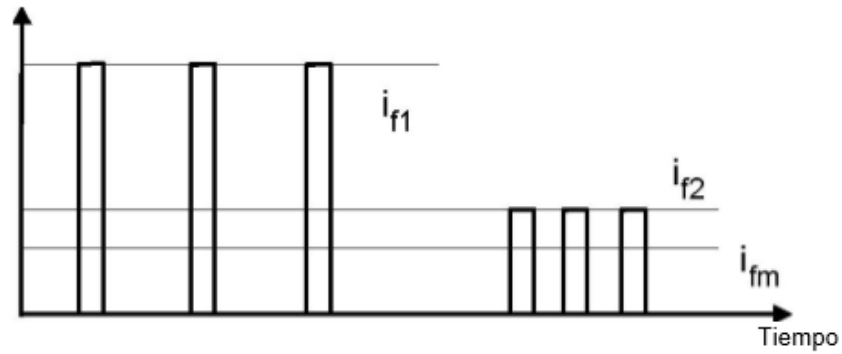


Fig. 2.19: Intensidad media con diferentes tipos de impulsos [16].

En el caso 1)

- La intensidad de impulso es alta
- El tiempo de pausa es muy grande

En el caso 2)

- La intensidad es baja.
- El tiempo de pausa es muy pequeño

Aunque en ambos casos el tiempo de impulso sea igual. El resultado presenta una intensidad media igual para ambos casos.

2.1.10 MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO

La microfundición de aluminio es un proceso por el cual se obtiene un material muy útil para la fabricación de moldes, matrices, elementos mecánicos entre otros, debido a que este material brinda la facilidad de fabricación y mecanizado de moldes de gran complejidad y texturizado. Su ventaja es la posibilidad de duplicarlos a muy bajo costo, por lo que se recomienda en la fabricación de moldes de termoformado y termosoplado.

El aluminio puro analizado desde el punto de vista físico posee una dureza y resistencia bajas por lo cual al formar una aleación con otros elementos, el aluminio adopta propiedades mecánicas idóneas para su utilización. Las aleaciones de aluminio para

fundición han sido desarrolladas debido a la necesidad de encontrar propiedades óptimas como la resistencia a la tensión, ductilidad y resistencia a la corrosión.

La microfundición genera grandes beneficios para el fabricante de moldes como son:

- Reducción del costo de la materia prima.
- Reducción de la mano de obra.
- Reducción del tiempo de mecanizado.
- Reducción en el desgaste de máquina y herramienta.
- Reducción en la pérdida de material por concepto de vaciados (virutas).

Sin embargo existen algún tipo de limitaciones en cuanto a la utilización de la microfundición de aluminio, debido a que en el proceso de microfundición cada tipo de aleación está relacionada con: el material de recubrimiento (material cerámico), que incide en la rugosidad superficial y el peso de la pieza a fundir [17].

Las siguientes tablas presentan las propiedades de la chatarra utilizada para el proceso de microfundición de aluminio en el cual se utiliza en su mayoría la aleación de aluminio 6061 y debido a que es un proceso industrial las propiedades son similares a las de dicha aleación como se muestra en las tablas 2.2, 2.3 y 2.4.

Tabla 2.2: Composición química de la aleación de aluminio

Dureza brinell: 65

Elemento	Minimo (%)	Máximo (%)
Silicio	0.4	0.8
Hierro	0	0.7
Cobre	0.15	0.4
Manganeso	0	0.15
Magnesio	0.8	1.2
Cromo	0.04	0.35
Zinc	0	0.25
Titania	0	0.15

Tabla 2.3: Propiedades físicas de la aleación de aluminio

Propiedades Físicas				Presentaciones
Densidad [gr/cm ³]*	2.7	Coef. De dilatación (0 a 100°C) [°C-1 x 10 ⁶]	23.6	Angulo
Rango de fusión [°C]	575-650	Conductividad Térmica (0 a 100 °C) [W/m °C]	Temple T6: 1.67	Canal
Modulo de elasticidad [MPa]	69500	Resistividad a 20 °C [μΩcm]	Temple T6: 4.0	Cuadrado
Coefficiente de Poisson	0.33	Calor específico (0 a 100 °C)	940	Lámina
				Placa
				Redondo
				Solera
				Tubular Redondo, Rectangular y Cuadrado

Tabla 2.4: Propiedades físicas de la aleación de aluminio

Propiedades Tecnológicas

Proceso	Clasificación
<u>Soldabilidad</u>	A
Electrón Beam	B
Gas Inerte	B
Por resistencia	B
Brazing	
<u>Maquinabilidad (T6)</u>	C
Corte de viruta	A
Brillo de Sup. mecanizada	
<u>Resistencia a la Corrosión</u>	A
Agentes atmosféricos	B
Ambiente marino	
<u>Anodizado</u>	A
Protección	C
Brillante	A
Duro	

Clasificación: (A)Muy buena - (B)Buena - (C)Aceptable - (D)Pobre o No Recomendado

Fuente: [18]

2.1.11 ELECTRODOS PARA EL MECANIZADO POR ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Los electrodos utilizados en el mecanizado de electroerosión por penetración son de diferentes materiales como son:

- Grafito
- Cobre
- Tungsteno
- Carburos cementados

Estos materiales son los que comúnmente se utilizan porque tienen una alta temperatura de fusión así como una alta conductividad eléctrica y térmica, sin embargo los electrodos más utilizados son electrodos de grafito y cobre debido a su mayor disponibilidad en el mercado.

2.1.11.1 Electrodo de grafito

La fabricación de electrodos de grafito se inició cuando aparecieron los generadores de impulsos. Gracias a que el grafito se empezó a utilizar como material para los electrodos se permitió aumentar las capacidades de arranque considerablemente frente a los valores que se obtenían con el cobre, con lo cual se reduce el desgaste principalmente en las operaciones de desbaste las cuales se realizan con elevadas energías de descarga y bajas frecuencias de chispeo.

En cuanto a las operaciones de acabado que se realizan a altas frecuencias de descarga, se da un desgaste mayor en el grafito que en el cobre.

El electrodo de grafito es el que tiene mayor demanda en la electroerosión por ello presenta una serie de ventajas que lo hacen ampliamente utilizado las cuales son:

- Fácil de mecanizar.
- Resistente a los choques térmicos.
- Posee estabilidad geométrica del electrodo durante la operación de electroerosión debido a que tiene un coeficiente bajo de dilatación térmica, tres veces menor que la del cobre.
- Disponible en diferentes dimensiones y geometrías.

- No se funde y pasa directamente del estado sólido al gaseoso a 3400 °C lo que reduce el desgaste.
- Peso menor al del cobre debido a que posee una densidad menor a la del cobre por lo que son más ligeros, (densidad del cobre 8.94 gr/cm³ – densidad del grafito 2.26 gr/cm³)
- Asegura una velocidad de arranque de metal superior a la del cobre con un desgaste menor.
- El desgaste decrece a medida que la corriente de cresta aumenta.

El grafito es un producto sinterizado obtenido a partir de partículas de grafito en forma hexagonal, el campo de aplicación del grafito depende del tamaño y la forma del mismo. El grafito se encuentra disponible en el mercado con diferentes tamaños y geometrías. El grafito presenta mucha mayor estabilidad que el cobre frente a las altas temperaturas.

La diferencia que presenta el electrodo de grafito con respecto del cobre es que, los electrodos de grafito solo pueden obtenerse por mecanización en máquinas-herramienta, aunque con altas velocidades de mecanizado.

Sus propiedades físicas son:

- Alta temperatura de sublimación (3600-3700 °C).
- Muy alta resistividad eléctrica (12-16 Ω mm²/m).
- Tiene temperatura de sublimación, ya que pasa directamente del estado sólido a vapor.

Sus propiedades mecánicas son:

- Fácilmente mecanizable.
- Coeficiente de dilatación lineal de 3 a 4 * 10⁻⁶ °C. De 4 a 5 veces menor que el del cobre.
- Bajo peso específico, de 1,75 a 1,85 Kg/dm³, muy apropiado para electrodos de gran tamaño.
- Gran estabilidad dimensional.

2.1.11.2 Electrodo de cobre

En los inicios de la electroerosión el único material que se utilizaba para los electrodos era el latón, el cual resultaba fácil de conseguir y barato pero presentaba una tasa de desgaste muy elevado.

Es por el desgaste que el latón fue sustituido por el cobre, el cual tiene un desgaste considerablemente menor y posee mayor conductividad eléctrica.

Las limitaciones que presentan los electrodos de cobre se deben a que tienen un punto bajo de fusión (1083° C) y una elevada conductividad térmica, factores que limitan su capacidad de arranque.

Otra limitación que presenta el cobre es que tiene un coeficiente de dilatación lineal (16×10^{-6} °C) que puede considerarse elevado si es comparado con el grafito, si la operación de mecanizado es de larga duración y si no se disponen de sistemas refrigerantes para el líquido dieléctrico puede afectar a la precisión de la operación de mecanizado.

La fabricación de este tipo de electrodos se ve limitada en cuanto a sus dimensiones, ya que el cobre presenta un alto peso específico (8,95 kg/dm³) y si son muy voluminosos su peso sería demasiado elevado y por ende costoso.

En lo que se refiere al acabado superficial final del elemento erosionado para aplicaciones exigentes donde se necesita que la rugosidad tenga bajos niveles, el cobre permite alcanzar mejores rugosidades gracias a su estructura densa. Sin embargo el mecanizado con electrodo de cobre con tolerancias muy ajustadas resulta muy complicado, debido a que el cobre tiende a dejar rebabas y sufre deformaciones durante el arranque, por lo que conseguir una buena precisión es difícil.

Es quizás el material más empleado en la fabricación de electrodos, Su pureza debe ser del 99,9 %. Sus propiedades físicas y mecánicas son:

- Temperatura de fusión (1083 °C).
- Muy buena resistividad eléctrica ($0,017 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)
- Difícil de mecanizar
- Coeficiente de dilatación lineal alto respecto al grafito, pero suficiente en electroerosión.

- Alto peso específico (8,95 Kg/dm³), no sirve para electrodos voluminosos.

La siguiente tabla muestra las propiedades tanto físicas como mecánicas de los electrodos de cobre y grafito.

Tabla 2.5: Propiedades de los electrodos

Propiedades mecánicas	
Electrodo de grafito	Fácil de mecanizar
	Coefficiente de dilatación lineal de 3 a 4 x10 ⁻⁶ °C. De 4 a 5 veces menor que el del cobre
	Bajo peso específico, de 1,75 a 1,85 kg/dm ³
	Gran estabilidad dimensional
	Dureza (55-64 Shore)
Electrodo de cobre	Difícil de mecanizar
	Coefficiente de dilatación lineal alto respecto al grafito 16*10 ⁻⁶ °C
	Alto peso específico 8,95 kg/dm ³
	Dureza Brinell (42-115 HB)
Propiedades físicas	
Electrodo de grafito	Alta temperatura de sublimación (3600-3700 °C)
	Muy alta resistividad eléctrica (12-16 Ω mm ² /m)
	Pasa directamente del estado sólido a vapor
	Conductividad eléctrica (0,7 (mOhm.cm) ⁻¹)
	Conductividad térmica (70-120 W/m.K)
Electrodo de cobre	Temperatura de fusión 1083 °C
	Muy buena resistividad eléctrica (0,017 Ω mm ² /m)
	Conductividad eléctrica (100-101 % I.A.C.S International Annealed Copper Standard)
	Conductividad térmica (160 W/m.K)

Fuente: [19, 20]

2.1.12 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL (MRR)

La tasa de eliminación de material, o MRR por sus siglas en inglés (Material Removal Rate), es un coeficiente que relaciona el volumen de la pieza arrancado durante cada ensayo práctico realizado, con el tiempo transcurrido en dicho ensayo, este parámetro se expresa normalmente en unidades de mm^3/min .

Este parámetro en si nos muestra cómo se está dando el arranque de material durante el tiempo de duración del ensayo, si se busca minimizar el tiempo de arranque de material hay que tomar en cuenta que un proceso más rápido está relacionado con una mayor intensidad de descarga, es decir, un entorno más agresivo para la herramienta, que producirá un mayor desgaste en esta. Para el cálculo se utiliza la ecuación 2.11 según Camprubí Graell.

$$\text{MRR} = \frac{V_2}{t} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right] \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde:

V_2 = Volumen de material arrancado en la pieza (mm^3)

t = Tiempo (minutos)

Para obtener V_2 :

$$V_2 = \frac{m}{\rho} \left[\text{mm}^3 \right] \quad \text{Ecuación.2.12}$$

Donde:

$$m = m_i - m_f \left[\text{g} \right] \quad \text{Ecuación 2.13}$$

m_f = Masa final de la pieza (gr)

m_i = Masa inicial de la pieza (gr)

ρ = Densidad de la pieza (g/mm^3)

2.1.13 RUGOSIDAD

La rugosidad varía según el método de mecanizado, es así que la rugosidad en el mecanizado convencional es direccional, en cambio en el mecanizado no convencional en especial en electroerosión la rugosidad es multidireccional.

2.1.13.1 Rugosidad media y rugosidad total

Al realizar un corte en un elemento mecanizado por un plano perpendicular a la superficie se obtiene un perfil como se muestra en la figura 2.20.

Al tomar una longitud de referencia (L) como se indica en la figura 2.20 se observan los valores de rugosidad media (Ra) y rugosidad máxima (Rt o Rmáx), tanto la rugosidad media como la máxima se miden en micrómetros (μm).

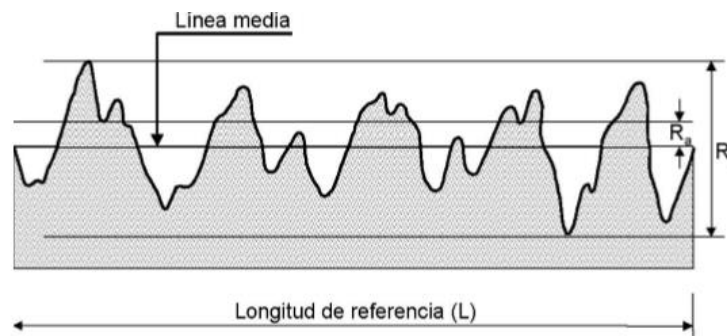


Fig. 2.20: Perfil real de una pieza mecanizada [21].

- **Rugosidad media**

El valor de rugosidad media (Ra) de una superficie es el valor medio aritmético de las distancias de los puntos del perfil real en relación con la línea media, o para entender mejor es el valor medio de las diferencias hacia arriba y hacia abajo de la línea media a lo largo de una longitud de referencia preestablecida.

Según las figuras 2.20 y 2.21 cumplen con lo siguiente:

- Línea media: Superficie $\Sigma (A1+A2+\dots+A6) = \text{Superficie } \Sigma (B1+B2+\dots+B8)$
- Rugosidad $Ra \cdot L = \text{Superficie } \Sigma (A1+ A2+\dots+ A6 + B1+ B2+\dots+B8)$

Ra: Es la suma de áreas por encima de la línea media más la suma de áreas por debajo de la línea media, dividido para la longitud de referencia (L) como se puede observar en la figura 2.21.

Es decir, la rugosidad Ra es el valor medio de las superficies Ai y Bi en la longitud de referencia (L)

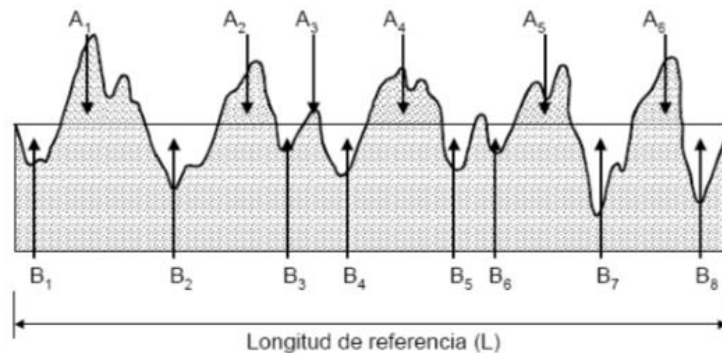


Fig. 2.21: Perfil de una pieza [21].

- **Rugosidad máxima**

La rugosidad máxima (Rt o Rmáx) tiene un valor el cual es la distancia existente entre dos líneas paralelas a la línea media las cuales tocan al perfil por los puntos más alto y más bajo, dentro de la longitud de referencia (L).

2.1.13.2 Grado de rugosidad superficial

La tabla 2.6 indica el grado de acabado superficial en función del factor Ra obtenido en micrómetros y en micropulgadas después de un proceso.

Tabla 2.6: Grados de rugosidad superficial

Valores de rugosidad (Ra) en micras		Grados de calidades de rugosidad
µm	µ in	
50	2000	N12
25	1000	N11
12.5	500	N10
6.3	250	N9
3.2	125	N8
1.6	63	N7
0.8	32	N6
0.4	16	N5

0.2	8	N4
0.1	4	N3
0.05	2	N2
0.025	1	N1

Fuente: [22]

La tabla 2.7, muestra los rangos típicos de valores de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos de fabricación.

Tabla 2.7: Valores típicos de rugosidad superficial

Rugosidad promedio en micrómetros – Ra μm													
Proceso	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025	0.012
Arenado													
Aserrado													
Brochado													
Bruñido													
Cepillado													
Cizallado													
Corte con soplete													
Corte electroquímico													
Corte láser													
Electroerosión													
Estampado													
Esmerilado													
Extrusión													
Forjado													
Fresado													
Fundición a cera perdida													
Fundición a presión													
Fundición en arena													
Fundición en coquilla													
Granallado													
Laminado en caliente													
Laminado en frío													
Lapidado													
Limado													
Mandrilado													
Mortajado													
Oxicorte													
Pulido													
Recalcado													
Rectificado													
Superacabado													
Taladrado													
Torneado													
Trefilado													
	Aplicación frecuente						Aplicación menos frecuente						

Fuente: [23]

La rugosidad en electroerosión por penetración está ligada a diferentes factores en el mecanizado debido a que la rugosidad varía cuando los factores que se verán a continuación también cambian, es por ello que los factores como tiempo de impulso, la intensidad y los materiales tanto del electrodo como el elemento a erosionar se deben tomar muy en cuenta ya que de estos depende si la rugosidad aumenta o disminuye.

El módulo de medición es conocido también como CUT-OFF. Su función es la de actuar como filtro, y normas internacionales establecen cinco veces el módulo como mínimo para realizar una evaluación de la rugosidad de una superficie. La tabla 2.8 muestra el rango de valores de rugosidad Ra esperados así como los valores de Cut-off admisibles.

Tabla 2.8: Procesos de mecanizado, rango de rugosidad y valores de cut-off

Proceso de acabado	Rango de valores de Ra esperados		Valores de cut-off admisibles		
	μm	μinch	0,25 μm 0,01 μin	0,8 μm 0,03 μin	2,5 μm 0,1 μin
Superacabado	0,025 - 0,20	1 - 0	x	x	
Lapidado	0,025 - 0,40	1 - 16	x	x	
Pulimento	0,025 - 0,40	1 - 16		x	X
Pulido (liso)	0,10 - 0,40	4 - 16		x	X
Bruñido	0,10 - 0,80	4 - 32	x	x	
Esmerilado	0,10 - 1,6	4 - 64	x	x	X
Perforado con Diamante	0,20 - 0,40	8 - 16	x	x	
Torneado con Diamante	0,20 - 0,40	8 - 16	x	x	
Torneado	0,40 - 6,30	16 - 250		x	X
Perforado con Mecha	0,40 - 6,30	16 - 250		x	X
Trefilado	0,80 - 3,20	32 - 125		x	X
Mandrilado	0,80 - 3,20	32 - 125		x	x
Fresado	0,80 - 6,30	32 - 250		x	x
Electroerosión	1,60 - 6,30	64 - 250		x	x
Modelado por Prensa	1,60 - 12,50	64 - 500	x	x	
Aplanamiento	1,60 - 12,50	64 - 500		x	x
Electrodeposición	0,80 - 0,80	8 - 32			x
Fresado químico	1,60 - 6,30	63 - 250	x	x	
Laser	1,60 - 6,30	63 - 250		x	
Aserrado	1,60 - 25,0	63 - 1000		x	x
Extrusión	0,80 - 3,20	32 - 125		x	
Fundición a presión	0,80 - 1,60	32 - 63		x	
Forjado	3,20 - 13,0	32 - 63		x	
Laminación en Caliente	13,0 - 25,0	500 - 1000		x	x
Fundido con molde de arena	13,0 - 25,0	500 - 1000		x	x

Fuente: [24]

Como se observa en la tabla en el proceso de electroerosión el rango de rugosidades es de (1,60 a 6,30) μm y los valores de cut-off admisibles son de (0,8 a 2,5) μm .

2.1.13.3 Factores de los que depende la rugosidad

En el mecanizado en electroerosión por penetración, la rugosidad obtenida en un mecanizado depende principalmente de tres factores:

- Tiempo de impulso
- Nivel de intensidad
- Pareja de materiales de electrodo y pieza (Elemento a erosionar)

Entonces debido a que la rugosidad depende de los factores antes mencionados se obtiene lo siguiente:

- a) La rugosidad aumenta al aumentar el tiempo de impulso. Esto es lógico ya que aunque la intensidad de la descarga sea la misma, al aumentar el tiempo sube la energía del impulso, con lo que se forman cráteres de mayor tamaño, lo cual hace aumentar la rugosidad.
- b) La rugosidad aumenta conforme el nivel de intensidad sea mayor. La causa es la misma que en el caso anterior. Al aumentar la intensidad aumenta también la energía del impulso, dando superficies más rugosas.
- c) Los materiales del electrodo y la pieza, tiene también una influencia en la rugosidad obtenida para un mismo régimen.

Por ejemplo, la rugosidad es mayor cuando se erosiona acero con electrodo de grafito, que cuando se erosiona el mismo acero con electrodo de cobre. Sin embargo, si se erosiona cobre con cobre, la rugosidad es menor que en los casos anteriores. Todo ello está muy unido a la capacidad de arranque de material. Si el arranque es grande la rugosidad también lo será.

2.1.13.4 Medición de la rugosidad

La rugosidad de las piezas mecanizadas por electroerosión se puede medir de dos formas:

- Por medición directa con un rugosímetro como se puede observar en la figura 2.22.

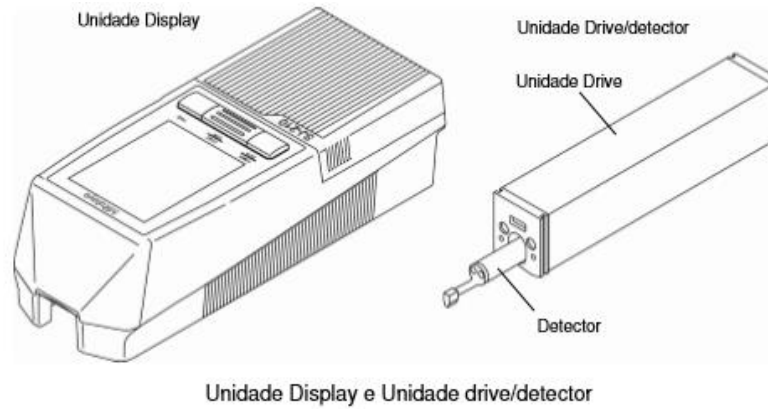


Fig. 2.22: Rugosímetro MITUTOYO SJ 210. [25]

Este tipo de rugosímetro utiliza la Norma ISO 1997 para su correcta medición.

- Por comparación con una regla patrón conocida como “Rugotest” como se observa en la figura 2.23.



Fig. 2.23: Rugotest [26].

2.2 HIPÓTESIS

Es mayor la rugosidad superficial cuando se modifican los parámetros de corte en el mecanizado por el proceso de electroerosión por penetración con electrodo de grafito que con electrodo de cobre

2.3 SEÑALAMIENTO DE LAS VARIABLES DE LAS HIPÓTESIS

2.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

PARÁMETROS DE CORTE

2.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE

RUGOSIDAD SUPERFICIAL

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para la investigación del presente proyecto se utilizó los siguientes tipos de investigación:

3.1.1 DESCRIPTIVA

El estudio se basó en la modalidad de investigación descriptiva, ya que su fin fue la descripción de los parámetros de operación en el mecanizado por electroerosión que fueron más influyentes en la rugosidad superficial resultante en la microfundición de aluminio.

3.1.2 EXPLORATORIA

En esta investigación fue necesario identificar todas las medidas de los parámetros de operación en el mecanizado así como las propiedades mecánicas y físicas de los electrodos con los que se realizaron los ensayos con electrodos de grafito y cobre.

3.1.3 CORRELACIONAL

Fue gran importancia realizar la relación de variables tanto independiente como dependiente, para poder indicar el grado de dependencia de los distintos parámetros en la investigación.

3.1.4 EXPERIMENTAL

Se realizaron ensayos de mecanizado en electroerosión por penetración en microfundición de aluminio con diferentes parámetros de operación hasta lograr fijar los parámetros con los cuales se obtuvieron bajos niveles de rugosidad superficial.

3.1.5 EXPLICATIVA

Se explicaron detalladamente todos los resultados obtenidos en los ensayos realizados para conocer los parámetros adecuados en el mecanizado para obtener bajos grados de rugosidad superficial.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 POBLACIÓN

Para este proyecto de investigación la población de estudio fueron las probetas de microfundición de aluminio, en las cuales se realizó el mecanizado de electroerosión por penetración con electrodos de cobre y grafito; en estas probetas se midió la rugosidad superficial (Ra) para evaluar el comportamiento de este factor.

3.2.2 MUESTRA

Para el conocer el número de probetas que se mecanizó se utilizó la investigación previa en donde nos dice que la rugosidad superficial en la electroerosión por penetración tiene un rango de (1,6 a 6.3 μm) debe tener un valor promedio dentro de este rango o lo más cercano a esto valores es por ello que se realizó una tabla de rugosidades superficiales con el fin de obtener una varianza y luego con las fórmulas de población infinita se procedió a calcular el valor de la muestra.

Para obtener la muestra se utilizó la ecuación 3.1 de acuerdo a Álvarez, 2011 [27].

$$n = \left(\frac{Z \cdot \sigma}{e} \right)^2 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

n = el tamaño de la muestra

e = Límite aceptable de error muestral que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor que varía entre el 1% (0,01) y 9% (0,09), el error se toma del equipo de medición que es el rugosímetro Mitutoyo SJ210 el cual resulta en la calibración del mismo:

Con un N de 20 y un Z de 1,96 el error es de 0,012 es decir el porcentaje de error es de 1,2 %.

Z = Valor obtenido mediante niveles de confianza. Es un valor constante que, si no se tiene su valor, se lo toma en relación al 95% de confianza equivale a 1,96.

Para calcular la media aritmética se aplica la ecuación 3.2 según Álvarez, 2011:

$$X = \left(\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N} \right) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

N = Total de la población (En este caso serán los 20 datos de rugosidad que tenemos)

Para calcular la desviación estándar de la población se aplicó la ecuación 3.3 dada por Álvarez, 2011:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_1-x)^2+(X_2-x)^2 \dots+(X_n-x)^2}{N}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

σ = Desviación estándar de la población

X = Media aritmética

En la tabla 2.8 encontramos los valores de aplicaciones en el mecanizado por electroerosión los cuales tienen un rango de (1,6 a 6,3) μm de lo cual para realizar la tabla de rugosidades y debido al rango mencionado se sacó un valor promedio de rugosidad aproximadamente obteniendo los siguientes resultados, como se puede observar en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Valores de rugosidad superficial promedio

N°	Valores de Ra (μm)
1	3,949
2	3,952
3	3,951
4	3,961
5	3,943
6	3,944
7	3,941
8	3,956
9	3,957
10	3,947
11	3,962
12	3,952
13	3,958
14	3,947
15	3,946
16	3,958
17	3,953

18	3,957
19	3,932
20	3,921
Media aritmética (X)	3,952

Fuente: (El autor)

Entonces se procedió a calcular la desviación estándar de la población:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(3,949 - 3,952)^2 + (3,952 - 3,952)^2 + (3,951 - 3,952)^2 + (3,961 - 3,952)^2 + (3,943 - 3,952)^2 + (3,944 - 3,952)^2 + (3,941 - 3,952)^2 + (3,956 - 3,952)^2 + (3,957 - 3,952)^2 + (3,947 - 3,952)^2 + (3,962 - 3,952)^2 + (3,952 - 3,952)^2 + (3,958 - 3,952)^2 + (3,947 - 3,952)^2 + (3,946 - 3,952)^2 + (3,958 - 3,952)^2 + (3,953 - 3,952)^2 + (3,957 - 3,952)^2 + (3,932 - 3,952)^2 + (3,921 - 3,952)^2}{20}}$$

$$\sigma = 0,01$$

Entonces:

$$n = \left(\frac{1,96 * 0,01}{0,012} \right)^2$$

$$n = 2,67 \approx 3 \text{ probetas}$$

Luego se realizó el cálculo total del número de probetas debido a los parámetros que intervienen en la rugosidad como son el tiempo de impulso, el nivel de intensidad y los tipos de electrodos, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Número de parámetros variables para la realización del experimento

Electrodos	Tiempo de impulso (ti)	Nivel de intensidad (I)	Número de probetas
Grafito	1	3	3
Cobre	1	3	3

Fuente: (El autor)

$$n \text{ total} = (\text{Probetas mecanizadas con electrodo de grafito} \\ + \text{mecanizadas con electrodo de cobre}) * n$$

$$n \text{ Total} = ((ti * I) + (ti * I)) * n$$

$$n \text{ Total} = ((1 * 3) + (1 * 3)) * 3$$

$$n \text{ Total} = (6) * 3 = 18$$

En cada probeta se realizó 5 mediciones de rugosidad superficial con el rugosímetro Mitutoyo SJ210 con el fin de obtener una rugosidad promedio del área mecanizada, por lo tanto se realizaran 90 mediciones.

3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Los parámetros de corte se indican en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Operacionalización de variable independiente

Conceptualización	Categorías	Indicadores	Ítems básicos	Técnicas e instrumentos
Los parámetros de corte más importantes en el mecanizado por electroerosión por penetración son el tiempo de impulso, el nivel de intensidad y la pareja de materiales (Electrodo-pieza)	Tiempo de impulso	Duración del tiempo por cada ciclo que permite el paso de corriente eléctrica.	Segundos [s] Desbaste (9) Acabado (3)	- Investigación experimental - Ficha de control
	Nivel de intensidad	Diferentes niveles de amperaje que puede suministrar el	Amperios [A] Desbaste (6, 5, 4) Acabado (2, 1.5, 1)	- Observación directa. - Ficha de control

		generador de la máquina.		
	Pareja de materiales electrodo-pieza	Tipos de electrodos y material de la probeta a utilizarse para la electroerosión	Electrodo de cobre Electrodo de grafito Probetas de microfundición de aluminio	Investigación experimental

Fuente: (El autor)

3.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE

La rugosidad superficial se muestra en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Operacionalización de variable dependiente

Conceptualización	Categorías	Indicadores	Ítems básicos	Técnicas e instrumentos
La rugosidad superficial es el conjunto de las irregularidades de superficies de paso relativamente pequeño, correspondiente a las huellas dejadas en la superficie real por el procedimiento de elaboración u otras influencias.	Rugosidad media (Ra)	Valor medio aritmético de las distancias de los puntos del perfil real en relación con la línea media	Micrómetros[μm] Rango [1.6-6.3]	Observación directa. Medición mediante un rugosímetro.

Fuente: (El autor)

3.4 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La recolección de información se realizó mediante la observación directa, que en este caso predominó en las modalidades de observación de laboratorio, de campo e experimental, por tratarse de una investigación de carácter experimental.

Se utilizó material bibliográfico como son libros y catálogos que fueron de ayuda para realizar los ensayos deseados.

Se tomó notas de todos datos necesarios ocurridos en los ensayos para tener una base de datos suficiente, para lo cual se utilizó un cuaderno de notas en el que consten datos de fechas, parámetros y valores cuantitativos.

Otros medios de recolección de información fueron los equipos del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, al momento de utilizar el rugosímetro Mitutoyo SJ210 se tomó 5 mediciones en cada sección de cada probeta con el fin de obtener un promedio de rugosidad superficial, estas constaron en las fichas de recolección de información para tomar datos sobre la rugosidad superficial resultante.

Finalmente se realizó gráficas de los resultados obtenidos en función del tipo de electrodo y la rugosidad superficial obtenida, con el fin de comparar y concluir el efecto en la rugosidad superficial en el mecanizado por electroerosión en microfundición de aluminio.

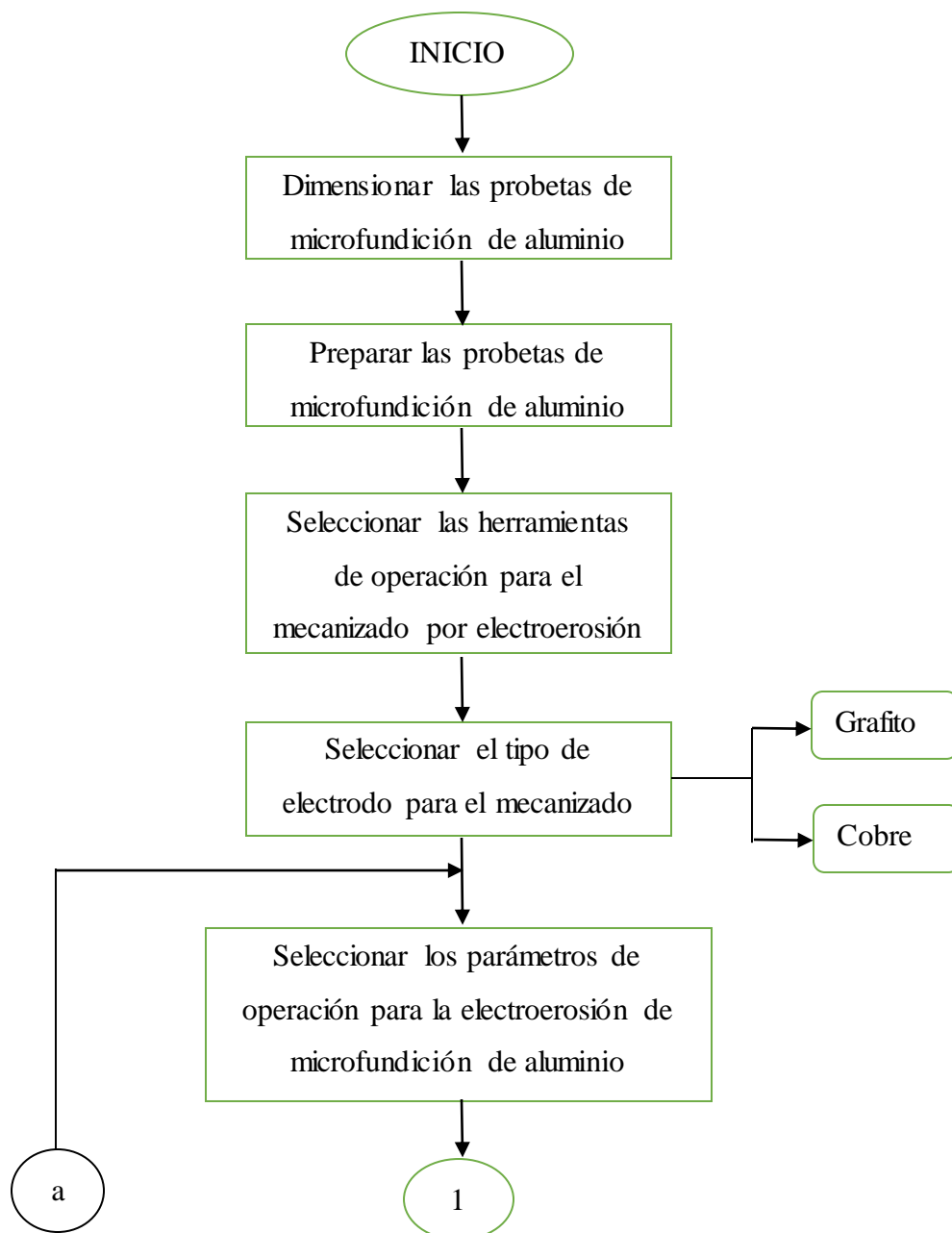
3.5 PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

Para el procesamiento y análisis adecuado de la información obtenida se siguió varios lineamientos entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

- Se analizó los parámetros de operación que intervienen en la rugosidad superficial resultante.
- Se procesó los datos obtenidos experimentalmente para lograr el objetivo deseado.
- Tabulación de cuadros de variables con respecto a la hipótesis planteada.

- Tabulación de datos de rugosidad obtenidos con el rugosímetro mediante un cuadro que permita determinar cuáles son los valores de rugosidad obtenidos con los diferentes parámetros de mecanizado.
- Tabulación e interpretación de resultados obtenidos en los ensayos de mecanizado para lograr una eficiente operación de mecanizado que permita minimizar la rugosidad superficial.

En el presente trabajo de investigación se determinó el siguiente flujo-grama de procesos para el desarrollo y análisis de resultados como se observa en la figura 3.1.



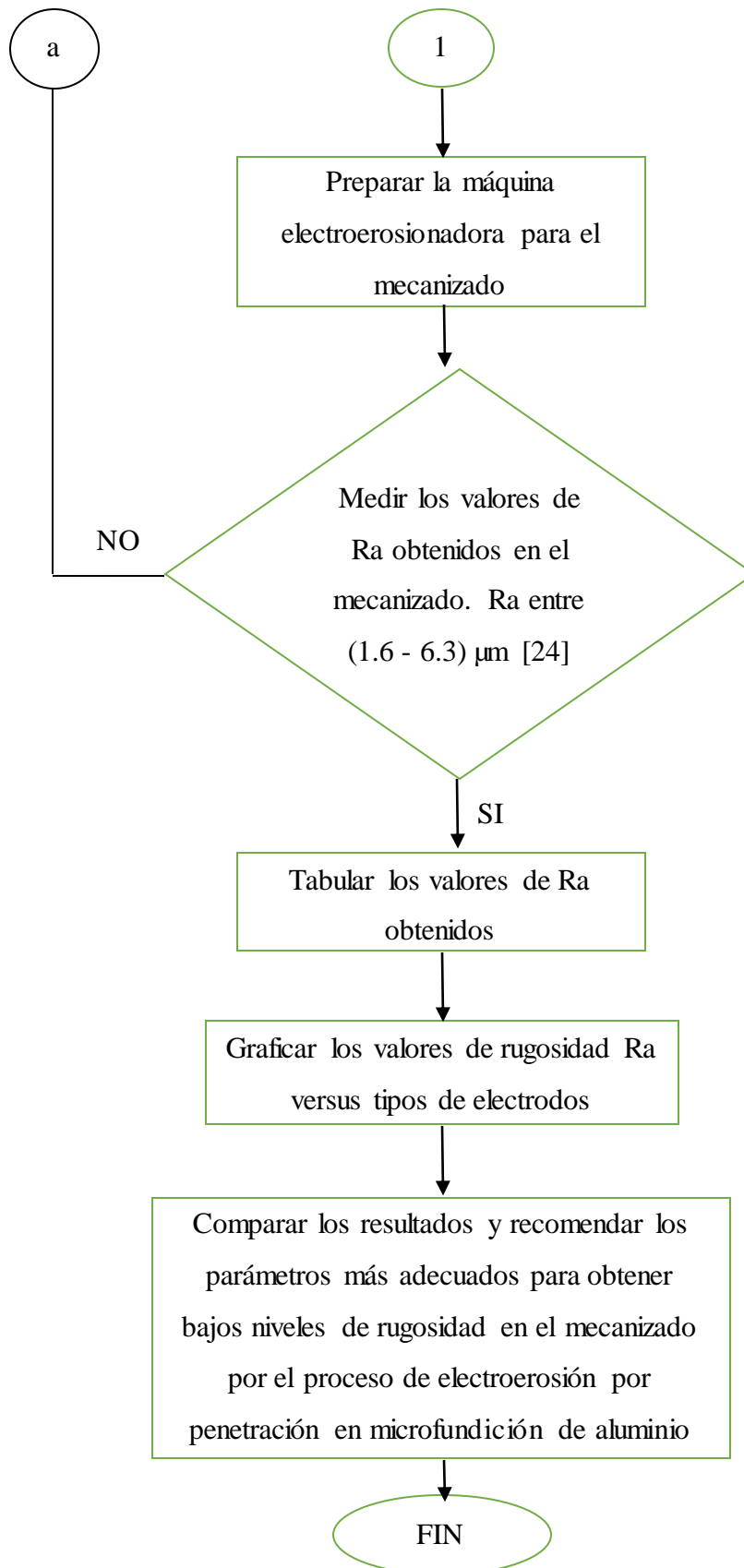


Fig. 3.1: Diagrama de flujo para operación de electroerosión por penetración

Fuente: (El autor)

3.5.1 Dimensionamiento de las probetas de microfundición de aluminio y electrodo

Para el dimensionamiento de las probetas de microfundición de aluminio para el presente estudio se tomó en cuenta el diámetro de la herramienta con la cual se va a erosionar es decir el diámetro del electrodo para determinar la longitud y el ancho, además de la profundidad a la cual se va erosionar para determinar el espesor de dicha probeta.

En el proceso de microfundición de aluminio se utilizó para su producción la aleación de aluminio 6061.

Debido a la disponibilidad en el mercado se seleccionó un electrodo de 1 pulgada (25.4 mm) de diámetro por 5 centímetros (50 mm) de longitud para que pueda ser fijada con facilidad, como se observa en la figura 3.2.

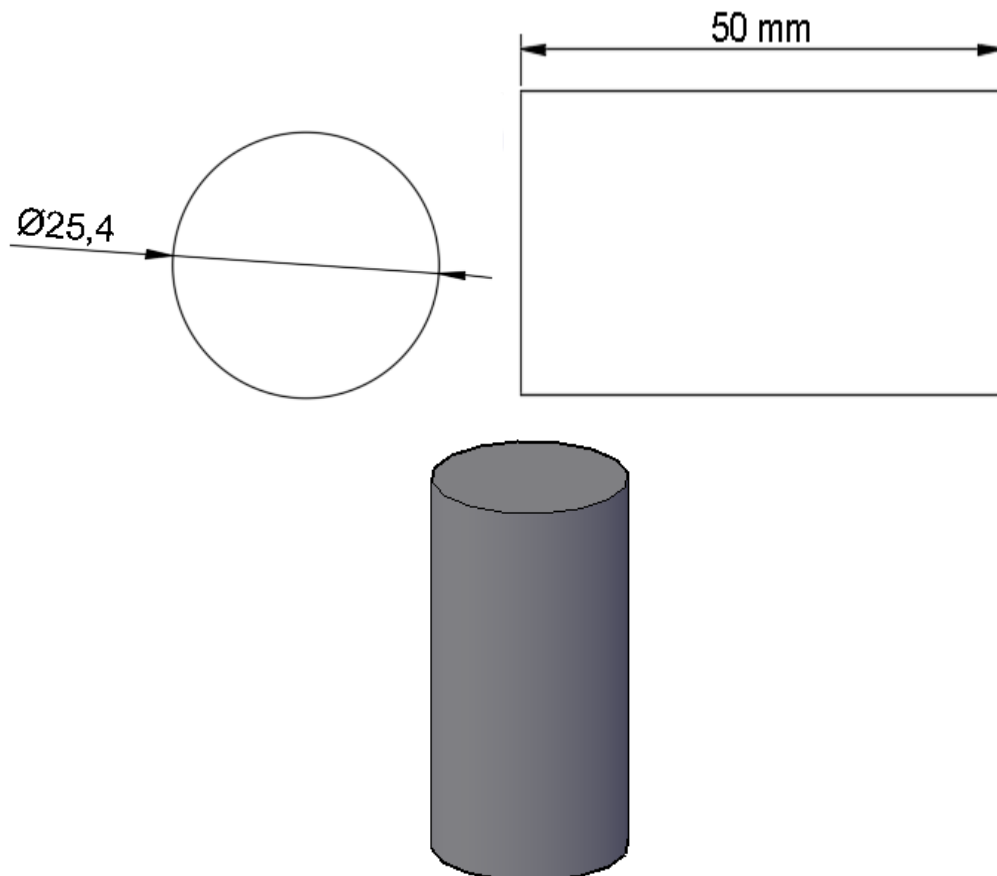


Fig. 3.2: Diseño del electrodo.

Fuente: (El autor)

Entonces tomando en cuenta que el diámetro del electrodo es de 1 pulgada (25.4 mm) y que la profundidad a la que se va erosionar es de 1 mm, además de la disponibilidad en el mercado la probeta tendrá las siguientes dimensiones:

Largo: 76.2 mm

Ancho: 60 mm

Espesor: 12 mm

Estas medidas se han dado debido a que son necesarias para la sujeción de la probeta y para que el electrodo pueda erosionar sin chocar con los elementos de sujeción, como se observa en la figura 3.3.

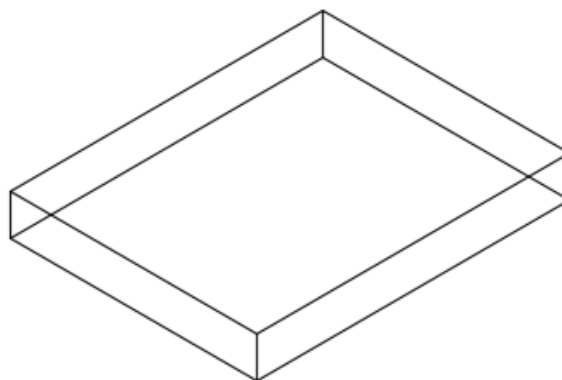
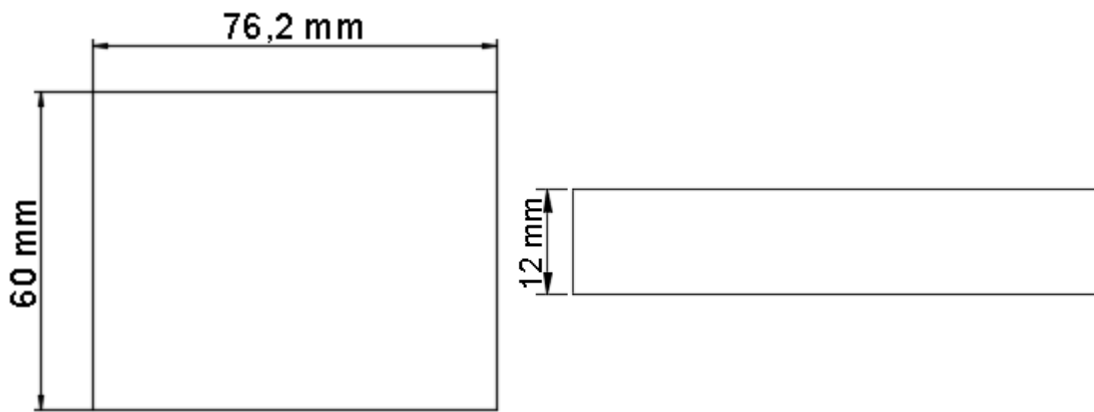


Fig. 3.3: Diseño de la probeta

Fuente: (El autor)

3.5.2 Preparación de la probeta de microfundición de aluminio

Corte de la plancha de microfundición de aluminio para obtener las dimensiones adecuadas:

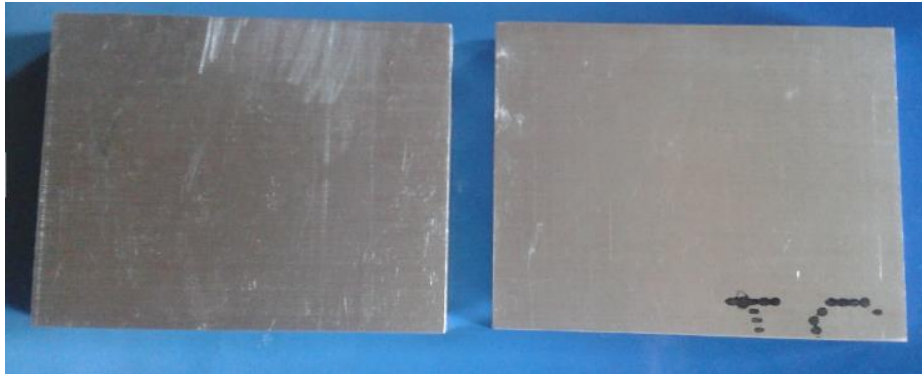


Fig. 3.4: Corte de la probeta
Fuente: (El autor)

Dibujar el diseño que se va erosionar:

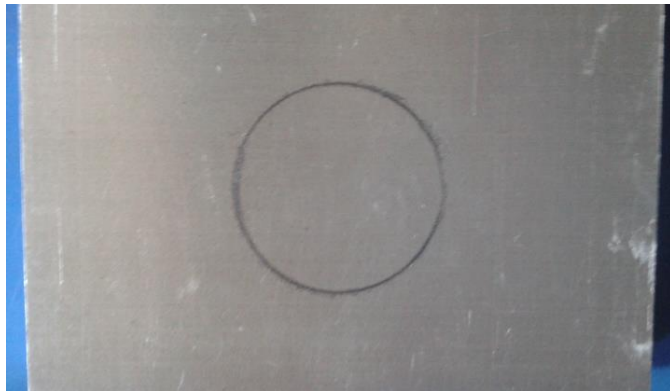


Fig. 3.5: Diseño que se va erosionar
Fuente: (El autor)

Poner una numeración a las probetas a erosionar:

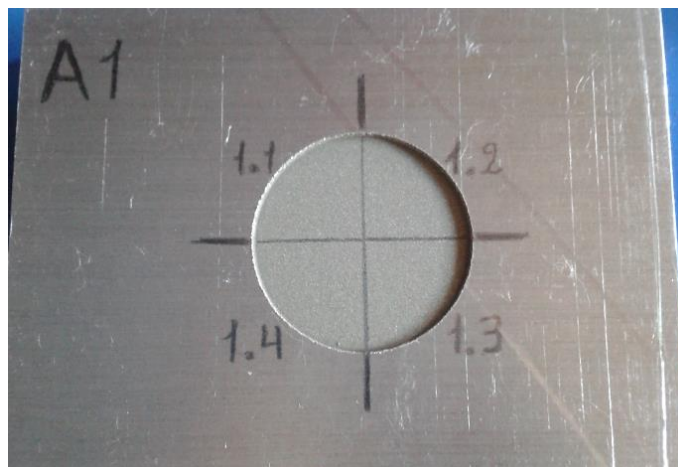


Fig. 3.6: Numeración de las probetas
Fuente: (El autor)

3.5.3 Selección de las herramientas de operación, dieléctrico y tipo de electrodo

- **Herramienta de operación**

Para la selección de herramientas de operación consiste básicamente en la herramienta con la cual se erosiona es decir el electrodo.

La herramienta (Electrodo) fue de forma circular con una longitud de 50 mm y un diámetro de 25.4 mm el cual fue fijado de manera directa en el porta herramientas ya que debido a su diámetro se puede fijar sin necesidad de mecanizar al electrodo.

El elemento a erosionar fue una probeta de microfundición de aluminio la cual fue ubicada en la mesa de trabajo para que pueda ser erosionada.

- **Dieléctrico**

El dieléctrico utilizado fue diésel debido a las siguientes razones:

- a) En cuanto a la selección del dieléctrico se debe tomar en cuenta principalmente el tipo de fluido con el que opera la máquina. La máquina electroerosionadora que se utilizó para realizar los ensayos fue la máquina de electroerosión Chevalier Modelo DM-540. Este tipo de máquina opera con diésel como dieléctrico.



Fig. 3.7: Máquina electroerosionadora Chevalier DM-540. Taller de ingeniería del acero y matriceria.

Fuente: (El autor)

- b) Debido a que los tipos de dieléctricos más utilizados son los hidrocarburos, los aceites minerales y el agua. Y el diésel es un hidrocarburo líquido de densidad sobre 832 kg/m^3 ($0,832 \text{ g/cm}^3$), compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y en motores diésel.
- c) El dieléctrico debe tener una baja viscosidad, el diésel tiene una viscosidad cinemática de 1,3 a 3 centistokes (cSt). Por lo que es idóneo para utilizarlo debido a que anteriormente se menciona que el líquido dieléctrico debe tener bajas viscosidades para que se den buenos resultados con este tipo de mecanizado.
- d) Debe tener un punto de inflamación alto que se refiere al tiempo que se demora en combustionar una mezcla homogénea desde su formación hasta los primeros síntomas de combustión. El diésel tiene un punto de inflamación de 51°C .
- e) Debido a la volatilidad que es la capacidad que tiene un combustible para evaporarse lo más rápido posible, la volatilidad del diésel es baja lo cual produce emisiones bajas de monóxido de carbono e hidrocarburos.
- f) Por último debido a su precio ya que es de bajo costo y es de fácil adquisición en el mercado a diferencia de un aceite.

- **Tipo de electrodo**

El electrodo se seleccionó básicamente por la disponibilidad en el mercado, también se tomó en cuenta la conductividad eléctrica y térmica.

Es por ello que se seleccionó electrodos de grafito y cobre debido a las siguientes consideraciones:

- a) **Electrodo de Grafito**

- Fácil de mecanizar.
- Resistente a los choques térmicos.
- Posee estabilidad geométrica del electrodo durante la operación de electroerosión debido a que tiene un coeficiente bajo de dilatación térmica, tres veces menor que la del cobre.
- Disponible en diferentes dimensiones y geometrías.

- Peso menor al del cobre debido a que posee una densidad menor a la del cobre por lo que son más ligeros, (densidad del cobre 8.94 gr/cm^3 – densidad del grafito 2.26 gr/cm^3)
- Asegura una velocidad de arranque de metal superior a la del cobre con un desgaste menor.
- Conductividad eléctrica alta ($0,7 \text{ (mOhm.cm)}^{-1}$)

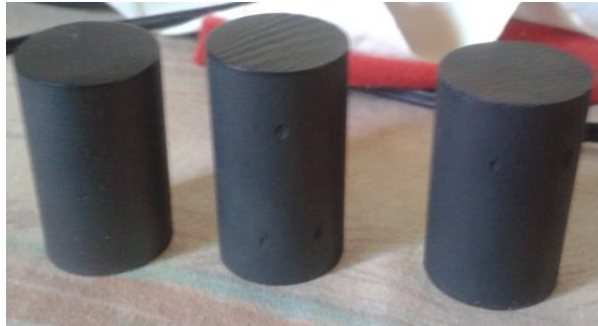


Fig. 3.8: Electrodo de grafito
Fuente: (El autor)

b) Electrodo de Cobre

- Baja temperatura de fusión ($1083 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Muy buena resistividad eléctrica ($0,017 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)
- Difícil de mecanizar pero vienen en diferentes geometrías
- Coeficiente de dilatación lineal alto respecto al grafito, pero suficiente en electroerosión.
- Conductividad eléctrica alta (100-101 % I.A.C.S International Annealed Copper Standard)
- Alto peso específico ($8,95 \text{ Kg/dm}^3$), no sirve para electrodos voluminosos.



Fig. 3.9: Electrodo de cobre
Fuente: (El autor)

3.5.4 Selección de parámetros de operación

La tabla 3.5 muestra los parámetros de operación para el mecanizado por electroerosión por penetración tanto para el desbaste como para el acabado:

Tabla 3.5: Parámetros de operación en electroerosión

Tiempo de duración del ciclo (tp)	
Desbaste (s)	Acabado (s)
12	6
Tiempo de pausa (to)	
Desbaste (s)	Acabado (s)
3	3
Tiempo de impulso (ti)	
Desbaste (s)	Acabado (s)
9	3
Nivel de intensidad (I)	
Desbaste (A)	Acabado (A)
6	2
4	1.5
3	1
Profundidad de corte	
Desbaste (mm)	Acabado (mm)
0.75	0.25
GAP (mm)	0.050
Dieléctrico	Diésel
Electrodos	Grafito Cobre

Fuente: (El autor)

3.5.5 Preparación de la máquina para el mecanizado

La máquina fue fijada con los parámetros de operación antes mencionados, los cuales sirvieron de punto de partida para observar cómo se desarrolla la electroerosión al ejecutar la operación, luego se observó el elemento erosionado y se procedió a medir la rugosidad con el rugosímetro.



Fig. 3.10: Medición de probetas mediante Rugosímetro Mitutoyo SJ210
Fuente: (El autor)

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS




4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

En las fichas que se presentan a continuación constan los resultados de rugosidad superficial obtenidos del mecanizado por el proceso de electroerosión por penetración en microfundición de aluminio con los parámetros de operación que se muestran en la tabla 3.5.



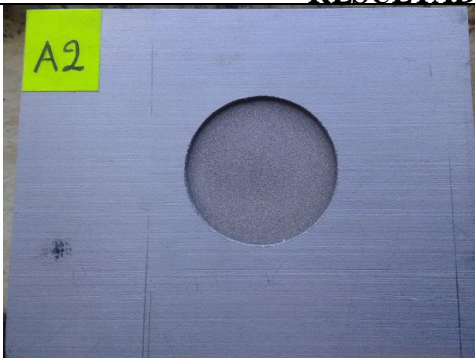
Para identificar las probetas mecanizadas con electrodo de grafito que va desde la ficha 4.1.1 hasta la ficha 4.1.9 se identificó con el ítem A y para el mecanizado con electrodo de cobre el ítem B que va desde la ficha 4.1.10 hasta la ficha 4.1.18.

Para el instrumento de medición se manejó los parámetros: Norma ISO 1997; λ_c (distancia de corte entre pico - pico) y λ_s (factor seleccionado según λ_c) de 0.8 y 2.5 respectivamente, estos parámetros son los perfiles de corte (cut off) según el perfil de medición R del rugosímetro Mitutoyo SJ210.




Ficha 4.1.1 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL				
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		A
Fecha de ejecución:		2016/10/03				
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato				
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:			Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:			Grafito			
Dieléctrico:			Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma		λ_c		λ_s		Mediciones
ISO 1997		0.8 μ m		2.5mm		X5
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)
Desbaste	Acabado					
6	2	1		25.4		0.050
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado			Tiempo total	
2 min 11 seg		8 min 30 seg			10 min 41seg	
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)						
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)
A1.1	5,702	6,146	5,666	6,726	6,970	6,242
A1.2	5,751	5,972	6,163	6,197	6,354	6,086
A1.3	5,523	6,028	5,939	6,024	6,780	6,059
A1.4	6,197	5,474	5,745	6,385	6,628	6,086
PROMEDIO TOTAL						6,118
RESULTADOS						
				Tipo de trabajo:		
				Fino		
				Clase de rugosidad:		
				N8		
Proceso:			Electroerosión por penetración			




Ficha 4.1.2 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:	Experimental	Ítem	A			
Fecha de ejecución:	2016/10/03					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:	Carlos Santamaría	Revisado por:	Ing. Cristian Pérez			
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:		Microfundición de aluminio				
Electrodo utilizado:		Grafito				
Dieléctrico:		Diésel				
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma	λc	λs	Mediciones			
ISO 1997	0.8mm	2.5mm	X5			
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)			
Desbaste	Acabado					
6	1.5	1	25.4			
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado				
2 min 12seg		17 min 24 seg				
Tiempo total			19 min 36seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)						
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)
A2.1	5,385	5,579	4,939	5,583	5,081	5,313
A2.2	5,476	4,984	5,069	4,684	4,978	5,038
A2.3	5,897	4,752	4,826	5,669	5,254	5,280
A2.4	4,684	5,461	5,659	5,714	5,981	5,500
PROMEDIO TOTAL						5,283
RESULTADOS						
			Tipo de trabajo:			
			Fino			
			Clase de rugosidad:			
			N8			
			Proceso:			
			Electroerosión por penetración			



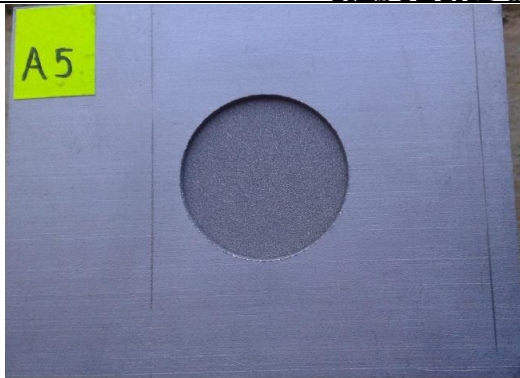
Ficha 4.1.3 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		A	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Grafito			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc			λs		Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm		X5
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
6	1	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado			Tiempo total		
2 min 13 seg		38 min 27 seg			40 min 40seg		
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
A3.1	3,280	3,199	4,849	3,297	4,020	3,729	
A3.2	3,773	3,823	3,443	3,540	3,215	3,559	
A3.3	3,639	4,821	4,719	4,839	3,156	4,235	
A3.4	4,773	4,907	3,932	4,983	4,879	4,695	
PROMEDIO TOTAL						4,054	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N8		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		



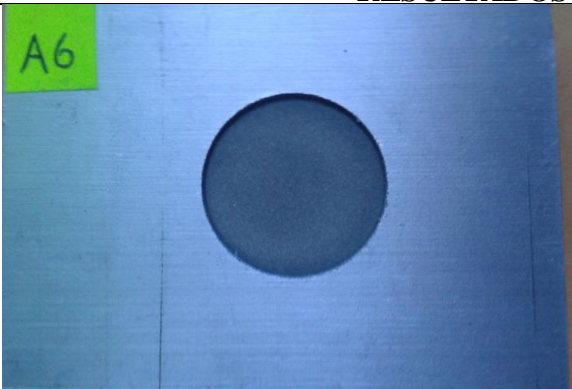
Ficha 4.1.4 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		A	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Grafito			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc		λs		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
5	2	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total			
2 min 52 seg		13 min 40 seg		16 min 32seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
A4.1	5,531	5,710	6,084	5,950	5,831	5,821	
A4.2	5,443	5,828	5,478	5,730	5,928	5,681	
A4.3	5,841	5,703	5,047	6,008	5,879	5,696	
A4.4	5,722	5,581	5,732	5,558	5,847	5,688	
PROMEDIO TOTAL						5,722	
RESULTADOS							
				Tipo de trabajo:			
				Fino			
				Clase de rugosidad:			
				N8			
Proceso:				Electroerosión por penetración			




Ficha 4.1.5 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:	Experimental	Ítem	A			
Fecha de ejecución:	2016/10/03					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:	Carlos Santamaría	Revisado por:	Ing. Cristian Pérez			
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:		Microfundición de aluminio				
Electrodo utilizado:		Grafito				
Dieléctrico:		Diésel				
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma	λc	λs	Mediciones			
ISO 1997	0.8mm	2.5mm	X5			
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)			
Desbaste	Acabado					
5	1.5	1	25.4			
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado	Tiempo total			
2 min 55 seg		19 min 30 seg	22 min 25seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)						
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)
A5.1	4,867	5,664	5,841	4,706	4,812	5,178
A5.2	4,908	4,904	4,931	4,777	4,612	4,826
A5.3	4,853	4,798	4,768	4,644	4,925	4,798
A5.4	5,544	4,843	4,783	4,555	4,987	4,942
PROMEDIO TOTAL						4,936
RESULTADOS						
			Tipo de trabajo:			
			Fino			
			Clase de rugosidad:			
			N8			
			Proceso:			
			Electroerosión por penetración			



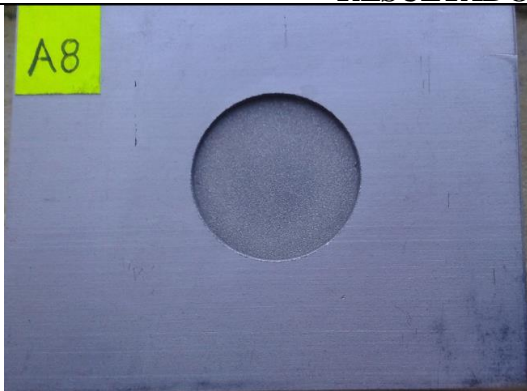
Ficha 4.1.6 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		A	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Grafito			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc			λs		Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm		X5
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
5	1	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado			Tiempo total		
3 min 01 seg		45 min 02 seg			48 min 03 seg		
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
A6.1	3,945	3,929	4,164	3,981	3,928	3,989	
A6.2	4,741	3,973	3,997	3,290	4,823	4,165	
A6.3	3,806	3,947	3,183	3,909	3,807	3,730	
A6.4	3,722	4,159	3,924	3,866	3,823	3,899	
PROMEDIO TOTAL						3,946	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N8		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		



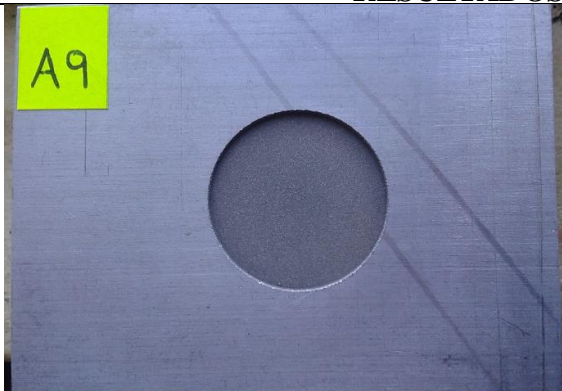
Ficha 4.1.7 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		A	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Grafito			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc		λs		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
4	2	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total			
3 min 55 seg		20 min 01 seg		23 min 56 seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
A7.1	5,358	5,219	4,885	4,791	4,987	5,048	
A7.2	4,400	5,668	5,128	4,537	5,118	4,970	
A7.3	5,067	4,403	5,411	5,356	4,789	5,005	
A7.4	4,724	4,619	4,668	5,228	5,118	4,871	
PROMEDIO TOTAL						4,974	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N8		
Proceso:			Electroerosión por penetración				




Ficha 4.1.8 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:	Experimental	Ítem	A			
Fecha de ejecución:	2016/10/03					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:	Carlos Santamaría	Revisado por:	Ing. Cristian Pérez			
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:	Microfundición de aluminio					
Electrodo utilizado:	Grafito					
Dieléctrico:	Diésel					
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma	λc	λs	Mediciones			
ISO 1997	0.8mm	2.5mm	X5			
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Gap (mm)		
Desbaste	Acabado					
4	1.5	1	25.4	0.050		
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total		
3 min 59 seg		37 min 09 seg		41 min 08seg		
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)						
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)
A8.1	4,430	3,850	3,943	4,112	4,285	4,124
A8.2	3,957	4,300	4,271	3,615	4,158	4,060
A8.3	4,133	4,785	4,001	3,587	4,159	4,133
A8.4	3,878	3,980	4,211	4,285	4,117	4,094
PROMEDIO TOTAL						4,103
RESULTADOS						
				Tipo de trabajo:		
				Fino		
				Clase de rugosidad:		
				N8		
				Proceso:		
				Electroerosión por penetración		




Ficha 4.1.9 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		A	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Grafito			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc		λs		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
4	1	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total			
3 min 56 seg		45 min 58 seg		49 min 54seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
A9.1	2,888	3,863	2,891	2,962	3,957	3,312	
A9.2	2,911	3,063	2,973	3,824	3,814	3,333	
A9.3	3,949	3,963	3,953	3,690	3,608	3,833	
A9.4	3,908	3,912	3,755	3,987	3,912	3,895	
PROMEDIO TOTAL						3,593	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N8		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		




Ficha 4.1.10 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		B	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc			λs		Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm		X5
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
6	2	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado			Tiempo total		
2 min 23 seg		10 min 38 seg			13 min 01seg		
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
B1.1	4,991	5,581	5,991	6,012	5,012	5,517	
B1.2	5,073	5,331	4,667	6,018	5,011	5,220	
B1.3	6,047	5,007	5,008	4,994	4,902	5,192	
B1.4	6,008	5,280	4,760	4,321	4,625	4,999	
PROMEDIO TOTAL						5,232	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N8		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		




Ficha 4.1.11 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:	Experimental	Ítem	B			
Fecha de ejecución:	2016/10/03					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:	Carlos Santamaría	Revisado por:	Ing. Cristian Pérez			
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:		Microfundición de aluminio				
Electrodo utilizado:		Cobre				
Dieléctrico:		Diésel				
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma	λc	λs	Mediciones			
ISO 1997	0.8mm	2.5mm	X5			
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)			
Desbaste	Acabado					
6	1.5	1	25.4			
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado	Tiempo total			
2 min 38 seg		15 min 34 seg	18 min 12 seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)						
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)
B2.1	4,390	4,707	4,740	3,992	3,797	4,325
B2.2	4,510	3,891	4,374	4,384	3,745	4,181
B2.3	4,016	4,441	4,187	4,480	3,987	4,222
B2.4	4,057	4,024	4,025	4,077	3,815	4,000
PROMEDIO TOTAL						4,182
RESULTADOS						
			Tipo de trabajo:			
			Fino			
			Clase de rugosidad:			
			N8			
Proceso:				Electroerosión por penetración		




Ficha 4.1.12 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		B	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc		λs		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
6	1	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total			
2 min 15 seg		43 min 30 seg		45 min 45 seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
B3.1	2,718	2,753	3,213	2,917	2,722	2,865	
B3.2	2,837	3,031	3,142	3,261	3,022	3,059	
B3.3	2,608	2,799	2,618	2,729	2,702	2,691	
B3.4	3,128	3,560	2,974	2,980	3,015	3,131	
PROMEDIO TOTAL						2,936	
RESULTADOS							
				Tipo de trabajo:			
				Fino			
				Clase de rugosidad:			
				N7			
Proceso:				Electroerosión por penetración			




Ficha 4.1.13 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:	Experimental	Ítem	B			
Fecha de ejecución:	2016/10/03					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:	Carlos Santamaría	Revisado por:	Ing. Cristian Pérez			
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:	Microfundición de aluminio					
Electrodo utilizado:	Cobre					
Dieléctrico:	Diésel					
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma	λc	λs	Mediciones			
ISO 1997	0.8mm	2.5mm	X5			
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Gap (mm)		
Desbaste	Acabado					
5	2	1	25.4	0.050		
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total		
3 min 19 seg		11 min 06 seg		14 min 25 seg		
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)						
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)
B4.1	5,012	5,523	5,385	4,853	4,715	5,098
B4.2	5,997	5,081	4,708	5,083	4,553	5,084
B4.3	4,732	4,744	5,847	5,014	4,897	5,047
B4.4	5,353	5,602	4,924	5,096	4,853	5,166
PROMEDIO TOTAL						5,099
RESULTADOS						
				Tipo de trabajo:		
				Fino		
				Clase de rugosidad:		
				N8		
				Proceso:		
				Electroerosión por penetración		




Ficha 4.1.14 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		B	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc			λs		Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm		X5
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
5	1.5	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado			Tiempo total		
3 min 13 seg		18 min 20 seg			21 min 33 seg		
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
B5.1	3,626	4,144	4,038	4,295	3,754	3,971	
B5.2	3,827	4,140	4,123	4,171	3,902	4,033	
B5.3	3,623	4,140	4,123	4,371	4,201	4,092	
B5.4	3,831	4,165	3,766	3,946	3,845	3,911	
PROMEDIO TOTAL						4,002	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N8		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		



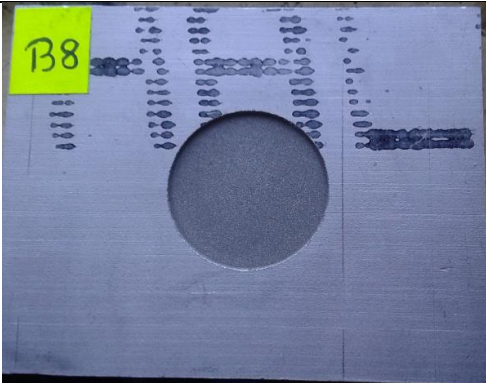
Ficha 4.1.15 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		B	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc		λs		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
5	1	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total			
3 min 23 seg		46 min 39 seg		50 min 02 seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
B6.1	2,752	2,767	2,840	3,066	2,925	2,870	
B6.2	2,718	2,961	2,702	3,201	2,874	2,891	
B6.3	2,696	2,917	2,593	2,939	2,985	2,826	
B6.4	2,850	2,524	2,818	2,974	2,987	2,831	
PROMEDIO TOTAL						2,854	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N7		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		




Ficha 4.1.16 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		B	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc		λs		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
4	2	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total			
4 min 40 seg		14 min 01 seg		18 min 41seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
B7.1	4,069	4,024	4,734	4,030	4,112	4,194	
B7.2	3,898	4,837	3,920	4,079	4,012	4,149	
B7.3	3,974	3,947	4,040	3,833	4,045	3,968	
B7.4	4,029	4,173	3,928	4,046	4,015	4,038	
PROMEDIO TOTAL						4,087	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N8		
Proceso:			Electroerosión por penetración				



Ficha 4.1.17 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		B	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc		λs		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
4	1.5	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado		Tiempo total			
4 min 54 seg		32 min 16 seg		37 min 10 seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
B8.1	3,078	3,306	3,511	3,148	3,746	3,304	
B8.2	3,198	2,947	3,499	3,458	3,102	3,241	
B8.3	3,748	3,292	3,042	3,655	3,125	3,372	
B8.4	3,484	3,246	3,528	3,660	3,625	3,509	
PROMEDIO TOTAL						3,356	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N8		
Proceso:			Electroerosión por penetración				

Ficha 4.1.18 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		B	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λ_c			λ_s		Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm		X5
Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
Desbaste	Acabado						
4	1	1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste		Tiempo de acabado			Tiempo total		
4 min 43 seg		53 min 10 seg			57 min 53 seg		
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
B9.1	2,024	1,980	2,038	2,039	1,890	1,994	
B9.2	2,014	2,005	1,885	2,130	2,128	2,032	
B9.3	1,962	2,101	2,060	1,845	1,989	1,991	
B9.4	2,011	1,815	2,049	2,074	1,890	1,968	
PROMEDIO TOTAL						1,996	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N7		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		

**Ficha 4.1.19 Ficha general de resultados de rugosidad superficial promedio
(Ra) con electrodo de grafito**

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:	Experimental		Ítem		A	
Fecha de ejecución:	2016/10/03					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:	Carlos Santamaría		Revisado por:	Ing. Cristian Pérez		
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:			Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:			Grafito			
Dieléctrico:			Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma		λ_c			λ_s	Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm	X5
Probeta	Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Gap (mm)	Rugosidad superficial Ra(μm)
	Desbaste	Acabado				
A1	6	2	1	25.4	0.050	6,118
A2	6	1.5	1	25.4	0.050	5,283
A3	6	1	1	25.4	0.050	4,054
A4	5	2	1	25.4	0.050	5,722
A5	5	1.5	1	25.4	0.050	4,936
A6	5	1	1	25.4	0.050	3,946
A7	4	2	1	25.4	0.050	4,974
A8	4	1.5	1	25.4	0.050	4,103
A9	4	1	1	25.4	0.050	3,593

Ficha 4.1.20 Ficha general de resultados de rugosidad superficial promedio (Ra) con electrodo de cobre

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:	Experimental		Ítem	B		
Fecha de ejecución:	2016/10/03					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:	Carlos Santamaría		Revisado por:	Ing. Cristian Pérez		
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:			Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:			Cobre			
Dieléctrico:			Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma		λ_c			λ_s	Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm	X5
Probeta	Amperaje (A)		Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Gap (mm)	Rugosidad superficial Ra(μ m)
	Desbaste	Acabado				
B1	6	2	1	25.4	0.050	5,232
B2	6	1.5	1	25.4	0.050	4,182
B3	6	1	1	25.4	0.050	2,936
B4	5	2	1	25.4	0.050	5,099
B5	5	1.5	1	25.4	0.050	4,002
B6	5	1	1	25.4	0.050	2,854
B7	4	2	1	25.4	0.050	4,087
B8	4	1.5	1	25.4	0.050	3,356
B9	4	1	1	25.4	0.050	1,996

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la tabla 4.1 se muestran los valores de rugosidad superficial que se obtuvieron en el mecanizado de electroerosión por penetración de las diferentes probetas.

Tabla 4.1: Valores de rugosidad superficial promedio obtenidos en el mecanizado de electroerosión por penetración con electrodos de grafito y cobre

Probeta	Rugosidad superficial con electrodo de grafito (μm)	Rugosidad superficial con electrodo de cobre (μm)	% de mejora
1	6,118	5,232	14,48
2	5,283	4,182	20,84
3	4,054	2,936	27,57
4	5,722	5,099	10,89
5	4,936	4,002	18,93
6	3,946	2,854	27,66
7	4,974	4,087	17,82
8	4,103	3,356	18,19
9	3,593	1,996	34,44

Fuente: (El autor)

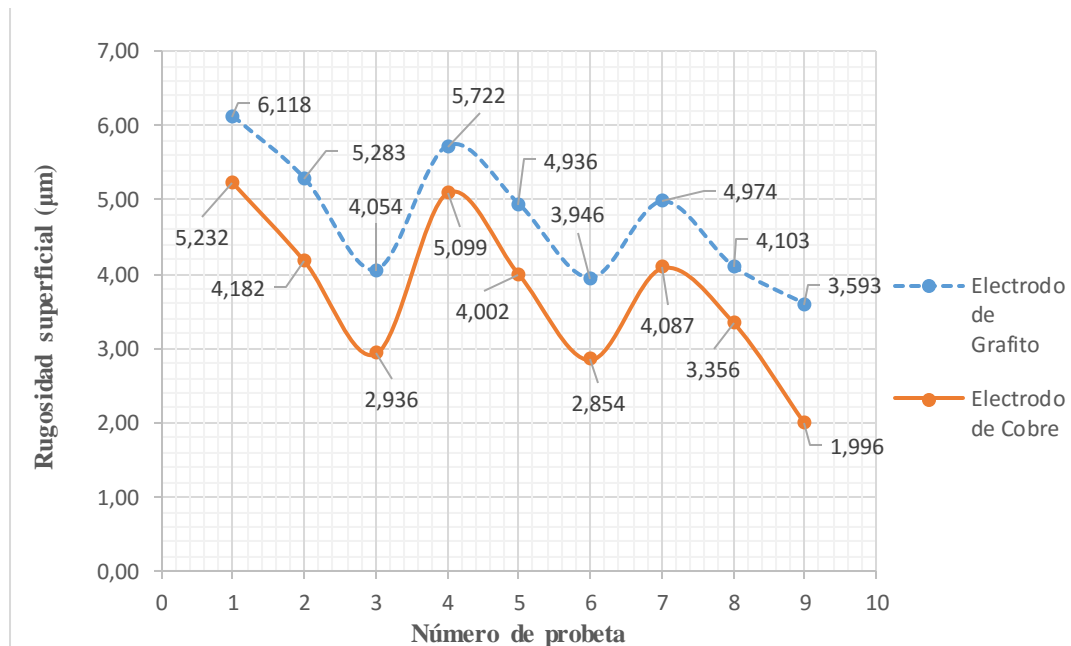


Fig. 4.1: Rugosidad superficial obtenida con electrodos de grafito y cobre en probeta de microfundición de aluminio

Fuente: (El autor)

En la figura 4.1 se puede observar que la rugosidad superficial en electroerosión por penetración en microfundición de aluminio varía de acuerdo a los parámetros de corte, resultando mejor la rugosidad obtenida en el mecanizado con electrodo de cobre ya que la rugosidad superficial es menor que cuando se utiliza electrodo de grafito, debido a las siguientes consideraciones:

- El tasa de eliminación de material es menor con electrodo de cobre por lo cual el tiempo de mecanizado es mayor y la rugosidad superficial disminuye.

Para el cálculo de la MRR primero se calcula la masa mediante la ecuación 2.13:

- Con electrodo de grafito

$$m = m_i - m_f \text{ [g]}$$

$$m = 163.2 - 160.5 = 2.7$$

- Con electrodo de cobre

$$m = m_i - m_f \text{ [g]}$$

$$m = 162.5 - 160 = 2.5$$

Luego se calcula el volumen del material arrancado en la pieza (V_2) con la ecuación 2.12, con la densidad del aluminio que es de 2.7 gr/cm^3 :

- Con electrodo de grafito

$$V_2 = \frac{m}{\rho} \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$V_2 = \frac{2.7}{2.7 \times 10^{-3}} = 1000 \text{ mm}^3$$

- Con electrodo de cobre

$$V_2 = \frac{m}{\rho} \text{ [mm}^3\text{]}$$

$$V_2 = \frac{2.5}{2.7 \times 10^{-3}} = 925.93 \text{ mm}^3$$

Finalmente se calcula el MRR con la ecuación 2.11.

- Con electrodo de grafito

$$MRR = \frac{V_2}{t} \left[\frac{mm^3}{min} \right]$$

$$MRR = \frac{1000}{10.683} = 93.60 \frac{mm^3}{min}$$

- Con electrodo de cobre

$$MRR = \frac{V_2}{t} \left[\frac{mm^3}{min} \right]$$

$$MRR = \frac{925.93}{13.016} = 71.134 \frac{mm^3}{min}$$

Como se observa la tasa de eliminación de material con electrodo de grafito es de 93.60 mm³/min, mientras que la tasa de eliminación de material con electrodo de cobre es menor con un valor de 71.134 mm³/min.

- El electrodo de cobre posee una mayor conductividad eléctrica que es (100-101 % I.A.C.S)
- El cobre posee una estructura densa por lo que no absorbe el fluido dieléctrico mientras que el grafito posee porosidades.
- El electrodo de grafito posee mayor conductividad térmica (160 W/m.K) lo cual permite que el electrodo no se recaliente con facilidad.
- El tiempo de mecanizado es mayor con electrodo de cobre por lo cual disminuye la rugosidad superficial, ya que a medida de la rugosidad superficial disminuye el tiempo de mecanizado aumenta.

Las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 indican los parámetros de operación que se utilizó para el mecanizado.

Tabla 4.2: Parámetros de operación utilizados para el mecanizado por electroerosión por penetración a 6 amperios

Electroerosión con electrodo de grafito		
Amperaje Desbaste (A)	Amperaje Acabado (A)	Ra (µm)
6	2	6,118
	1.5	5,283
	1	4,054
Electroerosión con electrodo de cobre		
6	2	5,232
	1.5	4,182
	1	2,936

Fuente: (El autor)

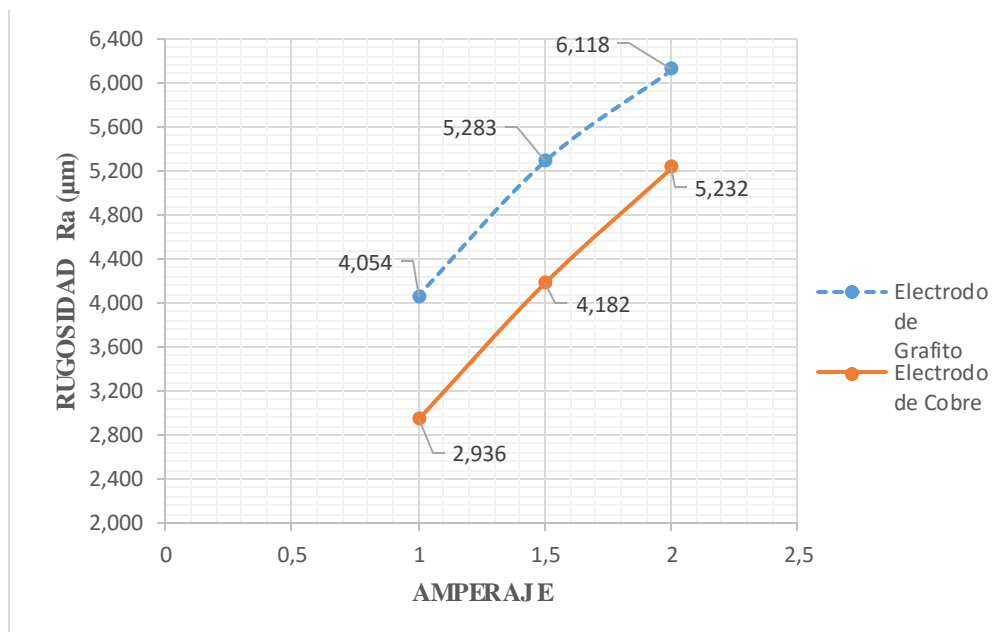


Fig. 4.2: Comportamiento de la rugosidad bajo condiciones de la tabla 4.2
(Fuente: Autor)

En la figura 4.2 se puede observar el comportamiento de la rugosidad al mecanizarse bajo diferentes parámetros de corte como son 6 amperios para el desbaste y tres niveles de intensidad como son 2, 1.5 y 1 amperio respectivamente para acabado y podemos

notar que bajo estos parámetros la rugosidad resulta mayor con electrodo de grafito que con electrodo de cobre.

Tabla 4.3: Parámetros de operación utilizados para el mecanizado por electroerosión por penetración a 5 amperios

Electroerosión con electrodo de grafito		
Amperaje Desbaste (A)	Amperaje Acabado (A)	Ra (μm)
5	2	5,722
	1.5	4,936
	1	3,946
Electroerosión con electrodo de cobre		
5	2	5,099
	1.5	4,002
	1	2,854

Fuente: (El autor)

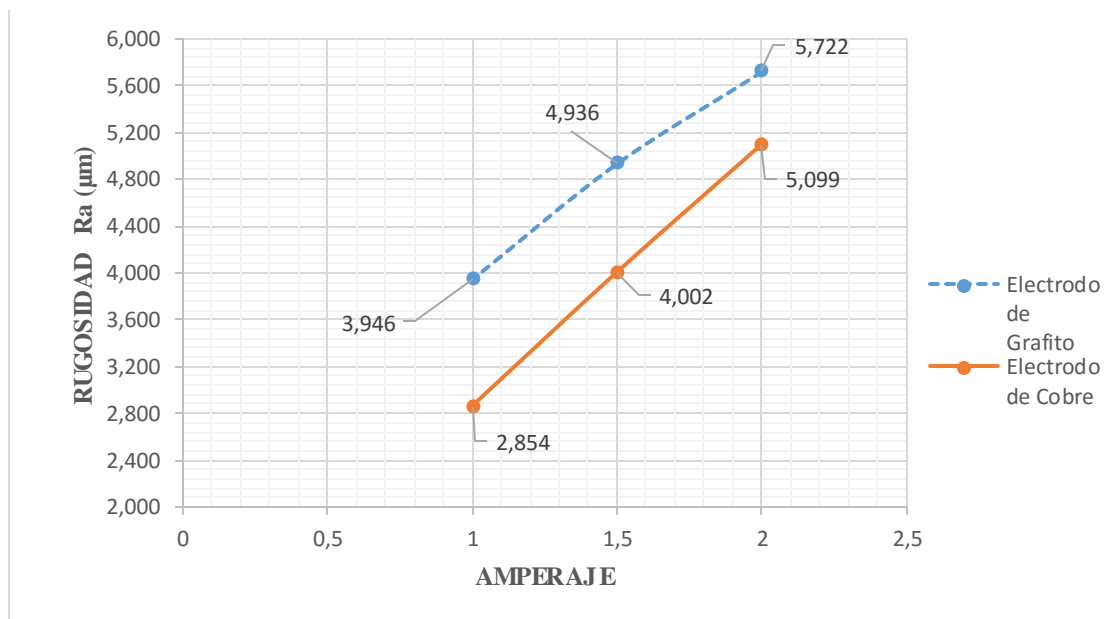


Fig. 4.3: Comportamiento de la rugosidad bajo condiciones de la tabla 4.3

Fuente: (El autor)

La figura 4.3 representa la rugosidad superficial obtenida en función de los amperajes de acabado los cuales son 2, 1.5 y 1; en donde se puede observar que a medida que el amperaje aumenta la rugosidad también aumenta.

Tabla 4.4: Parámetros de operación utilizados para el mecanizado por electroerosión por penetración a 4 amperios

Electroerosión con electrodo de grafito		
Amperaje Desbaste (A)	Amperaje Acabado (A)	Ra (µm)
4	2	4,974
	1.5	4,103
	1	3,593
Electroerosión con electrodo de cobre		
4	2	4,087
	1.5	3,356
	1	1,996

Fuente: (El autor)

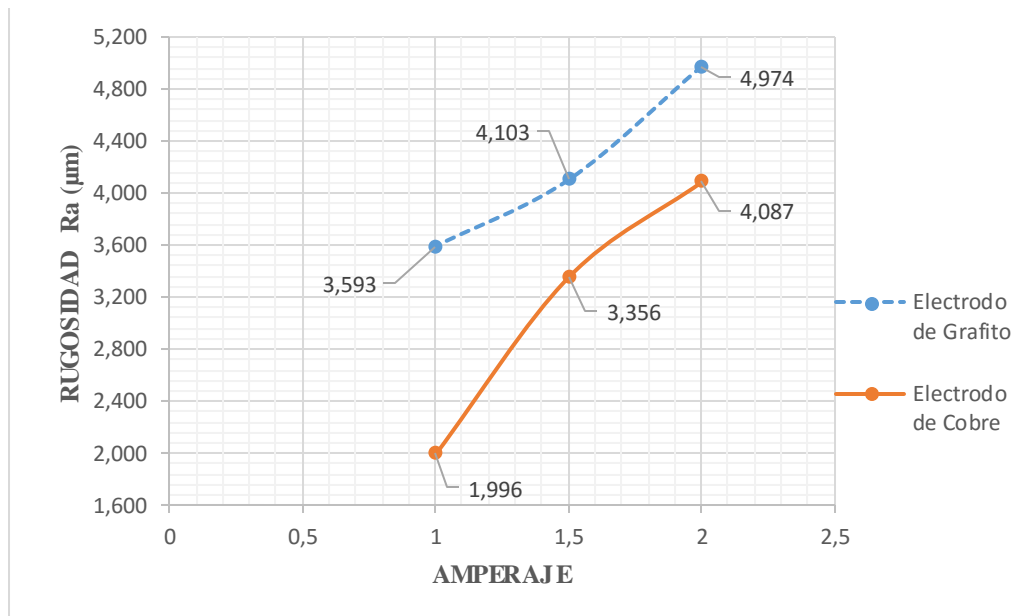


Fig. 4.4: Comportamiento de la rugosidad bajo condiciones de la tabla 4.4

Fuente: (El autor)

La rugosidad superficial está en función del amperaje ya que en la figura 4.4 se puede observar como a medida que se reduce los amperajes de trabajo se reduce la rugosidad superficial es decir la rugosidad superficial más baja se logra con un amperaje de desbaste de 4 amperios y un amperaje de 1 amperio para acabado.

Tabla 4.5: Tiempo de mecanizado en electroerosión por penetración

Probeta	Tiempo con Electrodo de Grafito (seg)	Tiempo con Electrodo de Cobre (seg)
1	641	781
2	1176	1332
3	2440	2745
4	992	1045
5	1345	1473
6	2883	3002
7	1436	1661
8	2468	2830
9	2994	3473

Fuente: (El autor)

En la tabla 4.5 las probetas 1, 2 y 3 están mecanizadas con un amperaje de 6 amperios para desbaste y para el acabado 2, 1.5 y 1 amperio respectivamente; las probetas 4, 5 y 6 están mecanizadas con un amperaje de 5 amperios para el desbaste; las probetas 7, 8 y 9 están mecanizadas con un amperaje de 4 amperios para desbaste y para el acabado al igual que las anteriores.

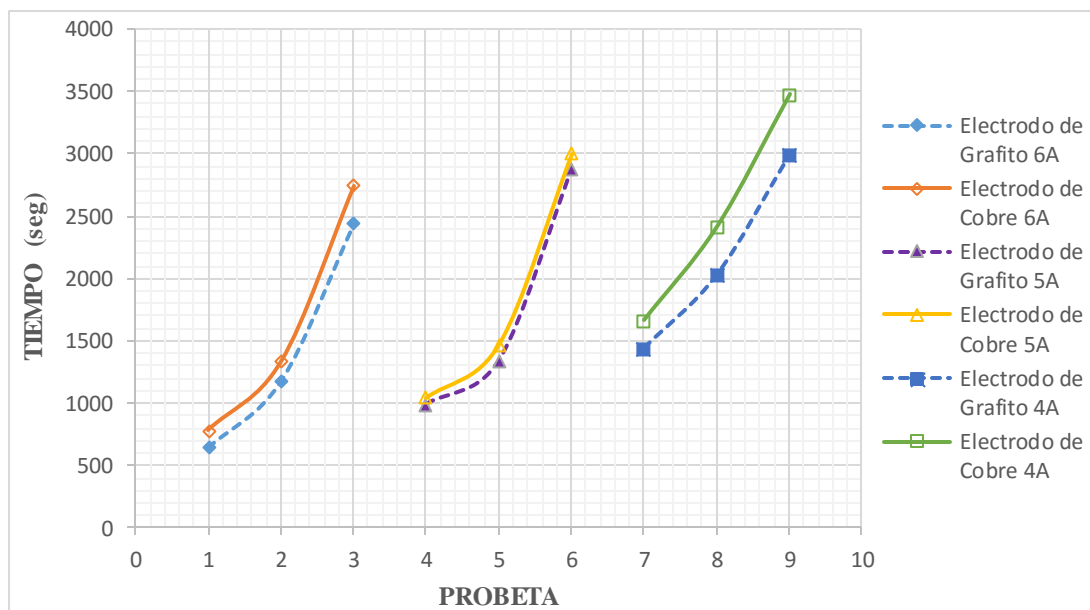


Fig. 4.5: Tiempos de mecanizado de las diferentes probetas

Fuente: (El autor)

En la figura 4.5 se representa todas las probetas de estudio en donde se puede observar que el tiempo de mecanizado bajo diferentes amperajes tanto para el desbaste como para el acabado, es mayor con electrodo de cobre que con electrodo de grafito.

Además podemos observar que las probetas 4, 5 y 6 mecanizadas con un amperaje de 5 A para desbaste y 2, 1.5 y 1 amperios respectivamente para acabado los tiempos de mecanizado se asemejan debido a que los valores de amperajes son valores medios que son recomendados para operar la máquina.

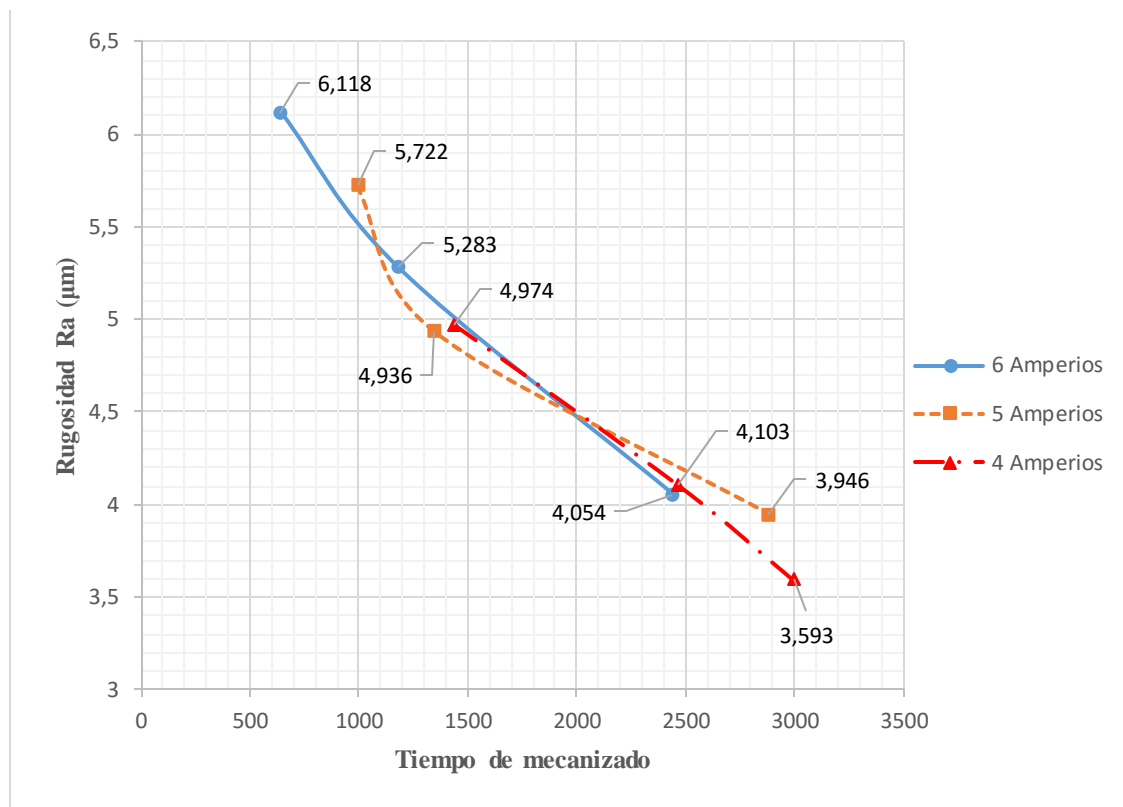


Fig. 4.6: Comportamiento de la rugosidad vs el tiempo de mecanizado con electrodo de grafito.

Fuente: (El autor)

En la figura 4.6 se puede observar que la rugosidad disminuye a medida que el tiempo de mecanizado aumenta ya que al trabajar con amperajes menores el tiempo de mecanizado aumenta y por ende la rugosidad disminuye.

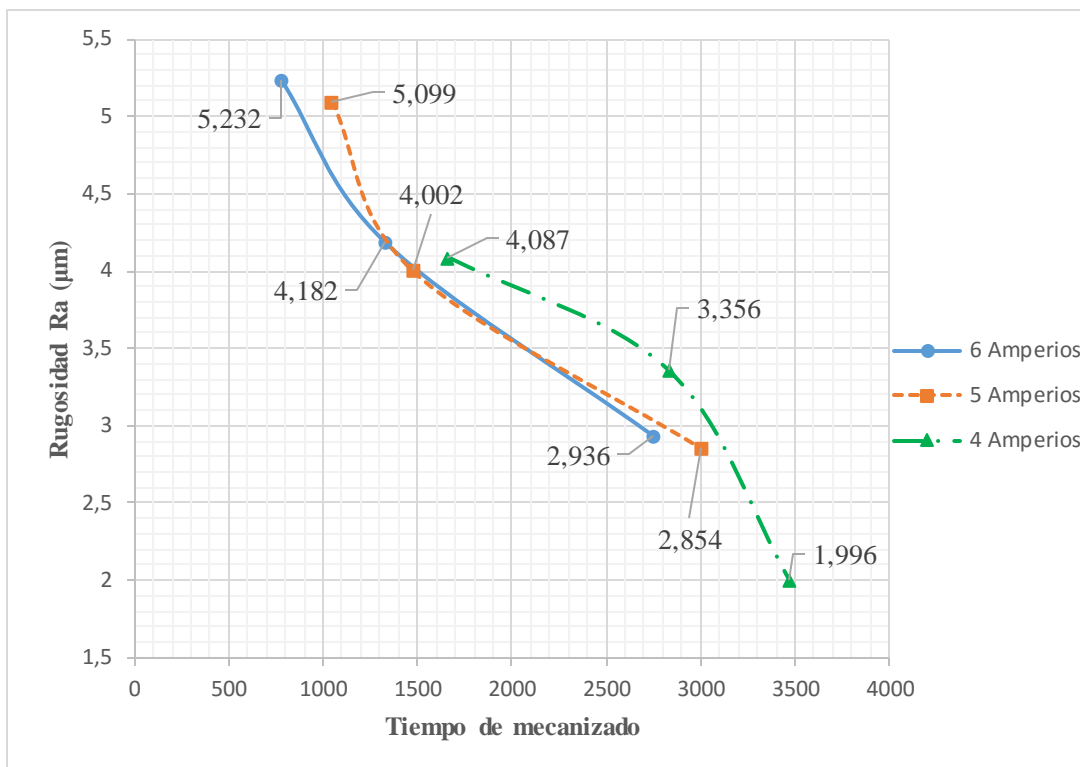


Fig. 4.7: Comportamiento de la rugosidad vs el tiempo de mecanizado con electrodo de cobre.

Fuente: (El autor)

La figura 4.7 representa el mecanizado con electrodo de cobre en donde se puede observar que la rugosidad superficial disminuye cuando el tiempo de mecanizado es mayor ya que el tiempo aumenta debido a que en el acabado se utiliza amperajes menores por lo cual el tiempo de mecanizado es mayor y la rugosidad disminuye.

La tabla 4.6 muestra los tiempos de mecanizado tanto con electrodo de grafito como de cobre de cada una de las probetas en función de los amperajes utilizados.

Tabla 4.6: Tiempo de mecanizado en electroerosión por penetración en función de los amperajes

Probeta	Amperaje (A)		Tiempo con Electrodo de Grafito (seg)	Tiempo con Electrodo de Cobre (seg)
	Desbaste	Acabado		
1	6	2	641	781
2		1,5	1176	1332
3		1	2440	2745
4	5	2	992	1045

5		1,5	1345	1473
6		1	2883	3002
7	4	2	1436	1661
8		1,5	2468	2830
9		1	2994	3473

Fuente: (El autor)

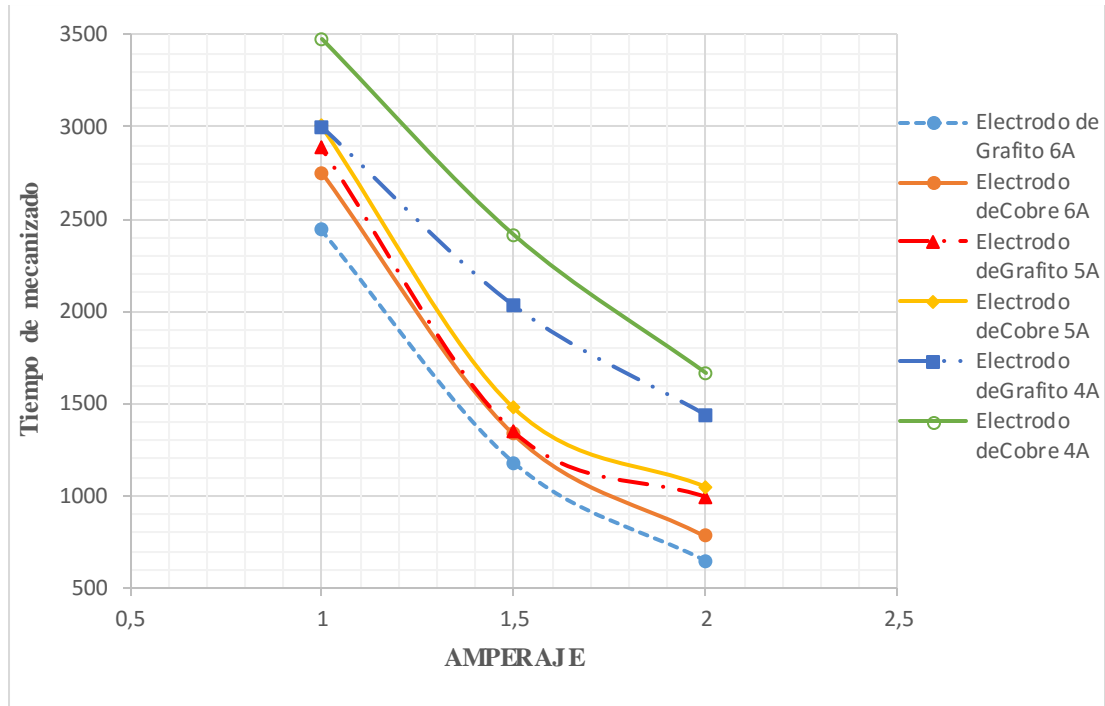


Fig. 4.8: Comportamiento del amperaje vs el tiempo de mecanizado.

Fuente: (El autor)

En la figura 4.8 se representa el comportamiento del amperaje en función del tiempo de mecanizado en donde se puede observar que el tiempo de mecanizado aumenta a medida que se reduce el amperaje, además que el tiempo de mecanizado es mayor con electrodo de cobre.

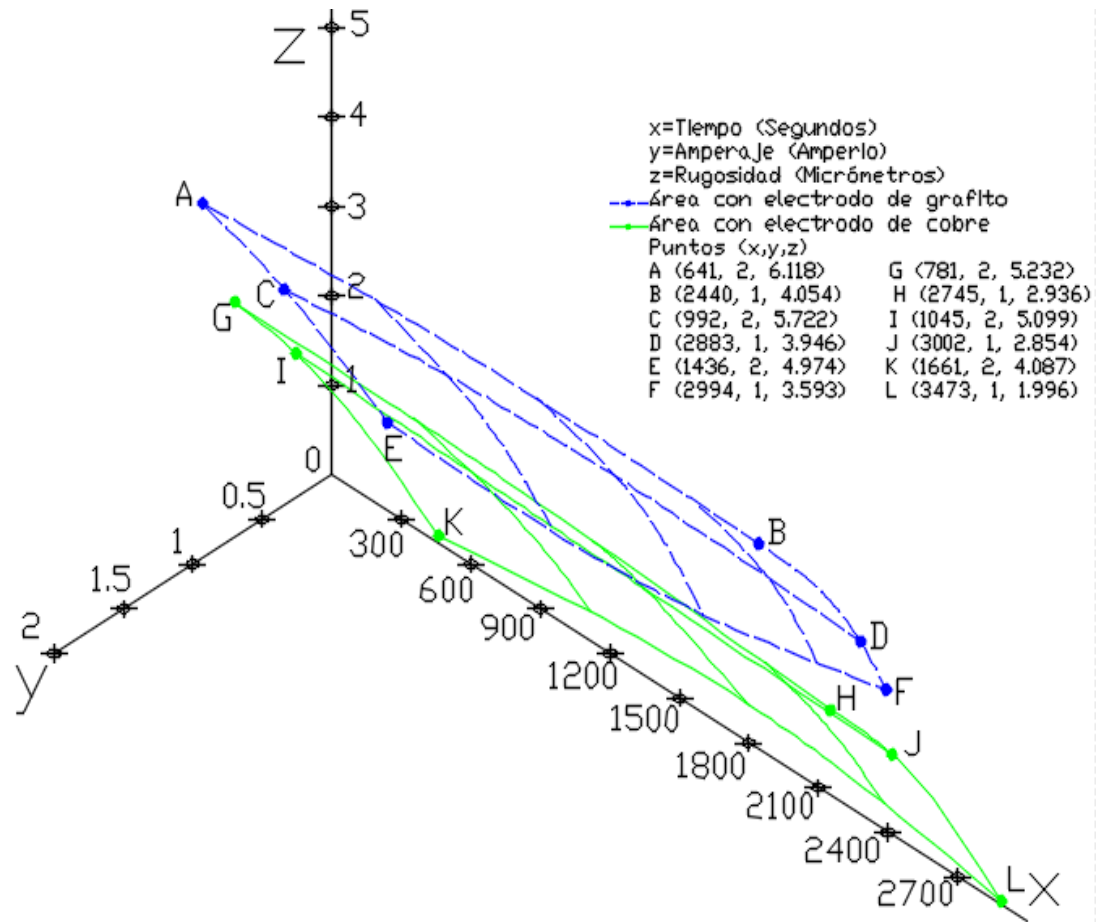


Fig. 4.9: Comportamiento de la rugosidad en función del amperaje de acabado y tiempo de mecanizado con electrodos de grafito y cobre en el mecanizado en electroerosión por penetración en microfundición de aluminio.

Fuente: (El autor)

La figura 4.9 representa el área en el mecanizado en electroerosión por penetración en microfundición de aluminio tanto con electrodo de grafito y cobre, y se observa que el área generada con electrodo de grafito tendrá un menor tiempo de mecanizado pero mayor nivel de rugosidad, mientras que al trabajar con electrodo de cobre el tiempo de mecanizado aumenta pero la rugosidad superficial disminuye. Además al trabajar con amperajes mayores la rugosidad aumenta y al disminuir el amperaje la rugosidad también disminuye.

La tabla 4.7 muestra los parámetros óptimos para el mecanizado en electroerosión por penetración para minimizar la rugosidad superficial.

Tabla 4.7: Parámetros óptimos en el mecanizado en electroerosión por penetración.

Parámetros óptimos de mecanizado	
Nivel de intensidad (I)	
Desbaste (A)	Acabado (A)
6	2
5	1,5
4	1
Tiempo de impulso	
Desbaste (seg)	Acabado (seg)
9	3
Profundidad de corte (1mm)	
Desbaste (mm)	Acabado (mm) (entre 0,20-0,30 % de la profundidad de corte)
0,75	0,25
GAP	Entre 0,025 y 0,050
Electrodos	Grafito
	Cobre
Dieléctrico	Hidrocarburos, aceites minerales

Fuente: (El autor)

En la tabla 4.7 se pueden observar los diferentes parámetros que se pueden utilizar para el mecanizado en electroerosión por penetración en microfundición de aluminio de los cuales los valores que están en negrilla generan los niveles de rugosidad superficial más bajo.

4.3 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

La verificación de la hipótesis se realizó mediante el método “T Student con Distribución de diferencia entre dos medias. Para lo cual se establece la siguiente hipótesis:

Es mayor la rugosidad superficial cuando se modifican los parámetros de corte en el mecanizado por el proceso de electroerosión por penetración con electrodo de grafito que con electrodo de cobre

Las variables que intervienen en la hipótesis son:

Variable independiente

Parámetros de corte

Variable dependiente

Rugosidad superficial

Simbología a utilizar:

Ha: Hipótesis de investigación o alternativa

Ho: Hipótesis nula

α : Margen de error

X: Denota la rugosidad superficial media de la electroerosión con electrodo de grafito

Y: Denota la rugosidad superficial media de la electroerosión con electrodo de cobre

n1: Población 1

n2: Población 2

Modelo Lógico

Hipótesis Nula (Ho)

Ho: No Es mayor la rugosidad superficial cuando se modifican los parámetros de corte en el mecanizado por el proceso de electroerosión por penetración con electrodo de grafito que con electrodo de cobre.

Hipótesis alterna (Ha)

Es mayor la rugosidad superficial cuando se modifican los parámetros de corte en el mecanizado por el proceso de electroerosión por penetración con electrodo de grafito que con electrodo de cobre.

Modelo Matemático

$$H_0 = U_x = U_y$$

$$H_a = U_x \neq U_y$$

Determinación del Nivel de Significancia

Para este tipo de trabajo experimental se utilizará un nivel de confianza del 95%, con un nivel de significancia del 5%.

Nivel de Significancia

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{0.05}{2} = 0.025$$

Grados de Libertad

$$v = n_1 + n_2 - 2$$

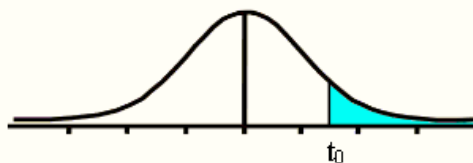
$$v = 9 + 9 - 2$$

$$v = 16$$

Resolución:

Distribución t tabulado

Tabla t-Student



Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453

Fig. 4.10: Distribución T-Student [28].

T tabulado = 2.1199

Cálculo de la distribución t

La tabla 4.8 muestra los valores de rugosidad promedio que se obtuvieron en este estudio.

Tabla 4.8: Rugosidad promedio obtenida en este estudio

Probeta	Rugosidad superficial con electrodo de grafito (X) (µm)	Rugosidad superficial con electrodo de cobre (Y) (µm)
1	6,118	5,232
2	5,283	4,182
3	4,054	2,936
4	5,722	5,099

5	4,936	4,002
6	3,946	2,854
7	4,974	4,087
8	4,103	3,356
9	3,593	1,996
Media	4,7475	3,7494

Fuente: (El autor)

Para el cálculo de la varianza se utilizó la ecuación 4.1 según Álvarez, 2011.

$$S^2 = \frac{\Sigma(X_i - \bar{X})^2 + \Sigma(Y_i - \bar{Y})^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$S^2 = \frac{6,072 + 9,072}{9 + 9 - 2}$$

$$S^2 = 0,94648$$

Se sustituye los valores correspondientes en la ecuación 4.2 según Álvarez, 2011 para obtener la distribución t

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{S^2}{n_1} + \frac{S^2}{n_2}}} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

$$t = \frac{4,7475 - 3,7494}{\sqrt{\frac{0,94648}{9} + \frac{0,94648}{9}}}$$

$$t = \frac{0,9981}{0,458616}$$

$$t = 2,18$$

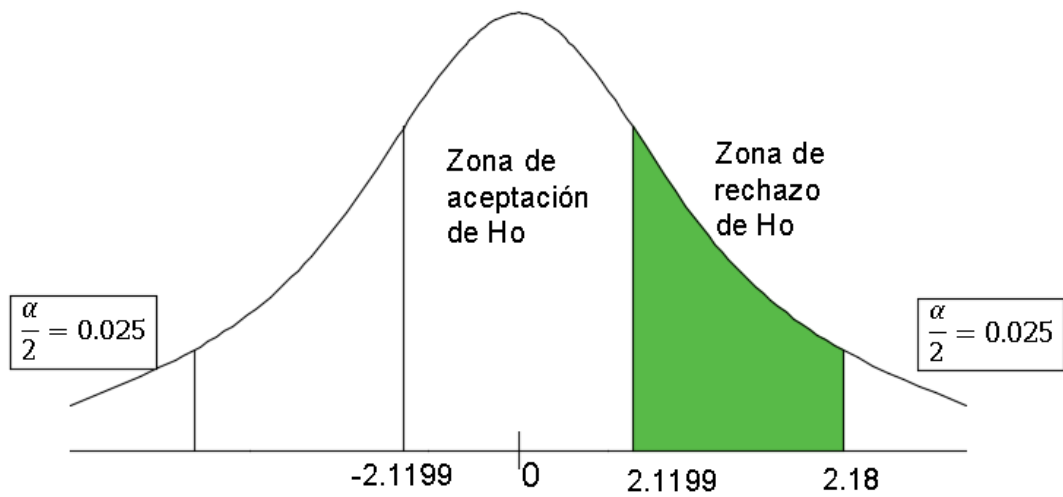


Fig. 4.11: Campana de la distribución t-Student.

Fuente: (El autor)

$$t \text{ calculado} = 2,18 > t \text{ tabulado} = 2,1199$$

Debido a que el t calculado es mayor que el t tabulado como se observa en la figura 4.20 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna la cual dice:

“Es mayor la rugosidad superficial cuando se modifican los parámetros de corte en el mecanizado por el proceso de electroerosión por penetración con electrodo de grafito que con electrodo de cobre”.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se determinó que en el mecanizado de electroerosión por penetración los parámetros que intervienen en la rugosidad superficial son el nivel de intensidad o amperaje, el tiempo de impulso es decir el tiempo que se erosiona el material y los diferentes tipos de electrodo que se pueden utilizar como son el cobre y el grafito, además el rango de rugosidad superficial debe estar entre 1,6 y 6,3 μm .
- Los electrodos utilizados fueron de grafito y cobre debido a las propiedades que presentan como son: tener una alta temperatura de fusión, alta conductividad eléctrica y térmica, también debido a la disponibilidad en el mercado, las dimensiones tanto para los electrodos de cobre y grafito tienen un diámetro de 25.4 mm y una longitud de 50 mm la cual sirve para la sujeción del electrodo.
- Un factor del cual depende la rugosidad es el nivel de intensidad o amperaje, el cual es de gran importancia debido a que si se sube el amperaje la rugosidad superficial también aumenta es por ello que se trabajó con amperajes promedios como son 6, 5 y 4 amperios para desbaste y 2, 1.5 y 1 amperio para acabado dando como resultado que la menor rugosidad superficial nos resulta al erosionar con un amperaje de 4 amperios para desbaste y 1 amperio para acabado dándonos una rugosidad de 3,593 μm con electrodo de grafito y 1,996 μm con electrodo de cobre.
- El tiempo de impulso también es un factor que interviene en la rugosidad, ya que si este tiempo es muy prolongado el electrodo se va quemando y por ende se generan impurezas las cuales afectan a la rugosidad ya que se acumulan alrededor del electrodo y el elemento a mecanizar es por ello que existen dos tiempos de impulso una para el desbaste que es de 9 segundos y otro para el acabado de 3 segundos.

- El tipo de electrodo que se utiliza en este proceso de mecanizado tiene relación con la rugosidad debido a que al erosionar con electrodo de grafito nos dio una mayor rugosidad que cuando se erosionó con electrodo de cobre. La menor rugosidad obtenida con electrodo de grafito es de 3,593 μm y la menor rugosidad obtenida con electrodo de cobre es de 1,996 μm con lo cual genera un porcentaje de mejora considerable de 34,44%.
- La profundidad de acabado es de 0,25 mm debido a que para este tipo de mecanizado la profundidad de acabado esta entre el 20 al 30% de la profundidad total y al ser una profundidad de 1 mm se tomó un 25% para el acabado.
- El tiempo de acabado es mucho mayor que el tiempo de desbaste debido a que el desbaste se realiza a un nivel de intensidad mayor por lo cual el tiempo es relativamente corto y varía entre 2 y 5 minutos, en cambio el acabado se realiza con niveles de intensidad bajos por lo que el tiempo aumenta considerablemente.
- El tiempo de mecanizado está en función del tipo de electrodo y el amperaje que se utiliza para el desbaste, el tiempo de mecanizado con electrodo de cobre a un amperaje de 4 A para desbaste y 1 A para acabado es de 3473 segundos, mientras que con electrodo de grafito y a las mismas condiciones de amperaje el tiempo es de 2994 segundos, por lo cual se puede concluir que a medida que el amperaje disminuye el tiempo de mecanizado aumenta.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se debe lijar la superficie del electrodo que se va a utilizar para erosionar el elemento ya que al ser un proceso en donde se copia la forma del electrodo al elemento si la base del electrodo presenta irregularidades la superficie erosionada presentará las mismas irregularidades.
- Se deben trabajar con dos valores de tiempos de impulso uno para el desbaste y otro para el acabado ya que si se trabaja con un solo tiempo el electrodo se

quemará con facilidad y por ende el elemento erosionado no tendrá las mejores características.

- Para lograr niveles de rugosidad más bajos, el nivel de intensidad debe disminuir al momento que se realiza la operación de acabado, se pueden trabajar con valores de entre 1,5 a 0,5 amperios, pero se debe tener en cuenta que si se trabaja con el menor amperaje conlleva mayor tiempo de mecanizado y por ende el electrodo comenzara a quemarse.
- Al momento de llenar el tanque de trabajo con diésel se debe tomar en cuenta que el nivel del mismo debe cubrir tanto el elemento a erosionar y el electrodo que se está utilizando para que el diésel pueda actuar como refrigerante.
- Para realizar las mediciones con el rugosímetro la superficie a medir debe estar totalmente limpia libre de grasa o aceite para que no genere errores en la medición.

1. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Pérez. “Optimización del proceso de electroerosión”. Proyecto de titulación previo a la obtención del título de ingeniero Industrial, Universidad de Cantabria, Cantabria-España, 2014.
- [2] O. A. León. “Diseño de un generador de pulso para un sistema de micromanufactura por electroerosión”, Tesis, Programa de maestría y doctorado en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F, 2013.
- [3] V. A. Moreno, “Análisis Multivariable en el proceso de corte electro abrasivo por hilo para su aplicación en el sistema CAPP”, Tesis, Instituto Universitario de Experimental de Tecnología la Victoria. Aragua-Venezuela, 2014, pp.2-7.
- [4] J. J. Bazurto. “Estudio y diseño de fuente eléctrica para aplicaciones de electroerosión”, Tesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá-Colombia, 2015, pp.99-105.
- [5] J. L. Ordoñez. “Nuevas tendencias de mecanizado”, Vol. 1. Bogotá-Colombia, 2014, pp.1-2
- [6] M. Groover. *Fundamentos de manufactura moderna*. Tercera Ed. México Ed., McGraw Hill., 2007, pp. 18-22
- [7] P. Molera. *Electromecanizado, electroerosión y mecanizado electroquímico*. Primera Ed. Barcelona-España, Ed., Marcombo S.A., 1989, pp.21-39
- [8] F. Díaz. “Electroerosión”, Vol. 4. Cuautitlán-México: Departamento de ingeniería., 2007, pp.2-37
- [9] L. Caiza. “Análisis comparativo técnico en la mecanización de elementos por procesos no convencionales.” Tesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador, 2004.
- [10] R. Hernández. “Diseño y manufactura de moldes para la elaboración de blocs utilizando las máquinas electroerosionadora form 20 y de Inyección de plástico ft90.” Tesis, Universidad Tecnológica de Querétaro. Querétaro-México, 2013.
- [11] R. C. Lara, “Rediseño y automatización de una máquina Electroerosionadora con interfaz hombre-máquina para el laboratorio de CNC de la ESPE-EL”. Proyecto de

titulación previo a la obtención del título de ingeniero en Mecatrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga-Ecuador, 2014.

[12] C. M. Sánchez. “Conceptos de diseño de manufactura de piezas microfundidas”, Vol. 25. Bogotá-Colombia, 2005, pp.50-60

[13] I. Margüello. “Caracterización del desgaste de electrodos de grafito en electroerosión por penetración”, Tesis, Grado en ingeniería mecánica, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao, Bilbao-España, 2015.

[14] J. B. Giraudi. “Electroerosión”, Vol. 2. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Buenos Aires-Argentina, 2005, pp.2-19

[15] O. Chaides. “Sistema de control de espaciamiento para micro electroerosión mecanizada”, Vol. 23. Medellín-Colombia, 2014, pp.21-30

[16] A. Camprubí Graell. *Electroerosión, fundamentos de su física y su técnica*. Primera Ed. Barcelona-España, Ed., Marcombo S.A., 2007, pp. 166-169

[17] Y. Hernández. “Servicio de microfundición en aluminio”, 2014, [En línea]. Disponible: <http://fundural.com/principal/productos-servicio-microfundicion.html> [Accedido 20-05-2016]

[18] D. González. “Aluminios y metales Unicornio, S. A. Aleación de aluminio 6061”. Guadalajara, Jalisco-México. 2013. [En línea]. Disponible: <http://www.aluminiosmetalesunicornio.com.mx/6061.html> [Accedido 19-10-2016]

[19] Mersen. “Grafitos ELLOR para el mecanizado por electroerosión”, Vol. 1. Barcelona-España, 2014, pp.3-4

[20] R, Andrade. “Cobre electrolítico placas y barras”. Ficha técnica. Vigo –España, 2015, pp. 1-2

[21] C. Marín Villar. “Electroerosionadoras. Para quienes buscan buena exactitud y precisión”. Revista Metal Actual. Bogotá-Colombia, 2015, pp. 16-22

[22] 1302, UNE-EN ISO. “Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos”, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid-España, 2002.

- [23] O. F. Rodríguez. “Calidad superficial: Rugosidad”, Vol. 466. Rosario-Argentina, 2009, pp.1-12
- [24] GTM. Grupo tecnología mecánica. “Rugosidad superficial – procesos de fabricación”, Vol. 1. Universidad Nacional de Mar del Plata. Buenos Aires-Argentina, 2014, pp. 1-16
- [25] Mitutoyo Corporation. “Medidor de Rugosidad superficial Modelo SJ-210, Manual de Usuario” No. 99. Japón, 2015, pp. 1-8
- [26] ISO 4287:1997. “Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial (ISO 4287:1997, IDT)”. Primera Ed. Quito-Ecuador. 2014.
- [27] J. Álvarez. “Estadística para toma de decisiones”, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba-Ecuador, 2011, pp. 112
- [28] Departamento de matemática. “Tabla t-Student”, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires-Argentina, 2015, pp. 1-2. [En línea]. Disponible: http://cms.dm.uba.ar/academico/materias/1ercuat2015/probabilidades_y_estadistica_C/tabla_tstudent.pdf [Accedido 13-10-2016]




2. ANEXOS

ANEXO 1.- Análisis adicional de la operación de desbaste en electroerosión por penetración



En este estudio adicional se realizó el mecanizado por el proceso de electroerosión por penetración solo con amperaje para desbaste sin considerar el acabado. Para conocer el comportamiento de la rugosidad solo en la operación de desbaste y se ocuparon amperajes de 6, 5 y 4 amperios para el desbaste de una profundidad de 1 mm.

Para identificar las probetas mecanizadas con electrodo de grafito que va desde la ficha 1 hasta la ficha 3 se identificó con el ítem C y para el mecanizado con electrodo de cobre el ítem D que va desde la ficha 4 hasta la ficha 6.




Ficha 1 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		C	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Grafito			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc			λs		Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm		X5
Amperaje Desbaste (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
6		1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste						Tiempo total	
3 min 07 seg						3 min 07 seg	
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
C1.1	12,855	14,428	12,935	12,833	14,003	13,411	
C1.2	11,958	13,046	14,594	13,189	14,009	13,359	
C1.3	14,004	13,714	14,132	13,047	14,058	13,791	
C1.4	13,023	14,956	14,875	14,863	13,987	14,341	
PROMEDIO TOTAL						13,725	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N10		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		



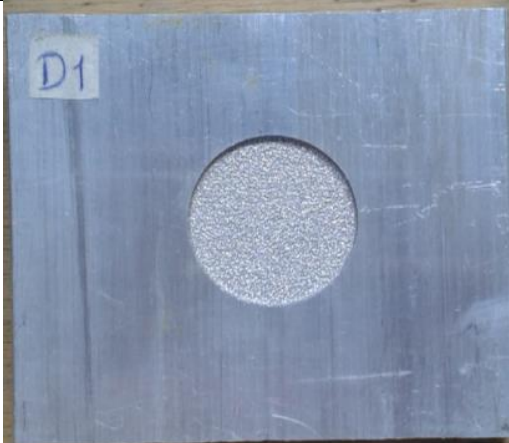
Ficha 2 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
DATOS INFORMATIVOS						
Tipo de estudio:	Experimental	Ítem	C			
Fecha de ejecución:	2016/10/03					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:	Carlos Santamaría	Revisado por:	Ing. Cristian Pérez			
Parámetros de Electroerosión por penetración						
Material:		Microfundición de aluminio				
Electrodo utilizado:		Grafito				
Dieléctrico:		Diésel				
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210						
Norma	λ_c	λ_s	Mediciones			
ISO 1997	0.8mm	2.5mm	X5			
Amperaje Desbaste (A)	Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Gap (mm)			
5	1	25.4	0.050			
Tiempo de desbaste			Tiempo total			
3 min 21 seg			3 min 21 seg			
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)						
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)
C2.1	12,543	12,628	11,892	12,594	12,468	12,425
C2.2	12,198	12,254	13,526	12,859	12,345	12,636
C2.3	12,960	12,548	11,987	13,456	12,987	12,788
C2.4	12,250	13,14	11,949	11,566	11,998	12,181
PROMEDIO TOTAL						12,507
RESULTADOS						
			Tipo de trabajo:			
			Fino			
			Clase de rugosidad:			
			N10			
			Proceso:			
			Electroerosión por penetración			



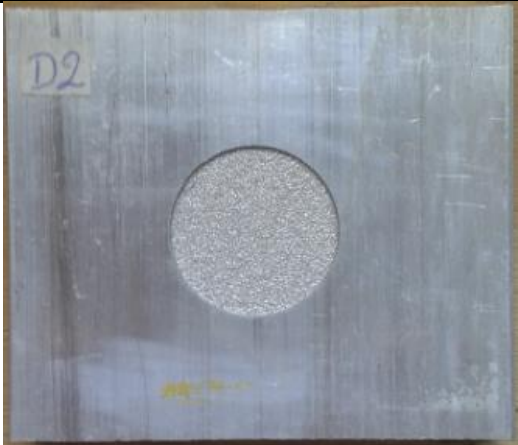
Ficha 3 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de grafito

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		C	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Grafito			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λ_c			λ_s		Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm		X5
Amperaje Desbaste (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
4		1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste						Tiempo total	
4 min 52 seg						4 min 52 seg	
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
C3.1	12,602	10,297	11,031	10,614	9,134	10,736	
C3.2	9,400	12,338	9,125	9,525	9,725	10,023	
C3.3	10,258	10,452	10,258	9,878	9,987	10,167	
C3.4	11,025	10,589	10,546	9,753	9,258	10,234	
PROMEDIO TOTAL						10,290	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N9		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		




Ficha 4 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		D	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λ_c			λ_s		Mediciones
ISO 1997		0.8mm			2.5mm		X5
Amperaje Desbaste (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
6		1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste						Tiempo total	
3 min 51 seg						3 min 51 seg	
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
D1.1	12,771	12,837	13,628	13,892	12,978	13,221	
D1.2	12,578	12,345	12,125	12,523	12,546	12,423	
D1.3	12,125	12,365	12,589	13,512	13,028	12,724	
D1.4	13,014	12,125	12,456	12,789	12,678	12,612	
PROMEDIO TOTAL						12,745	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N10		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		

Ficha 5 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		D	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λc		λs		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje Desbaste (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
5		1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste						Tiempo total	
3 min 45 seg						3 min 45 seg	
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
D2.1	12,771	11,530	11,142	10,528	11,468	11,488	
D2.2	10,381	10,611	10,785	10,895	10,458	10,626	
D2.3	11,258	11,269	11,589	11,425	11,256	11,359	
D2.4	11,546	11,308	11,879	12,541	11,529	11,761	
PROMEDIO TOTAL						11,308	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N9		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		

Ficha 6 Reporte de rugosidad superficial con electrodo de cobre

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
		REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		Experimental		Ítem		D	
Fecha de ejecución:		2016/10/03					
Lugar de estudio		Universidad Técnica de Ambato					
Realizado por:		Carlos Santamaría		Revisado por:		Ing. Cristian Pérez	
Parámetros de Electroerosión por penetración							
Material:				Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:				Cobre			
Dieléctrico:				Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210							
Norma		λ_c		λ_s		Mediciones	
ISO 1997		0.8mm		2.5mm		X5	
Amperaje Desbaste (A)		Profundidad de corte (mm)		Diámetro del electrodo (mm)		Gap (mm)	
4		1		25.4		0.050	
Tiempo de desbaste						Tiempo total	
5 min 33 seg						5 min 33 seg	
REGISTRO DE MEDICIONES DE (Ra) (μm)							
Probeta	Med. 1	Med.2	Med.3	Med.4	Med.5	Promedio (μm)	
D3.1	9,123	9,297	9,012	9,756	8,487	9,135	
D3.2	9,425	8,798	9,258	9,023	9,458	9,192	
D3.3	9,875	9,625	9,123	9,258	9,456	9,467	
D3.4	8,789	9,890	9,108	8,789	8,945	9,104	
PROMEDIO TOTAL						9,225	
RESULTADOS							
					Tipo de trabajo:		
					Fino		
					Clase de rugosidad:		
					N9		
					Proceso:		
					Electroerosión por penetración		

Ficha 7 Ficha general de resultados de rugosidad superficial promedio (Ra) en desbaste con electrodos de grafito y cobre



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 					
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:	Experimental	Ítem	A		
Fecha de ejecución:	2016/10/03				
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato				
Realizado por:	Carlos Santamaría	Revisado por:	Ing. Cristian Pérez		
Parámetros de Electroerosión por penetración					
Material:		Microfundición de aluminio			
Electrodo utilizado:		Grafito y Cobre			
Dieléctrico:		Diésel			
Parámetros de medición del rugosímetro MITUTOYO SJ 210					
Norma		λ_c		λ_s	Mediciones
ISO 1997		0.8mm		2.5mm	X5
Probeta	Amperaje (A)	Profundidad de corte (mm)	Diámetro del electrodo (mm)	Gap (mm)	Rugosidad superficial Ra(μm)
	Desbaste Acabado				
C1	6	1	25.4	0.050	13,725
C2	5	1	25.4	0.050	12,507
C3	4	1	25.4	0.050	10,290
D1	6	1	25.4	0.050	12,745
D2	5	1	25.4	0.050	11,308
D3	4	1	25.4	0.050	9,225

Tabla 1: Valores de rugosidad superficial promedio obtenidos en el mecanizado de electroerosión por penetración en desbaste con electrodos de grafito y cobre

Probeta	Rugosidad superficial con electrodo de grafito (μm)	Rugosidad superficial con electrodo de cobre (μm)	% de mejora
1	13,725	12,745	7,14
2	12,507	11,308	9,59
3	10,290	9,225	10,35

Fuente: (El autor)

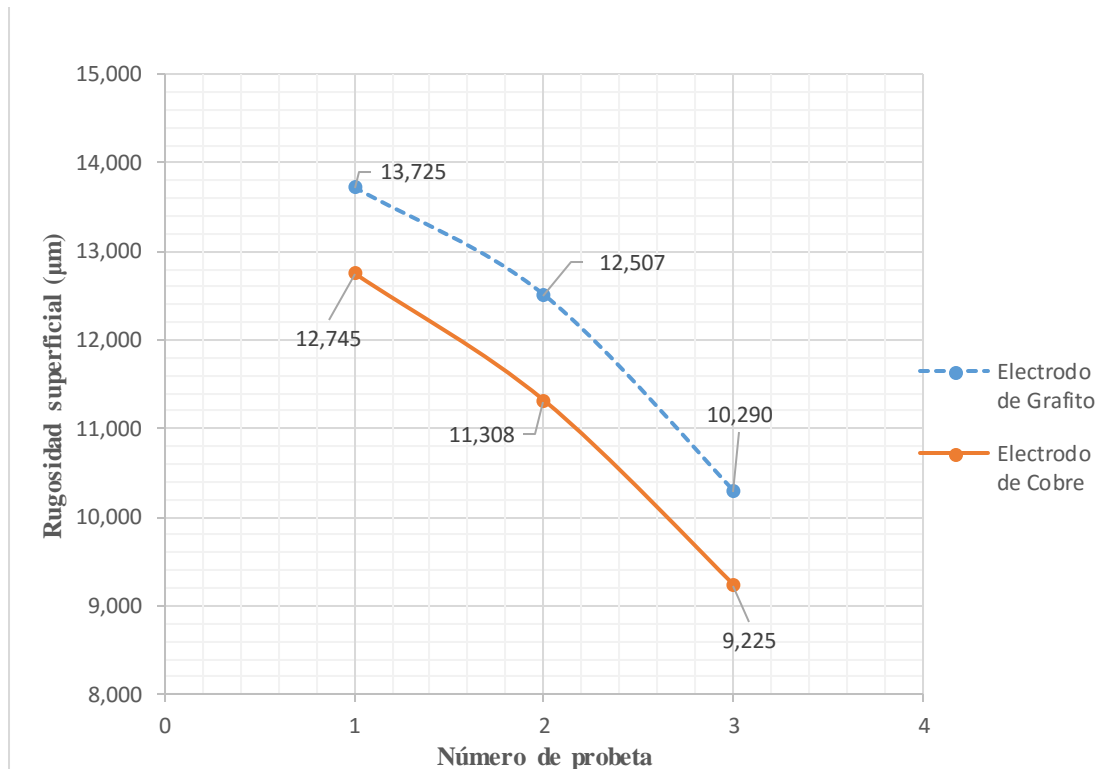


Fig. 1: Comparación de la rugosidad superficial en desbaste vs el tipo de electrodo

Fuente: (El autor)

En la figura 1 se observa como la rugosidad obtenida en el desbaste es mayor con electrodo de grafito que con electrodo de cobre.

Tabla 2: Parámetros de operación utilizados para el mecanizado por electroerosión por penetración en desbaste

Probeta	Amperaje Desbaste (A)	Ra (μm)
C1	6	13,725
C2	5	12,507
C3	4	10,290
D1	6	12,745
D2	5	11,308
D3	4	9,225

Fuente: (El autor)

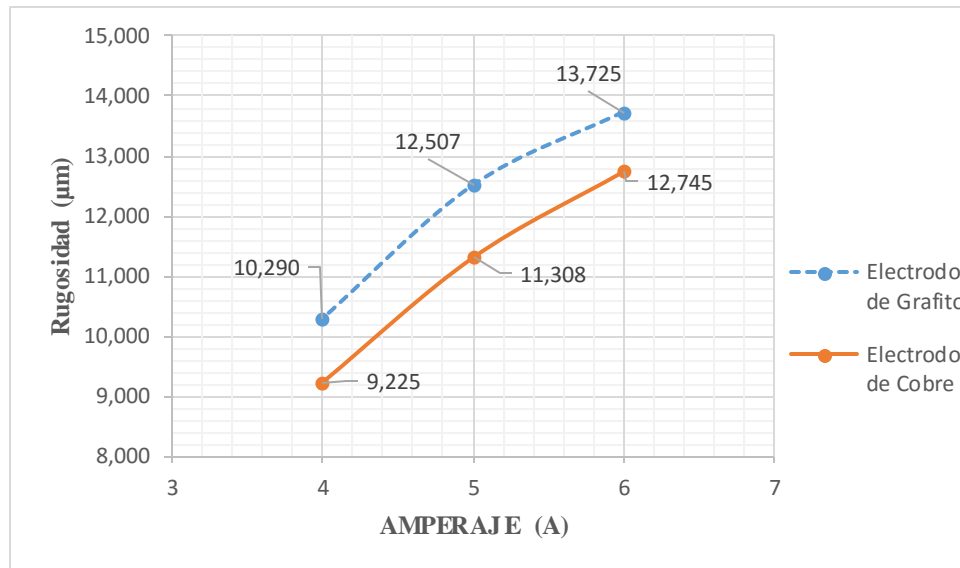


Fig. 2: Comparación de la rugosidad superficial en desbaste vs el amperaje

Fuente: (El autor)

Como se puede observar en la figura 2 la rugosidad obtenida en desbaste está en función del amperaje utilizado, a medida que el amperaje disminuye la rugosidad también disminuye, es así que con un amperaje de 4 A la rugosidad obtenida en desbaste es de 10,290 μm con electrodo de grafito y 9,225 μm con electrodo de cobre.

Tabla 3: Tiempo de mecanizado en electroerosión por penetración en desbaste

Probeta	Tiempo con Electrodo de Grafito (seg)	Tiempo con Electrodo de Cobre (seg)
1	187	231
2	201	225
3	292	333

Fuente: (El autor)

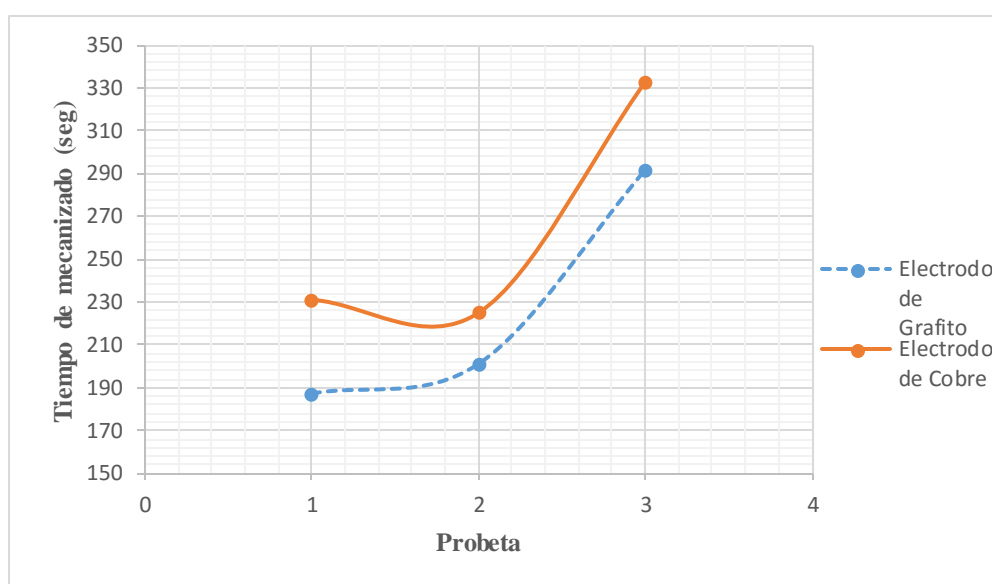


Fig. 3: Tiempos de mecanizado de las diferentes probetas en desbaste

Fuente: (El autor)

Como se puede observar en la figura 3 el tiempo de mecanizado para desbaste es mayor con electrodo de cobre que con electrodo de grafito, además se puede distinguir que si el amperaje disminuye el tiempo de mecanizado aumenta.

ANEXO 2.- Ficha técnica de la electroerosionadora DM 540



CHEVALIER InchLARGE CAPACITYInch RAM TYPE EDM

MODEL: DM-540 S/N: 005007 NEW: 1995

WORK TABLE SIZE 33.5Inch x 17.7Inch
LONGITUDINAL TABLE TRAVEL 19.7Inch
CROSS TRAVEL 15.7Inch
WORTANK SIZE (INSIDE DIMS.) 47.2Inch x 27.5Inch x
18InchH

PLATEN SIZE 10Inch x 15- 3/8Inch
PLATEN TO TABLE 25.4Inch MAX.
THROAT DISTANCE 22- 1/4Inch
RAM TRAVEL (BACK SLIDE)..... 7.9Inch
QUILL TRAVEL 7.9Inch
MAX. WEIGHT ON PLATEN 660 LBS.
MAX. WORKPIECE WEIGHT ON TABLE 3,960 LBS.

DIELECTRIC RESEVOIR 210 GALS.
WORKTANK TANK CAPACITY 140 GALS.
HYDRAULIC RESEVOIR 20 GALS.

APPROX. WEIGHT 5,700 LBS.
MACHINE DIMS 67InchL-R, 75InchD, 83Inch H
TANK IS43Inch X 77Inch X 38InchH
CABINET IS 24Inch X 36Inch x 60InchH

EQUIPPED WITH:

CHEVALIER 75 AMP POWER SUPPLY
-SIMPLE, UNDERSTANDABLE SPARK & SERVO CONTROLS
-SERVO CONTROLS FEATURING DITHER, MANUAL, EDGE
FINDER,
AUTO RETRACT, AUTO LOCK, ORBIT STOP, ORBIT LOCK,
SERVO SPEED & GAP ADJUST
-LOW PEAK CURRENT, ARC DURATION (.5 TO 1843
MICROSECONDS)
& % ON-TIME SELECTIONS FOR ULTRA-FINE FINISHING

InchHEIDENHAINInch 2-AXIS DIGITAL READOUT DISPLY
MICROMETER DOWN STOP
LARGE EXTERNAL TANK
MACHINE IS WIRED IN THE ELECTRICAL CABINET FOR MANY
VOLTAGE SELECTIONS, 220/240/380/415/440 OR 575 VOLTS

ANEXO 3.- Ficha técnica de la microfundición de aluminio (Aleación de aluminio 6061)

Aluminio 6061

El aluminio 6061 es una aleación de aluminio endurecido que contiene como principales elementos aluminio, magnesio y silicio. Originalmente denominado "aleación 613" fue desarrollada en 1935. Tiene buenas propiedades mecánicas y para su uso en soldaduras. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes para uso general. Se emplea comúnmente en formas pre templadas como el 6061-O y las templadas como el 6061-T6 y 6061-T651.

Usos

Es usado en todo el mundo para los moldes de inyección y soplado, construcción de estructuras de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; en refacciones industriales, en la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas. Es fácil de maquinarse y resistente a la corrosión.

Composición Química

La proporción de aluminio debe oscilar entre el 95.85 y el 98.56 por ciento, mientras que el resto de elementos de la aleación atiende a los márgenes establecidos en la siguiente tabla, sin que existan otros elementos (distintos a los señalados en la tabla) en proporciones superiores a 0.05 de forma individual ni el 0.15 % en total:

Dureza brinell: 65

Elemento	Mínimo(%)	Máximo(%)
Silicio	0.4	0.8
Hierro	0	0.7
Cobre	0.15	0.4
Manganeso	0	0.15
Magnesio	0.8	1.2
Cromo	0.04	0.35
Zinc	0	0.25
Titanio	0	0.15

Propiedades Tecnológicas

Proceso	Clasificación
Soldabilidad	A
Electrón Beam	B
Gas Inerte	B
Por resistencia	B
Brazing	
Maquinabilidad (T6)	C
Corte de viruta	A
Trillo de Sup. mecanizada	
Resistencia a la Corrosión	A
Agentes atmosféricos	B
Ambiente marino	
Anodizado	A
Protección Brillante	C
Duro	A

Propiedades Físicas

Densidad [gr/cm ³]*	2.7	Coef. De dilatación (0 a 100oC) [oC ⁻¹ x 10 ⁶]	23.6
Rango de fusión [oC]	575-650	Conductividad Térmica (0 a 100oC) [W/m oC]	Temple T6: 167
Modulo de elasticidad [MPa]	69500	Resistividad a 20 oC [μΩcm]	Temple T6: 4.0
Coefficiente de Poisson	0.33	Calor específico (0 a 100 oC)	940

Presentaciones

Angulo
Canal
Cuadrado
Lámina
Placa
Redondo
Solera
Tubular Redondo, Rectangular y Cuadrado

Nota: Aunque nos hemos esforzado por asegurar la exactitud de los datos provistos, **Aluminios y Metales Unicornio** no garantiza ni acepta ninguna responsabilidad por la exactitud de los mismos.

Clasificación: (A)Muy buena - (B)Buena - (C)Aceptable - (D)Pobre o No Recomendado

ANEXO 4.- Ficha técnica del grafito

ELLOR®+18

Grafito de desbaste - ideal para las operaciones de semi-acabado

Dimensiones máximas del bloque: 308 x 620 x 1.830 mm

Densidad	Dureza	Dureza	Resistencia a la flexión	Resistividad eléctrica	Granulometría media
<i>Unidad</i>	<i>Rockwell "L"</i>	<i>Shore</i>	<i>MPa</i>	<i>μΩ.cm</i>	<i>μm</i>
1,78	98	55	45	1 370	12

ELLOR®+20

Grafito universal - excelente relación Calidad / Prestaciones

Dimensiones máximas del bloque: 308 x 620 x 1.830 mm

Densidad	Dureza	Dureza	Resistencia a la flexión	Resistividad eléctrica	Granulometría media
<i>Unidad</i>	<i>Rockwell "H"</i>	<i>Shore</i>	<i>MPa</i>	<i>μΩ.cm</i>	<i>μm</i>
1,81	72	65	52	1 240	11

Material del electrodo	Polaridad	Densidad de corriente máxima	Potencia máxima
Grafito	+	10 A/cm ²	400 A
Grafito	-	7 A/cm ²	25 A
Cobre	+	15 A/cm ²	50 A
Cu-Gr	+	13 A/cm ²	
Cu-W	-/+	10 A/cm ²	25 A

Características del grafito natural

Componente	Unidad	Escamoso	Veta	Amorfo
Carbono	%	90.0	96.7	81.0
Azufre	%	0.1	0.7	0.10
Densidad	g/cm ³	2.29	2.26	2.31
Contenido de grafito	%	99.9	100.0	28.00
Densidad de cenizas	g/cm ³	2.91	2.89	2.68
Resistencia	ohm-cm	0.031	0.029	0.091

Características del grafito sintético

Componente	Unidad	Primario	Secundario	Hojuelas
Carbono	%	99.9	99.0	97.00
Azufre	%	0.00	0.01	0.07
Densidad	g/cm ³	2.25	2.24	2.24
Contenido de grafito	%	99.9	92.3	95.0
Densidad de cenizas	g/cm ³	2.65	2.68	4.68
Resistencia	ohm-cm	0.035	0.042	0.024

ANEXO 5.- Ficha técnica del cobre

COBRE ELECTROLÍTICO PLACAS Y BARRAS

Productos de Cobre

Barras - Barra - Tubos - Rectangulares - Chapas - Chapas - Placa - Placas - Pletina - Pletinas hasta 100 m/m de espesor.

Aplicaciones y usos típicos de las barras y placas de Cobre.

Cobres especiales para soldadura eléctrica por resistencia.
Soldadura por PUNTOS.
Soldadura por ROLDANAS.
Soldaduras a TOPE - INSERS.
Soldaduras por PROTUBERANCIA.

Cobres Especiales (placas y barras)

DESIGNACION	B - 101	B - 201	B - 202	B - 203	B - 204
Composición química nominal	99´9% Cu	99% Cu 1% Cr	98´8% Cu 0´2% Zr 1% cr	99´8 % Cu 0´2% Zr	99% Cu 1% Cd
Conductibilidad eléctrica % I.A.C.S	100 -101	75 - 80	70 - 80	80 -85	75-90
Dureza Rockwell		49-72	49-72	50	45-65
Dureza brinell 10/1000/30 HB	45-115	90-130	90-130	92	85-115
Resistencia a la tracción kg/mm2.	22-40	32-46	32-46	25-32	34-70
Alargamiento 50mm. %	6-48	12-27	12-27	12	10-20
Límite de elástico kg/mm2.	5-34	18-22	18-22	28	40-55
Temperatura ablandamiento Celcius	250	500	525	-	250
Peso específico kg/dm3.	8´9	8´9	8´9	8´9	8´9
Equivalencias	Cobre electrolítico tenaz Cu-ETP DIN 1708	UNE C-1170 C.D.A.I N.815 y 184 U.C.1 de Afnor R.W.M.A Clase II	U.C.1 de AFNOR R.W.M.A Clase II	C.D.A.I N. 150	R.W.M.A Clase I
Aplicaciones	Electrodos para máquina de electroerosión	Electrodos, útiles y partes de máquinas de solar por resistencia	Anillos rozantes, contactos, aparellaje eléctrico, discos, morzadas de hornos eléctricos, pinzas de soldar por resistencia electroerosión	Contactos, partes maquinaria eléctrica	Electrodos de soldadura por resistencia eléctrica
Suministro	Fundido Forjado Laminado	Fundición, forjado y estampado	Fundición, forjado y estampado	Fundición, forjado y estampado	Fundición, forjado y estampado

BARRAS PLACAS DE COBRE ELECTROLÍTICO LAMINADO ESPECIAL PARA ELECTRO-EROSIÓN B-101

Características de las barras placas de COBRE B-101:

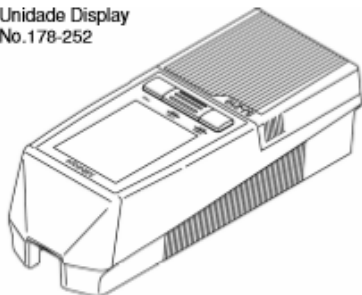
Calidad Cu 99´9%
Resistencia 40 Kg/mm2
Dureza 100-115 HB
Conductividad 100% I.A.C.S.

Medidas en Stok (placas y barras)

BARRAS	BARRAS	BARRAS	PLACAS RECTANGULARES	PLACAS RECTANGULARES	PLACAS RECTANGULARES
5	60	20	20x3	100x5	200x10
8	70	25	20x5	100x12	200x15
10	80	30	30x5	100x15	200x20
12	100	40	30x10	120x20	200x30
15	120	50	50x5	120x40	200x40
20	130	60	50x10	150x20	200x50
25	140	80	80x5	150x40	200x60
30	150	100	80x10	-	200x70
40	200	-	-	-	200x80
50	-	-	-	-	-

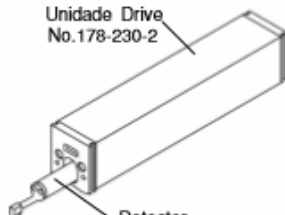
ANEXO 6.- Componentes del rugosímetro Mitutoyo SJ-210

Unidade Display
No.178-252



Unidade Drive/detector

Unidade Drive
No.178-230-2



Detector
No.178-390 (Força de Medição: 4 mN)
No.178-296 (Força de Medição: 0.75 mN)

Acessório Normal

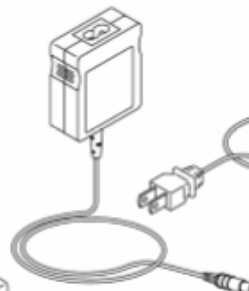
Maleta de transporte
No.12BAK699



Cabo de Conexão (1 m/40 in)
No.12BAA303



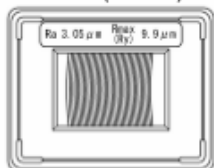
Adaptador AC
No.12BAK728



Conjunto do cabo de alimentação



Padrão de rugosidade
(em embalagem especial)
No.178-601(mm)
No.178-602(inch/mm)



Suporte para Calibração
No. 12BAK700



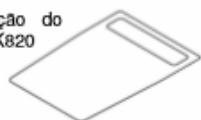
Manual de
Operação
No. 99MBB122A



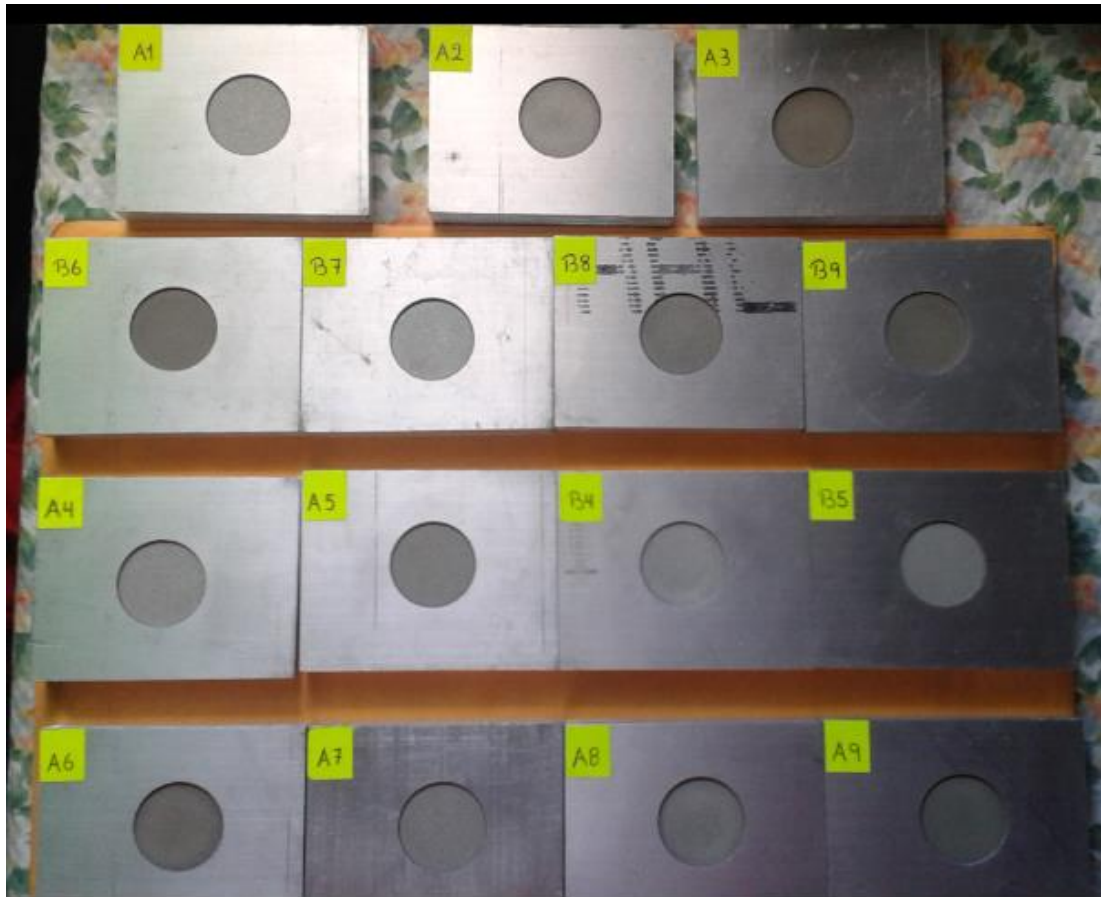
Manual de Consulta
rápida
No. 99MBB123A



Folha de proteção do
Display No.12BAK820



ANEXO 7.- Probetas mecanizadas



ANEXO 8.- Facturas



DÁVILA INDUSTRIA Y COMERCIO DAVICOM CIA. LTDA.
R.U.C.: 1792098254001

Sector Bellavista. Av. El Rey 1436 y Av. de los Andes
Telf.: (03) 282 9661 / 098 332 3617 • Ambato - Ecuador
ventas.amb@davicom.ec • contabilidad.davicomamb@gmail.com
Matriz: Av. John F. Kennedy N70-45 e Isidro Loza • Quito - Ecuador

FACTURA 002-001- **0024636**

AUT. SRI.: 1118706797

FECHA AUTORIZACIÓN: 26 / ABR / 2016 • Documento Categorizado: NO

Cliente: SANTAMARIA ZAMBRANO CARLOS
JAVIER
RUC/DI: 1804605184
Dirección: AV. BOLIVARIANA ENTRADA A
Fecha Emisión: 24-10-2016, 09:10
Pedido No: 002-001/0007547

Descripción	Cant.	PVP	Total
ALUMINIO 1/2 X 3 PLATINA	0.198	50.16	9.93



Subtotal 14%	9.93
Subtotal 0%	0.00
Subtotal	9.93
IVA 14%	1.39
TOTAL USD	11.32
Efectivo	11.32
Cambio	0.00

Usted fue atendido por: AUTERA

Una vez salida la mercadería no se aceptan devoluciones
FECHA DE CADUCIDAD: 26 DE ABRIL DE 2017



DÁVILA INDUSTRIA Y COMERCIO DAVICOM CIA. LTDA.
R.U.C.: 1792098254001

Cotacollao. Av. John F. Kennedy N70-45 e Isidro Loza. PB
Telefax: 229 3407 / 229 7680 • Cel.: 098 334 7487
ventas.davicom@hotmail.com • contabilidad.davicom@hotmail.com
Quito - Ecuador

FACTURA 001-001- **0010958**

AUT. SRI.: 1119032479

FECHA AUTORIZACIÓN: 27 / JUNIO / 2016 • Documento Categorizado: NO

Cliente: SANTAMARIA ZAMBRANO CARLOS
JAVIER
RUC/DI: 1804605184
Dirección: AV. BOLIVARIANA ENTRADA A
Fecha Emisión: 23-09-2016, 16:35
Pedido No: 001-001/0000892

Descripción	Cant.	PVP	Total
LUMINIO 1/2 X 3 PLATINA	1.071	50.16	53.72

Subtotal 14%	53.72
Subtotal 0%	0.00
Subtotal	53.72
IVA 14%	7.52
TOTAL USD	61.24
Cambio	0.00
Usted fue atendido por:	gmangia

FECHA DE CADUCIDAD: 27 DE JUNIO DEL 2017

Ron Obando Mario Facundo 321 4969 • RUC: 1704112737001 • AUT. SRI.: 1836 • De 020201 a 025200 • ORIGINAL: Adquiriente / COPIA CELESTE: Emisor

Ron Obando Mario Facundo 321 4969 • RUC: 1704112737001 • AUT. SRI.: 1836 • De 010651 a 012650 • ORIGINAL: Adquiriente / COPIA AMARILLA: Emisor



DÁVILA INDUSTRIA Y COMERCIO DAVICOM CIA. LTDA.
R.U.C.: 1792098254001

Sector Bellavista. Av. El Rey 1436 y Av. de los Andes
Telf.: (03) 282 9661 / 098 332 3617 • Ambato - Ecuador
ventas.amb@davicom.ec • contabilidad.davicomamb@gmail.com
Matriz: Av. John F. Kennedy N70-45 e Isidro Loza • Quito - Ecuador

FACTURA 002-001- **0023841**

AUT. SRI.: 1118706797

FECHA AUTORIZACIÓN: 26 / ABR / 2016 • Documento Categorizado: NO

Cliente: SANTAMARIA ZAMBRANO CARLOS
JAVIER
RUC/CI: 1804605184
Dirección: AV. BOLIVARIANA ENTRADA A
Fecha Emisión: 24-09-2016; 09:47
Pedido No: 002-001/0006743

Descripción	Cant.	PVP	Total
COBRE BARRA REDONDA 1	0.159	296.82	47.19



Subtotal 14%	47.19
Subtotal 0%	0.00
Subtotal	47.19
IVA 14%	6.67
TOTAL USD	53.80
Efectivo	53.80
Cambio	0.00

Una vez salida la mercadería no se aceptan devoluciones

FECHA DE CADUCIDAD: 26 DE ABRIL DE 2017



DÁVILA INDUSTRIA Y COMERCIO DAVICOM CIA. LTDA.
R.U.C.: 1792098254001

Sector Bellavista. Av. El Rey 1436 y Av. de los Andes
Telf.: (03) 282 9661 / 098 332 3617 • Ambato - Ecuador
ventas.amb@davicom.ec • contabilidad.davicomamb@gmail.com
Matriz: Av. John F. Kennedy N70-45 e Isidro Loza • Quito - Ecuador

FACTURA 002-001- **0022898**

AUT. SRI.: 1118706797

FECHA AUTORIZACIÓN: 26 / ABR / 2016 • Documento Categorizado: NO

Cliente: Consumidor Final
RUC/CI: 9999999999
Dirección: Ambato,
Fecha Emisión: 23-09-2016; 09:09
Pedido No: 002-001/0005791

Descripción	Cant.	PVP	Total
ALUMINIO 1/2 X 3 PLATINA	0.12	50.16	6.02



Subtotal 14%	6.02
Subtotal 0%	0.00
Subtotal	6.02
IVA 14%	0.84
TOTAL USD	6.86
Efectivo	6.86
Cambio	0.00

Una vez salida la mercadería no se aceptan devoluciones

FECHA DE CADUCIDAD: 26 DE ABRIL DE 2017

Ron Obando Mario Facundo 321 4969 • RUC: 1704112737001 • AUT. SRI.: 1836 • De 020201 a 025200 • ORIGINAL: Adquiriente / COPIA CELESTE: Emisor

Ron Obando Mario Facundo 321 4969 • RUC: 1704112737001 • AUT. SRI.: 1836 • De 020201 a 025200 • ORIGINAL: Adquiriente / COPIA CELESTE: Emisor

Pérez Salinas Cristian Fabián
 INGENIERIA DEL ACERO Y MATRICERIA
 Huachi Grande Barrio San Vicente
 Panamericana Sur s/n
 AMBATO - ECUADOR
 Aut. S.R.L. 1118213059

R.U.C. 1803371408001
FACTURA
 001 - 001
Nº 0000802
 DIA MES AÑO
 FECHA 21 Oct 16

RUC: 1804605184

Gota Rem.:

Señor: Centro Ingeniería Mecánica UTA
 Dir.: Av. Los Chaguquis y Rio Payamino - Telf.:

CANT.	DETALLE	P. Unitario	V. Total
1	Sumido de Mecanizado electroerosión 30 h.		260,00

Origen: Movero Echebar Eduardo Navarro / Imprenta LIGATA
 Aut. 1499 / RUC: 180298817001 / Emisión: 19/ Enero / 2015
 Cédula: 19 / Enero / 2017 Serie 00751 a 00853

SUB-TOTAL 260,00
 DESCUENTO
 IVA 0 %
 IVA 12 % 36,00
V. TOTAL \$ 296,00

[Signature]
 RECIBI CONFORME

[Signature]
 ENTREGUE CONFORME

ORIGINAL: Adquirente * COPIA: Emisor