



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 DEL DESGASTE DE ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE EN
EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN CON ELECTRODO DE FORMA
PARA EL MECANIZADO POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE
ALUMINIO**

AUTOR: David Ramiro Núñez Vaca

TUTOR: Ing. Mg. Segundo Espín

Ambato – Ecuador

2017

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de tutor del presente trabajo experimental, con el tema “ANÁLISIS DEL DESGASTE DE ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN CON ELECTRODO DE FORMA PARA EL MECANIZADO POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO ”, desarrollado por el estudiante David Ramiro Núñez Vaca, egresado de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica en la Universidad Técnica de Ambato, CERTIFICO que dicho informe investigativo reúne los requisitos suficientes para ser sometido a la evaluación del Tribunal Examinador designado por el Consejo Directivo de ésta Facultad.

Ambato, Febrero del 2017

EL TUTOR

.....
Ing. Mg. Segundo Espín

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, David Ramiro Núñez Vaca, portador de la C.I. 1804618153 tengo a bien indicar que los criterios expresados en la investigación denominada “ANÁLISIS DEL DESGASTE DE ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN CON ELECTRODO DE FORMA PARA EL MECANIZADO POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO ”, así como también las ideas, análisis y conclusiones son auténticas y de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor de la presente investigación de grado.

Ambato, Febrero del 2017

EL AUTOR

.....
David Ramiro Núñez Vaca

C.I. 180461815-3

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 de investigación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de ésta documento, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Febrero del 2017

EL AUTOR

.....
David Ramiro Núñez Vaca

C.I. 180461815-3

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental realizado por el estudiante David Ramiro Núñez Vaca de la carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: “ANÁLISIS DEL DESGASTE DE ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN CON ELECTRODO DE FORMA PARA EL MECANIZADO POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO ”

Ambato, Febrero del 2017

Para constancia firman:

.....
Ing. Mg. Cristian Pérez

.....
Ing. Mg. Mauricio Carrillo

DEDICATORIA

Con mucho cariño dedico este proyecto principalmente:

A mis padres José y María,

quienes con su apoyo incondicional

me ayudan a crecer como persona cada día.

A mis hermanos Geovanny y Christian

que con su confianza y motivación

me impulsan a ser alguien útil para la sociedad.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por darme la vida, a mi familia en especial a mis padres José y María quienes con mucho esfuerzo y cariño me brindaron la oportunidad de seguir con mis estudios y me motivan día a día para seguir adelante. A mi novia Lizbeth López por ser mi apoyo incondicional y ayudarme a ser una mejor persona.

Agradezco a mi tutor Ing. Mg. Segundo Espín, quien con su experiencia, conocimientos y motivación ha logrado que culmine esta etapa de mi vida.

Al Ing. Mg. Cristian Pérez por brindarme la oportunidad y herramientas para el desarrollo del proyecto. A la Universidad Técnica de Ambato y a todos los docentes que forman parte de La Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica quienes se han encargado de mi formación académica.

A todos quienes me apoyaron Muchas Gracias y que Dios les bendiga.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	ii
DERECHOS DE AUTOR	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	vii
RESUMEN EJECUTIVO	xvi

CAPITULO I

ANTECEDENTES	1
1.1 TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	1
1.2 ANTECEDENTES	1
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4

CAPITULO II

FUNDAMENTACIÓN	5
2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1.1 INTRODUCCIÓN A LA ELECTROEROSIÓN.....	5
2.1.2 ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN	6
2.1.3 ELECTRODOS DE FORMA PARA LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN.....	8
2.1.3.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN DE ELECTRODOS DE FORMA.....	9
2.1.4 MATERIALES PARA ELECTRODOS DE FORMA	11
2.1.4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES	11
2.1.4.2 FABRICACIÓN DE ELECTRODOS DE COBRE.....	15

2.1.4.3 COMPORTAMIENTO DEL GRAFITO ANTE EL MECANIZADO.....	16
2.1.5 FLUIDOS DIELECTRICOS	17
2.1.5.1 CARACTERÍSTICAS DE UN FLUIDO PARA ELECTROEROSIÓN.....	17
2.1.5.2 TIPOS DE FLUIDOS DIELECTRICOS	18
2.1.6 MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO	19
2.1.7 DESGASTE DE ELECTRODOS EN ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN.....	20
2.1.8 PARÁMETROS EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN.....	24
2.1.8.1 TEMPERATURA DEL FLUIDO DIELECTRICO.....	25
2.1.8.2 INTENSIDAD DE CORRIENTE.....	25
2.1.8.3 TIEMPO DE DESCARGA.....	25
2.1.8.4 TIEMPO DE PAUSA	26
2.1.8.5 TAMAÑO DEL GAP	26
2.1.8.6 TENSIÓN	27
2.1.8.7 POLARIDAD	27
2.1.9 COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DEL DESGASTE EN ELECTRODOS DE FORMA.....	28
2.1.9.1 DESGASTE VOLUMÉTRICO DE LA HERRAMIENTA (TW).....	28
2.1.9.2 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL (MRR)	29
2.1.9.3 COEFICIENTE DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA (TWR).....	30
2.2 HIPÓTESIS.....	31
2.3 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS	31
2.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.....	31
2.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE	31

CAPITULO III

METODOLOGÍA	32
3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN	32
3.1.1 EXPERIMENTAL.....	32
3.1.2 DESCRIPTIVO.....	32
3.1.3 EXPLORATORIO	32
3.1.4 CUANTITATIVA.....	33
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	33
3.2.1 POBLACIÓN.....	33
3.2.2 MUESTRA	33

3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	35
3.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.....	35
3.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE.....	36
3.4 PLAN DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	37
3.5 PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS.....	38
3.5.1 PLAN DE PROCESAMIENTO.....	38
3.5.2 PLAN DE ANÁLISIS.....	38

CAPITULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	39
4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS.....	39
4.1.1 GEOMETRÍAS DE LAS PROBETAS.....	42
4.1.2 ADQUISICIÓN DE MATERIALES.....	43
4.1.3 PREPARACIÓN DE ELECTRODOS.....	49
4.1.4 PESAJE Y MEDICIÓN INICIAL.....	50
4.1.5 PREPARACIÓN DE LA MÁQUINA.....	53
4.1.5.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS.....	53
4.1.5.2 FLUIDO DIELECTRICO.....	55
4.1.7 COEFICIENTES DE DESGASTE.....	59
4.1.7.1 DESGASTE VOLUMÉTRICO DE LA HERRAMIENTA.....	59
4.1.7.2 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL.....	61
4.1.7.2 COEFICIENTE DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA.....	63
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
4.2.1 PÉRDIDA DE MASA.....	65
4.2.1.2 PÉRDIDA DE MASA EN EL COBRE.....	65
4.2.1.3 PÉRDIDA DE MASA EN EL GRAFITO.....	67
4.2.1.4 PÉRDIDA DE MASA EN EL GRAFITO Y COBRE.....	69
4.2.2 DESGASTE VOLUMÉTRICO DE LA HERRAMIENTA.....	72
4.2.2.1 DESGASTE VOLUMÉTRICO EN ELECTRODOS DE GRAFITO.....	73
4.2.2.2 DESGASTE VOLUMÉTRICO EN ELECTRODOS DE COBRE.....	75
4.2.2.3 DESGASTE VOLUMÉTRICO EN ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE.....	76
4.2.3 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL.....	79
4.2.3.1 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL EN ELECTRODOS DE GRAFITO.....	79

4.2.3.2 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL EN ELECTRODOS DE COBRE	81
4.2.3.3 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL EN ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE	82
4.2.4 COEFICIENTE DE DESGASTE	85
4.2.4.1 COEFICIENTE DE DESGASTE EN ELECTRODOS DE GRAFITO	85
4.2.4.2 COEFICIENTE DE DESGASTE EN ELECTRODOS DE COBRE	87
4.2.4.3 COEFICIENTE DE DESGASTE EN ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE	89
4.3 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS	93
4.3.1 H_0 HIPÓTESIS NULA.....	93
4.3.2 H_a HIPÓTESIS ALTERNA	93
4.3.3 VERIFICACIÓN:	93
4.3.4 REGLA DE DECISIÓN	95
4.3.5 CÁLCULO DE LA DISTRIBUCIÓN “t”	95
4.3.5.1 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS CON RESPECTO A LA GEOMETRÍA DEL ELECTRODO.....	95
4.3.5.1 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS CON RESPECTO AL MATERIAL DEL ELECTRODO	97

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
5.1 CONCLUSIONES	99
5.2 RECOMENDACIONES	101
Bibliografía	102
ANEXOS	106

INDICÉ DE FIGURAS

Figura 2. 1. Electroerosión por penetración.....	5
Figura 2. 2. Principio del proceso de electroerosión.....	6
Figura 2. 3. Electroerosión por penetración.....	7
Figura 2. 4. Electroerosión por penetración.....	8
Figura 2. 5. Electroerosión por penetración.....	8
Figura 2. 5. Desgaste frontal y de esquina	21
Figura 2. 6. Representación de los factores principales para la definición de cavidad final..	21
Figura 2. 7. Tipos de desgaste.....	22
Figura 2. 8. Curvas de tensión intensidad durante la descarga	24
Figura 2. 9. GAP lateral y frontal.....	26
Figura 2. 10. Sistema del proceso de electroerosión por penetración.	28
Figura 4. 1. Dimensiones de los electrodos de sección cuadrada (mm).....	42
Figura 4. 2. Dimensiones de los electrodos de sección circular (mm).....	42
Figura 4. 3. Placa de micro fundición de aluminio (mm).	43
Figura 4. 4. Electroerosión por penetración.....	49
Figura 4. 4. Electroerosión por penetración.....	49
Figura 4. 5. Rectificado de la cara superior de los electrodos.....	49
Figura 4. 6. Medición de los electrodos	50
Figura 4. 7. Máquina para electroerosión por penetración CHEVALIER DM- 540.	53
Figura 4. 8. Tablero de control de la máquina CHEVALIER DM- 540.....	54
Figura 4. 9. Pérdida de masa con respecto al tiempo (cobre)	66
Figura 4. 10. Pérdida de masa con respecto a la profundidad de penetración (cobre).....	67
Figura 4. 11. Pérdida de masa con respecto al tiempo (grafito).....	68
Figura 4. 12. Pérdida de masa con respecto a la profundidad de penetración (grafito)	69
Figura 4. 13. Pérdida de masa con respecto al tiempo en electrodos de grafito y cobre (sección redonda)	70

Figura 4. 14. Pérdida de masa con respecto a la profundidad de penetración en electrodos de grafito y cobre (sección redonda).....	70
Figura 4. 15. Pérdida de masa con respecto al tiempo en electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)	71
Figura 4. 16. Pérdida de masa con respecto a la profundidad de penetración en electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)	72
Figura 4. 17. Desgaste volumétrico de los electrodos con respecto al tiempo (grafito)	73
Figura 4. 18. Desgaste volumétrico de los electrodos con respecto a la profundidad de penetración (grafito).....	74
Figura 4. 19. Desgaste volumétrico de los electrodos con respecto al tiempo (cobre)	75
Figura 4. 20. Desgaste volumétrico de los electrodos con respecto a la profundidad de penetración (cobre)	76
Figura 4. 21. Desgaste volumétrico con respecto al tiempo de los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)	77
Figura 4. 22. Desgaste volumétrico con respecto a la profundidad de penetración de los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)	77
Figura 4. 23. Desgaste volumétrico con respecto al tiempo de los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada).....	78
Figura 4. 24. Desgaste volumétrico con respecto a la profundidad de penetración de los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada).....	78
Figura 4. 25. Tasa de eliminación del material con respecto al tiempo (grafito).....	80
Figura 4. 26. Tasa de eliminación del material con respecto a la profundidad de penetración (grafito)	80
Figura 4. 27. Tasa de eliminación del material con respecto al tiempo (cobre).....	81
Figura 4. 28. Tasa de eliminación del material con respecto a la profundidad de penetración (cobre).....	82
Figura 4. 29. Tasa de eliminación de material con respecto al tiempo en los electrodos de grafito y cobre (sección redonda).....	83
Figura 4. 30. Tasa de eliminación de material con respecto a la profundidad de penetración en los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)	83
Figura 4. 31. Tasa de eliminación de material con respecto al tiempo en los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)	84

Figura 4. 32. Tasa de eliminación de material con respecto a la profundidad de penetración en los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)	84
Figura 4. 33. Coeficiente de desgaste con respecto al tiempo (grafito)	86
Figura 4. 34. Coeficiente de desgaste con respecto a la profundidad de penetración (grafito)	86
Figura 4. 35. Coeficiente de desgaste con respecto al tiempo (cobre)	88
Figura 4. 36. Coeficiente de desgaste con respecto a la profundidad de penetración (cobre)	88
Figura 4. 37. Coeficiente de desgaste con respecto al tiempo en los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)	89
Figura 4. 38. Coeficiente de desgaste con respecto a la profundidad de penetración en los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)	90
Figura 4. 39. Coeficiente de desgaste con respecto al tiempo en los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada).....	91
Figura 4. 40. Coeficiente de desgaste con respecto a la profundidad de penetración en los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada).....	91
Figura 4. 41. Distribución “t-Student”	94
Figura 4. 42. Campana de la distribución “t” (geometría)	97
Figura 4. 43. Campana de la distribución “t” (material)	98

INDICÉ DE TABLAS

Tabla 2. 1. Propiedades físicas y químicas del diésel	19
Tabla 2. 2. Composición química del Aluminio 6061	20
Tabla 2. 3. Propiedades físicas del Aluminio 6061.....	20
Tabla 3. 1. Número de probetas	34
Tabla 3. 2. Operacionalización de la Variable Independiente.....	35
Tabla 3. 3. Operacionalización de la variable dependiente.....	36
Tabla 4. 1. Parámetros de mecanizado para electroerosión por penetración	55
Tabla 4. 2. Valores de la masa pérdida por los electrodos de cobre	65
Tabla 4. 3. Valores de la masa pérdida por los electrodos de grafito.....	67
Tabla 4. 4. Desgaste volumétrico de los electrodos de grafito.....	73
Tabla 4. 5. Desgaste volumétrico de los electrodos de cobre	75
Tabla 4. 6. Tasa de eliminación de material para los electrodos de grafito	79
Tabla 4. 7. Tasa de eliminación de material para los electrodos de cobre	81
Tabla 4. 8. Valores del coeficiente de desgaste para los electrodos de grafito	85
Tabla 4. 9. Valores del coeficiente de desgaste para los electrodos de cobre	87
Tabla 4. 10 Datos para la verificación de la hipótesis con respecto a la geometría	95
Tabla 4. 11. Verificación de la hipótesis con respecto a la geometría del electrodo	96
Tabla 4. 12. Verificación de la hipótesis con respecto al material del electrodo	97

INDICÉ DE FICHAS

Ficha 4. 1 Propiedades del cobre electrolítico (sección cuadrada)	44
Ficha 4. 2 Propiedades del cobre electrolítico (sección redonda)	45
Ficha 4. 3 Propiedades del grafito (sección cuadrada).....	46
Ficha 4. 4 Propiedades del grafito (sección redonda)	47
Ficha 4. 5 Propiedades de la pieza a mecanizar (microfundición de aluminio).....	48
Ficha 4. 6 Datos de la medición y pesaje inicial (electrodos).....	51
Ficha 4. 7 Datos de la medición y pesaje inicial (placas de material base)	52
Ficha 4. 8 Datos de la medición final de los electrodos.....	57
Ficha 4. 9 Datos de la medición final de las placas de material base.....	58
Ficha 4. 10 Valores del desgaste volumétrico.....	60
Ficha 4. 11 Tasa de eliminación de material.....	62
Ficha 4. 12 Coeficiente de desgaste de la herramienta	64

Universidad Técnica de Ambato
Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica
Carrera de Ingeniería Mecánica

ANÁLISIS DEL DESGASTE DE ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE EN EL
PROCESO DE ELECTROEROSIÓN CON ELECTRODO DE FORMA PARA EL
MECANIZADO POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO

Autor: David Ramiro Núñez Vaca

Tutor: Ing. Mg. Segundo Espín Lagos

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación tiene la finalidad de determinar los coeficientes de desgaste que se produce en los electrodos sometidos a electroerosión. Para el estudio se utilizaron electrodos de forma de dos materiales distintos como son el grafito y el cobre, esto debido a que son los materiales más usados en la fabricación de electrodos para este tipo de proceso.

A más de lo mencionado anteriormente se optó por utilizar dos geometrías de cada material, para lo cual se establecieron barras macizas de sección circular y de sección cuadrada tanto para grafito como para cobre, de tal manera que a su vez se pudiera identificar la existencia de una diferencia de desgaste entre cada geometría. Los ensayos se realizaron en una máquina de electroerosión por penetración manteniendo una igualdad de condiciones para cada electrodo. La profundidad de mecanizado a la que se trabajó fue de 2,4 y 6 mm para cada material y geometría.

Los datos obtenidos de los ensayos fueron tabulados de tal manera que se pudo observar la pérdida de masa que existió en cada electrodo, a más de esto se realizó el cálculo de los coeficientes de desgaste como son el desgaste volumétrico de la herramienta (TW), la tasa de eliminación de material (MRR) y el coeficiente de desgaste de la herramienta (TWR). Esto con el fin de compararlos e identificar cual es el material y la geometría que posee el mayor desgaste.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

ANÁLISIS DEL DESGASTE DE ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN CON ELECTRODO DE FORMA PARA EL MECANIZADO POR PENETRACIÓN EN MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO.

1.2 ANTECEDENTES

La electroerosión ha sido un proceso que ha ido tomando una gran importancia en la actualidad, debido a esto surge la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso, para lo cual se han realizado estudios de los componentes y parámetros que intervienen en dicho proceso, algunos de estos se mencionan a continuación:

En la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao se realizó un trabajo de fin de grado bajo el tema “Caracterización del desgaste de electrodos de grafito en electroerosión por penetración”, en septiembre de 2015, el proyecto formo parte de una tesis doctoral en el ámbito de la electroerosión y tuvo como objetivo final diseñar una metodología de medición precisa tanto del desgaste de los electrodos como del GAP (Espacio entre el electrodo y pieza en cual se dan las descargas) y a su vez poder conocer cómo evolucionan tanto el desgaste como el GAP, bajo los parámetros establecidos en el análisis.

El trabajo mencionado fue de gran utilidad para el desarrollo del proyecto, ya que este proporciono información importante respecto a los métodos posibles para la medición del desgaste de electrodos en el proceso de electroerosión por penetración.

Un trabajo similar se realizó en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria como trabajo de fin de carrera

bajo el tema de “Optimización del proceso de electroerosión”, en mayo de 2014, el cual tuvo como objetivo realizar un estudio sobre el proceso de electroerosión realizando una serie de ensayos para optimizar el proceso mediante el análisis de diversos parámetros como la tasa de desgaste de la herramienta, la tasa de eliminación del material y coeficiente de desgaste de la herramienta.

Los parámetros analizados y los resultados obtenidos en el trabajo mencionado anteriormente ayudaron a orientar el proyecto con respecto a los coeficientes que se deben obtener para poder observar el desgaste y por otra parte los resultados presentados en dicho trabajo también sirvieron de guía para establecer los parámetros de trabajo adecuados para la realización de los ensayos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El proceso de electroerosión para el mecanizado de partes actualmente ha ido tomando gran importancia dentro de los procesos de arranque de material no convencionales. Esto debido a que da la oportunidad de mecanizar piezas que por otros métodos sería muy difícil e incluso imposible de realizar debido al grado de complejidad de las piezas. Estas son algunas de las razones por las que la electroerosión ha tomado una posición importante dentro de su campo de aplicación. A nivel de provincia se puede destacar que tiene un gran campo de aplicación en la fabricación de moldes para suelas de zapatos.

La electroerosión posee dos tipos de aplicaciones como son la electroerosión por penetración y la electroerosión por hilo, tomando en cuenta esto, el análisis se realizó específicamente en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración.

Los materiales normalmente utilizados para la fabricación de electrodos para esta aplicación son comúnmente grafito y cobre, debido a esto el estudio se enfocó a electrodos de estos materiales y con geometrías diferentes para cada tipo. La razón principal de la utilización de grafito para la fabricación de electrodos es por tener una elevada temperatura de vaporización lo que lo hace más resistente al desgaste y puede

ser preformado por métodos convencionales como puede ser en una fresadora. Por otro lado tenemos al cobre, que aunque no posea una resistencia tan elevada como el grafito, su gran conductividad eléctrica lo hace un material óptimo a la hora de fabricar electrodos de forma [1].

La pieza a mecanizar para cada ensayo fue de aluminio, el cual se lo obtuvo en forma de placas mediante el proceso de microfundición. El uso de este proceso para la obtención de las placas se debe a que de esta manera se obtiene una mejor maquinabilidad y se reduce la porosidad, de tal manera que al someter la pieza a mecanizado por electroerosión con electrodo de forma se obtiene una buena uniformidad y se puede apreciar mejor el desgaste.

El proceso se basa en el avance controlado de un electrodo o herramienta que penetra en la pieza a mecanizar. Como resultado se obtiene la erosión uniforme de la pieza, reproduciendo la forma del electrodo con la mayor exactitud posible.

Debido a que los usuarios de esta tecnología cada vez imponen requisitos más exigentes y requieren tolerancias más pequeñas para el mecanizado por este proceso, es necesario el conocimiento de factores que pueden afectar el mismo [2].

Al momento de realizarse la erosión tanto la herramienta como la pieza pierden material pero en el caso del electrodo esto supone una pérdida en la calidad del acabado, de ahí la importancia de conocer el desgaste para la optimización del uso de los electrodos de forma.

Al conocer este parámetro el electrodo puede ser aprovechado de mejor manera y a su vez remplazado por otro nuevo en el momento adecuado, para poder obtener un acabado superficial dentro de las tolerancias deseadas, a su vez un ahorro económico en el uso del número de electrodos y una selección adecuada del material para los mismos [3].

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar el desgaste de los electrodos de grafito y cobre en el proceso de electroerosión para el mecanizado por penetración en microfundición de aluminio.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los tipos de electrodos, propiedades del material y su preformado para la utilización en el proceso de electroerosión por penetración.
- Identificar los principales parámetros que influyen en el desgaste de los electrodos en el proceso de electroerosión por penetración.
- Diseño del proceso experimental para los ensayos de desgaste en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración.
- Realizar ensayos prácticos de mecanizado por electroerosión con electrodo de forma en microfundición de aluminio con los diferentes electrodos de grafito y cobre.
- Determinar el desgaste de los electrodos a partir de los ensayos realizados y los parámetros adecuados para su uso.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN

2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1.1 INTRODUCCIÓN A LA ELECTROEROSIÓN

La electroerosión es un proceso de mecanizado no convencional en el cual el arranque de material se produce por medio de descargas eléctricas controladas, en el cual se encuentran dos elementos conductores, como son el electrodo o herramienta y la pieza que se va a mecanizar o material base, en presencia de un fluido dieléctrico como se puede apreciar en la figura 2.1.

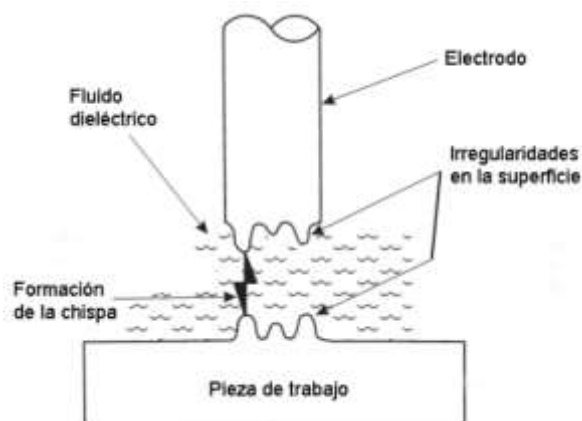


Figura 2. 1. Electroerosión por penetración

Fuente: [4]

La chispa que se genera al entrar en contacto la herramienta con la pieza tiene una duración muy corta que varía desde 1 ó 2 microsegundos hasta 2 milisegundos dependiendo de los regímenes de mecanizado, a su vez se genera un gran aumento de temperatura, que puede alcanzar hasta decenas de miles de grados centígrados.

La combinación de estos fenómenos térmicos y mecánicos produce fundamentalmente el arranque de material. Al tratarse de un volumen muy reducido existe una concentración del efecto térmico produciendo que el material se vaporice y sea

arrastrado por el dieléctrico circulante fuera de la zona de erosión. En la figura 2.2 se puede ver un esquema del proceso de electroerosión.

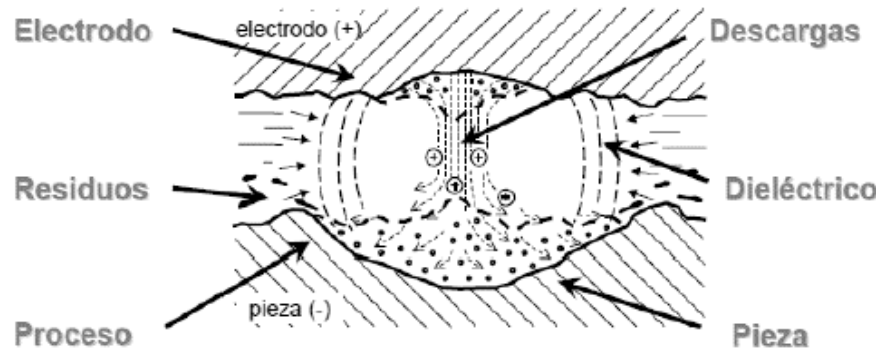


Figura 2. 2. Principio del proceso de electroerosión

Fuente: [5]

El fluido dieléctrico tiene como función principal aislar el electrodo y la pieza de manera controlada para que de esta forma permita el paso de corriente eléctrica, como se mencionó anteriormente los intervalos son en microsegundos lo que provoca que el material erosionado por descarga sea muy poco, pero a su vez después de cierto tiempo resulta ser una cantidad considerable.

En cuanto a los fluidos utilizados en electroerosión, para el caso de electroerosión por hilo el agua desionizada y para electroerosión por penetración el aceite no son conductores en condiciones normales, pero bajo las condiciones que se imponen en la máquina se vuelven conductores a nivel local y durante un intervalo de tiempo que se limita durante la descarga y después de esta se recuperan las propiedades aislantes dejando la zona donde se realiza la erosión lista para realizar una nueva descarga.

2.1.2 ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

En este proceso el electrodo y la pieza están ubicados muy cerca el uno del otro dejando un espacio que varía entre 0.01 y 0.05 mm. A partir de lo cual el electrodo penetra la pieza con un avance continuo y servocontrolado en presencia de un fluido dieléctrico, de esta manera la pieza es erosionada y toma la forma del electrodo a la

profundidad que se le dé, ya sean formas pasantes o ciegas como se muestra en la figura 2.3.

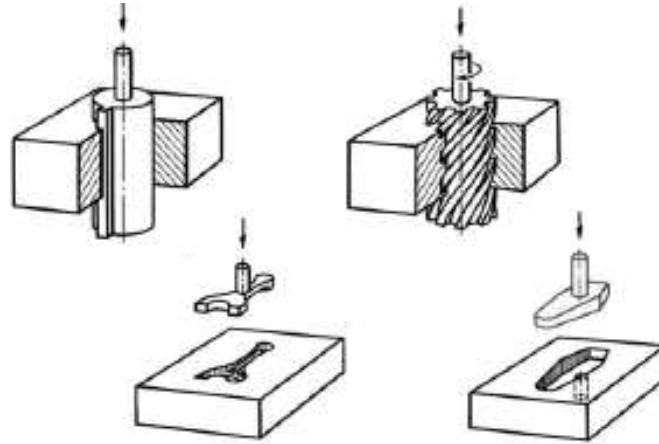


Figura 2. 3. Electroerosión por penetración

Fuente: [6]

Durante el proceso la diferencia de tensión continua y pulsante aplicada en el electrodo y la pieza origina un campo eléctrico intenso provocando un aumento de temperatura esto ocasiona que el dieléctrico se vaporice. En el momento en que el aislamiento proporcionado por el dieléctrico desaparece se produce una chispa la cual provoca un incremento de temperatura hasta los 20000 °C, como consecuencia de esto una pequeña parte del material tanto del electrodo como de la pieza se vaporizan, esta es la razón por la cual el electrodo se desgasta, por esto es necesario mantener constante la distancia entre herramienta y pieza.

El desgaste producido en el electrodo obliga a realizar un cambio de herramental en medio del proceso cuando es necesario, puesto que a su vez el desgaste implica una pérdida en el acabado y no se lograría obtener las tolerancias deseadas, que normalmente son de $\pm 0,05\text{mm}$.

Como se mencionó anteriormente para este tipo de proceso el fluido dieléctrico utilizado comúnmente es el aceite mineral, esto puede variar dependiendo de la máquina es importante mencionar que el análisis se realizara en electrodos específicamente para este proceso.

2.1.3 ELECTRODOS DE FORMA PARA LA ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Para este tipo de proceso se utilizan electrodos que cumplan principalmente con características como temperatura de fusión elevada y alta resistencia al desgaste, estas características y otras serán descritas más adelante. La ventaja de estos electrodos es la forma, precisamente de ahí viene su nombre, debido a que en la pieza que se desea mecanizar se pueden reproducir formas complejas y con mayor exactitud. A continuación se muestra en la figura 2.4 algunos tipos de electrodos de forma.



Figura 2. 4. Electrodos de forma

Fuente: [7]

Tomando en cuenta estas características principales se utilizan materiales como el grafito puesto que es el que mejor cumple con las características mencionadas anteriormente y el cobre que a pesar de no poseer una resistencia tan elevada como el grafito posee gran conductividad eléctrica, es por esto que serán objeto de análisis en el desarrollo del proyecto.

Los electrodos de grafito pueden ser preformados en una fresadora con la forma que se desee ya sea un electrodo macho o hembra. Dependiendo de las características y dimensiones que se deseen es recomendable utilizar un electrodo de electroerosión en bruto y otro que se consuma de forma fina, también este tipo de electrodos se los puede preformar de tal manera que varias formas puedan pertenecer al mismo pedazo de grafito.

El cobre es un material muy útil en la fabricación de electrodos dada la precisión que permite debido a su conductividad, su desventaja es que por ser un metal suave tiene un desgaste mayor. En cuanto a su uso, este tipo de electrodos son ideales para realizar agujeros redondos y profundos.

En el mercado se encuentran estos electrodos en diámetros con tamaños milimétricos en incrementos de medio milímetro y varias longitudes. El acabado podría ser afectado debido a las marcas resultantes del mecanizado del electrodo, ya que sea cual sea el material utilizado puesto que la fresadora o torno tienden a dejar pequeñas marcas de su herramienta en el electrodo, por esto si se desea un buen acabado es necesario repasar a mano después del mecanizado.

2.1.3.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN DE ELECTRODOS DE FORMA

El problema principal al que están expuestos los electrodos es el desgaste, como se ha mencionado anteriormente esto se da tanto en la pieza como en el electrodo, la erosión que se produce es diferente para cada polo, debido a esto la erosión en el electrodo se la denomina desgaste y se mide en forma porcentual con respecto a la erosión producida en la pieza. Para que el desgaste sea mínimo el material debe tener propiedades físicas como [8]:

2.1.3.1.1 ALTO PUNTO DE FUSIÓN

Mientras el material posea un alto punto de fusión el desgaste del electrodo será menor, esto debido a que el proceso es de tipo térmico y se alcanzan altas temperaturas en cada impulso provocando que se fundan pequeñas partículas las mismas que son arrastradas fuera de la zona de erosión por el líquido dieléctrico.

2.1.3.1.2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En cuanto a esta propiedad los electrodos utilizados en este proceso deben ser buenos conductores de calor o a su vez de electricidad. Lo que se busca con esta propiedad es esencialmente que el calor que se produce por la descarga sea difundido rápidamente por todo el electrodo y no se quede acumulado en un solo punto. De esta manera la cantidad de electrodo que se funda será menor.

Las propiedades mencionadas anteriormente son las principales para definir la aptitud del material adecuado para ser utilizado como electrodo en este proceso. Por otro lado también hay que tomar en cuenta las propiedades mecánicas que se mencionaran a continuación:

- a) A menudo los electrodos utilizados para este proceso son fabricados por métodos convencionales como el torneado, fresado, etc., por esto la facilidad de ser mecanizado es una propiedad que se debe tener muy en cuenta al momento de la selección del material.
- b) Tomando en cuenta que los electrodos en este proceso se calientan, el coeficiente de dilatación debe ser lo más bajo posible, debido a que, si este fuera alto las medidas del electrodo cambiarían afectando también las dimensiones de la pieza.
- c) En ocasiones se necesita emplear electrodos de volúmenes grandes, por lo que es conveniente que el peso específico del material sea bajo.
- d) Otra propiedad a tomar en cuenta es la estabilidad dimensional, que debe ser buena para los materiales en este proceso, esto debido a que antes de la salida al mercado en los materiales se generan tensiones internas debido a los tratamientos y procesos físicos a los que hayan sido expuestos, estas tensiones se liberan generalmente cuando el material se calienta lo que produce cambios en las dimensiones, alterando tanto la forma del electrodo como la de la pieza.

Para realizar la selección del material se debe tomar en cuenta tanto las propiedades físicas como las mecánicas y a su vez relacionarlas con factores como la forma de mecanizar, el número de electrodos a producir, las dimensiones, etc. También será importante conocer el precio y la facilidad de encontrarlos en el mercado.

2.1.4 MATERIALES PARA ELECTRODOS DE FORMA

2.1.4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Teniendo claro las propiedades y parámetros que deben cumplir los materiales para la fabricación de electrodos, los materiales que pueden ser utilizados para la fabricación de electrodos se pueden dividir en:

- Materiales metálicos
- Materiales no metálicos

En el grupo de los materiales metálicos tenemos los siguientes:

- Cobre electrolítico
- Cobre al plomo
- Cuprotugstenos
- Aluminio y aleaciones
- Latón
- Cuprografitos

Al hablar de materiales no metálicos útiles para esta aplicación comúnmente se refiere al grafito y sus variedades posibles, es decir al grado de pureza que este posea.

2.1.4.1.1 COBRE ELECTROLÍTICO

En electroerosión se solía utilizar únicamente el latón como material para la fabricación de electrodos debido a su facilidad de adquisición y a su bajo costo, la desventaja de este material es el elevado desgaste. Para sustituirlo se utilizó el cobre

debido a que este tiene mayor conductividad eléctrica y el desgaste es menor que en el caso del latón.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se puede decir que el cobre es uno de los materiales más utilizados para la fabricación de electrodos para electroerosión.

Algunas de sus propiedades físicas son [9]:

- Temperatura de fusión: 1083 °C (baja).
- Resistividad eléctrica: 0,017 Ω mm²/m (muy buena).

Estos factores esencialmente son los que limitan su capacidad de arranque en aceros de herramientas por lo que para dicho caso se opta por utilizar grafito.

Por otro lado tenemos algunas de sus propiedades mecánicas:

- No es fácil de mecanizar.
- Coeficiente de dilatación lineal: 16×10^{-6} °C (Alto con respecto al grafito).
- Peso específico: 8,95 Kg/dm³ (Alto por lo que no sirve para fabricar electrodos voluminosos).

El coeficiente de dilatación comparado con el del grafito es elevado, por esta razón la precisión es afectada en especial cuando se tratan de trabajos de larga duración sin sistemas de refrigeración para el fluido dieléctrico.

2.1.4.1.2 COBRE AL PLOMO

Esta aleación de cobre contiene una pequeña cantidad de plomo, cromo o telurio (entre 1 y 2%), la finalidad de esta combinación es mejorar la maquinabilidad del cobre, pero esto a su vez aumenta el desgaste y disminuye el rendimiento.

2.1.4.1.3 CUPROTUGSTENO

Este tipo de material es muy útil y utilizado para la fabricación de piezas de alta precisión, se lo utiliza en la industria de la aviación para la erosión de micro orificios y en casos que se requieran orificios profundos. Principalmente se lo encuentra en tres calidades:

- Tungsteno-cobre con 75-25 por 100 respectivamente.
- Cobre-tungsteno, con gran proporción de cobre.
- Tungsteno-plata, con pequeña proporción de plata.

2.1.4.1.4 ALEACIONES DE ALUMINIO

Este material es utilizado cuando los electrodos a fabricar son demasiado grandes y se los realiza por fundición, este tipo de electrodos tienden a tener gran desgaste, pequeños arranques y dan como resultado superficies muy rugosas.

2.1.4.1.5 LATÓN

A pesar de tener una buena maquinabilidad, este tipo de material no es muy utilizado debido a que proporciona bajo rendimiento y un desgaste muy alto.

2.1.4.1.6 CUPROGRAFITOS

La impregnación de polvo de cobre en los poros del grafito mejora la resistividad eléctrica y da como resultado electrodos menos frágiles que el grafito. En el proceso se mantienen las demás características del grafito.

2.1.4.1.7 GRAFITO

La utilización de este material para la fabricación de electrodos permitió elevar la capacidad de arranque con respecto a lo obtenido con el cobre reduciendo el desgaste en especial en operaciones de desbaste, en este caso se tienen elevadas energías de

descarga y bajas frecuencias de chispeo. Por otro lado se obtiene un desgaste superior en operaciones de acabados en los cuales se dan altas frecuencias de descarga.

El grafito presenta mayor estabilidad que el cobre frente a altas temperaturas por lo que es uno de los materiales más utilizados para la fabricación de electrodos para electroerosión. En este proceso se utilizan muchos tipos de grafito, es por esto que las propiedades físicas y el rendimiento en el proceso erosivo son influenciadas por la naturaleza del material, granulometría y la técnica empleada para su fabricación.

Las propiedades físicas de este material son:

- Temperatura de sublimación: 3.600- 3.700° C, (alta).
- Resistividad eléctrica: 12-16 Ω mm³/m (muy alta).

Como se puede observar las características tienen un rango de valores esto se debe a la calidad del grafito. En este caso se habla de temperatura de sublimación, esto se debe a que el grafito se sublima y no se funde, es decir que pasa directamente de sólido a vapor, esto debido a que el grafito tiene una gran resistencia al choque térmico, lo que a su vez provoca que el coeficiente de dilatación sea 5 veces inferior al del cobre. Como propiedades mecánicas tenemos [10]:

- Muy fácil de mecanizar.
- Peso específico: De 1,75 a 1,85 Kg/dm³ (por ser bajo sirve para electrodos de volumen elevado).
- Tiene gran estabilidad dimensional.
- Los valores de ruptura a flexión están entre 100 y 600 Kg/cm²
- Módulo de elasticidad: Cercano a los 900 Kg/mm²

El grafito es blando, poco poroso, untuoso y presenta un brillo submetálico. Este material presenta una ausencia de deformación plástica a temperatura ambiente, esto debido a que la resistencia mecánica es función de las uniones entre las capas

cristalinas, mientras la temperatura aumenta la resistencia mecánica de este material también se incrementa hasta llegar a los 2500 ° C.

La diferencia clara entre este material y el cobre es que los electrodos de grafito únicamente pueden ser obtenidos por mecanizado en máquinas-herramienta con velocidades de mecanizado altas.

2.1.4.2 FABRICACIÓN DE ELECTRODOS DE COBRE

El mecanizado de cobre es complicado en especial cuando se requieren de tolerancias ajustadas. Al mecanizarlo este puede sufrir deformaciones en el momento del arranque de material y a su vez tiende a dejar rebabas lo que dificulta el poder obtener una buena precisión.

Una buena alternativa para la fabricación de electrodos de este material es el corte por hilo, este proceso permite obtener una mayor precisión a una velocidad elevada. También se le puede agregar telurio en una proporción del 0.5 al 1% para evitar la presencia de rebabas, este tipo de material se lo conoce como Telco, pero a su vez se produce una pérdida en las propiedades erosivas [11].

A continuación se mencionan algunas de las alternativas para el preformado de electrodos de este material:

- Por deformación en frío y caliente
- Por extrusión
- Por fundición
- Por procedimientos químicos (galvanoplastia)
- Por medio de procedimientos con arranque de viruta
- Por ataque con ácido

Para la obtención de electrodos a partir de deformación por prensa es importante disponer de los moldes adecuados para realizar las operaciones, en este caso la deformación puede ser en frío o en caliente.

Uno de los problemas que se da en este proceso son las tensiones internas que se producen en el electrodo, debido a esto se debe realizar un recocido. Las tolerancias que se obtiene por este método de fabricación son bastante estrechas.

El método de extrusión se lo utiliza para obtener electrodos de perfil constante y también de formas variadas. Otro de los métodos para la obtención de electrodos es por medio del uso de máquinas-herramienta (torneado, planeado, fresado y rectificado), al utilizar estos métodos es importante utilizar lubricación a base de taladrina o aceite.

2.1.4.3 COMPORTAMIENTO DEL GRAFITO ANTE EL MECANIZADO

Debido a que el grafito es de carácter frágil es necesario tener mucha precaución al momento de realizar el mecanizado, tratando de repartir lo más posible la presión ejercida por la sujeción de la máquina.

El grafito puede ser mecanizado con herramientas de acero rápido, en cuanto a la lubricación, este proceso se lo puede realizar en seco, pero también resulta ser conveniente el uso del mismo líquido utilizado para la electroerosión.

La viruta de grafito es polvo, debido a esto para la limpieza de la máquina utilizada es recomendable el uso de dispositivos de aspiración, ya que este polvo es erosivo y puede producir el desgaste de las guías de la máquina o incluso acumularse y con el pasar del tiempo convertirse en una pasta que se ira endureciendo y hará que la máquina pierda precisión.

Una gran ventaja de esta forma de fabricación es que se pueden realizar electrodos grandes y complicados con fresas de acero rápido. Para este caso se utilizan velocidades bajas para reducir el desgaste de las fresas y mejorar la calidad del acabado. Las velocidades recomendadas para el mecanizado con herramientas de acero rápido son de 10 a 15 m/min y como se mencionó anteriormente es recomendable el uso del líquido dieléctrico como lubricante.

2.1.5 FLUIDOS DIELECTRICOS

2.1.5.1 CARACTERÍSTICAS DE UN FLUIDO PARA ELECTROEROSIÓN

El fluido dieléctrico es un elemento de gran importancia dentro del proceso de electroerosión por lo que debe verificarse que posea buenas características a más de asegurar que sea suministrado y filtrado adecuadamente. Un buen fluido dieléctrico debe tener las siguientes características:

- Buen aislamiento eléctrico
- Reducir la superficie de descarga
- Refrigerar el electrodo y la pieza
- Buena capacidad de filtración
- Alta velocidad de ionización y deionización
- Adecuada viscosidad
- Debe presentar una mínima formación de lodos

A más de los mencionados anteriormente también es favorable verificar que sea inodoro e incoloro, no tener hidrocarburos aromáticos y no debe producir demasiados humos.

La función principal de este fluido es aislar el electrodo y la pieza procurando que cuando la distancia entre ambos sea mínima se produzca el salto de chispa. Para asegurar una buena precisión dimensional el GAP debe ser mínimo y este a su vez depende de la resistencia eléctrica del fluido. La presencia de burbujas de gas y la contaminación por residuos del proceso de erosión puede ocasionar que la resistencia eléctrica del fluido varíe [12].

El fluido dieléctrico también es responsable de mantener reducido tanto como sea posible el canal de descarga, esto para mantener concentrado en una zona localizada tanto la energía como la temperatura, para obtener un rendimiento elevado para cada descarga.

La viscosidad es la característica de la cual prácticamente depende el canal de ionización (a un mismo amperaje), esto debido a que mientras mayor sea la viscosidad la energía y profundidad de cráter también será mayor.

Por otro lado el fluido también tiene la función de refrigeración y es el encargado de evitar que exista un fenómeno de sobrecalentamiento. Al tener una cantidad inadecuada de fluido dieléctrico se ocasionaría una elevada producción de gas y vapor, al igual que un fallo en la precisión.

2.1.5.2 TIPOS DE FLUIDOS DIELECTRICOS

De acuerdo a las características mencionadas anteriormente los líquidos que se pueden utilizar son los hidrocarburos, a pesar de que entre aceites y petróleos existen ciertas diferencias.

2.1.5.2.1 ACEITES

Los aceites minerales son los más utilizados en este proceso, esto debido a su alta temperatura de inflamación que esta entre 120 y 150 ° C. Con respecto a la viscosidad tenemos que en este caso son elevadas puesto que van de 6 a 29 cts. Al combinar esta característica con la mencionada anteriormente, este fluido obtiene una gran ventaja para trabajar en desbaste por electroerosión. La viscosidad elevada provoca que este tipo de dieléctrico sea utilizado cuando se tiene un GAP grande puesto que si es demasiado pequeño el aceite no podía circular.

2.1.5.2.2 AGUA

El agua des ionizada suele ser utilizado comúnmente como fluido dieléctrico en el proceso de electroerosión por hilo y algunos casos concretos para micro mecanizado en el proceso de electroerosión por penetración como puede ser para taladrado.

2.1.5.2.2 DIÉSEL COMO FLUIDO DIELECTRICO

El fluido dieléctrico varía de acuerdo al tipo de máquina por lo que se puede decir que una gran parte de estas máquinas utilizan diésel como fluido dieléctrico y esto se puede justificar debido a su viscosidad y punto de autoinflamabilidad. Teniendo en cuenta que el aceite mineral es el que tienen mayor aceptación para ser usado como fluido dieléctrico se puede tomar sus propiedades como referencia para demostrar que el diésel es un fluido útil para esta aplicación. En la tabla 2.1 se indica las propiedades físicas y químicas del diésel.

Tabla 2. 1. Propiedades físicas y químicas del diésel

Aspecto: Líquido oleoso.	pH: NP
Color:	Olor: Característico.
Punto de ebullición: PIE 149 °C, PFE: 385 máx. (ASTM D-86)	Punto de fusión/congelación:
Punto de inflamación/Inflamabilidad: 52 °C min. (ASTM D-93)	Autoinflamabilidad: 257 °C
Propiedades explosivas: Límite inferior explosivo: 1.3% Límite superior explosivo: 6 %	Propiedades comburentes: NP
Presión de vapor: (Reid) 0.004 Atm.	Densidad: 0.87 g/cm ³ a 15 °C (ASTM D-1298)
Tensión superficial: 25 dinas/cm ² a 25 °C	Viscosidad: 1.7-4.1 cSt a 40 °C (ASTM D-445)
Densidad de vapor: 3.4 (aire: 1)	Coef. reparto (n-octanol/agua):
Hidrosolubilidad: Muy baja.	Solubilidad: En disolventes del petróleo.
Otros datos: Punto de obstrucción filtro frío: -6 °C (verano e invierno) Calor de combustión: +45500 KJ/Kg (ASTM D-240) Azufre: 0.5 % masa máx. (ASTM D-4294)	

Fuente: [13]

2.1.6 MICROFUNDICIÓN DE ALUMINIO

Uno de los materiales más utilizados para la fabricación de matrices es el aluminio, pero este en estado puro no posee buenas propiedades con respecto al mecanizado, por lo que se requiere trabajar con aleaciones de este material. El método común de obtención de bloques de aleación de aluminio es por medio de fundición, este proceso le brinda al aluminio las siguientes características:

- Alta resistencia a la fatiga
- Elevada calidad en el acabado

- Excelente capacidad de mecanizado

Debido a las características mencionadas anteriormente, este material es útil para el mecanizado por electroerosión. La microfundición de aluminio hace referencia a un proceso similar a la fundición en el cual se obtiene una menor cantidad de porosidad y una mejor calidad, para la investigación se utilizó placas de aluminio obtenidas por este proceso [14].

Para la obtención de las placas de este material se utilizó chatarra de aluminio 6061, en las tablas 2.2 y 2.3 se muestra la composición química y propiedades del aluminio 6061:

Tabla 2. 2. Composición química del Aluminio 6061

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
Min	0.40		0.15		0.80	0.04				
Max	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20	0.35	0.25	0.15	0.15	Resto

Fuente: [15]

Tabla 2. 3. Propiedades físicas del Aluminio 6061

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

Fuente: [15]

2.1.7 DESGASTE DE ELECTRODOS EN ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Como hemos visto anteriormente la electroerosión por penetración se caracteriza por ser un proceso de mecanizado de alto rendimiento debido a la gran precisión y acabados superficiales que se pueden obtener. El usuario trata de aprovechar al máximo este tipo de tecnología por lo que impone requisitos cada vez más exigentes y requieren de tolerancias cada vez más pequeñas, es por esto la necesidad de conocer

los factores que afectan el proceso de electroerosión por penetración, uno de estos es el desgaste de los electrodos el cual será objeto de análisis en el proyecto. En la figura 2.5 se muestra el desgaste en electrodos de forma.

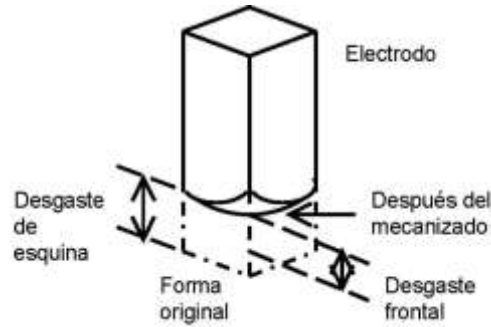


Figura 2. 5. Desgaste frontal y de esquina

Fuente: [16]

El desconocimiento del desgaste que se produce en los electrodos y la dimensión que tiene el GAP en el perfil del electrodo producen una pérdida de precisión en el mecanizado y la alteración de la cavidad final generada, como se muestra en la figura 2.6 que se muestra a continuación.

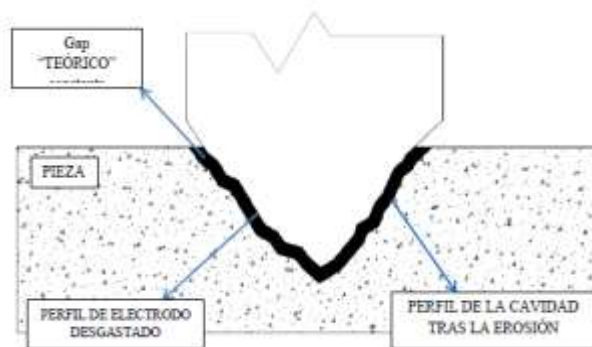


Figura 2. 6. Representación de los factores principales para la definición de cavidad final

Fuente: [16]

En este tipo de proceso la erosión se da a partir de descargas eléctricas, y al estar inmersos, tanto el electrodo como la pieza están expuestos, por lo que a más de

erosionar el material base también lo hace el electrodo produciéndose un desgaste conocido como TWR (Tool wear rate).

En los electrodos de forma se puede apreciar cuatro tipos de desgaste, los mismos que se muestran en la figura 2.7:

- Desgaste longitudinal
- Desgaste de la esquina
- Desgaste volumétrico
- Desgaste lateral

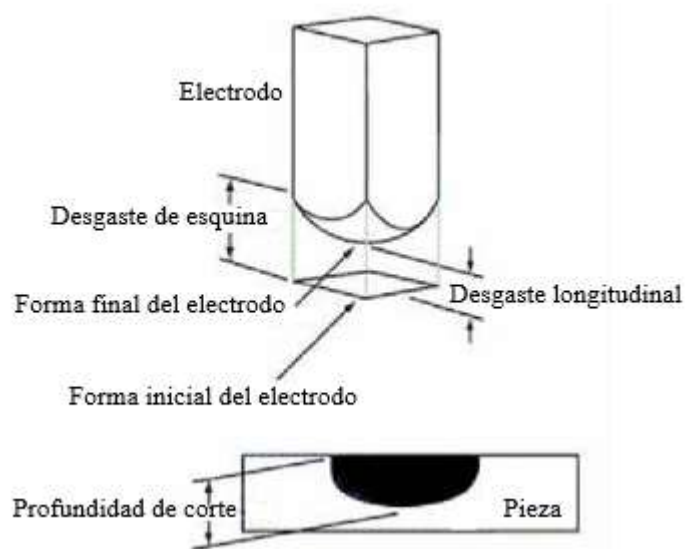


Figura 2. 7. Tipos de desgaste

Fuente: [16]

El desgaste longitudinal se trata básicamente de la reducción en la longitud del electrodo debido al arranque de material producto de la erosión, este desgaste se define por la ecuación 2.1 mostrada a continuación:

$$d_L = \frac{L_i - L_f}{PM} * 100 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

d_L : Desgaste longitudinal [%]

L_i : Longitud inicial [mm]

L_f : Longitud final [mm]

PM: Profundidad de mecanizado [mm]

Las esquinas del electrodo tienden a concentrar los campos electromagnéticos producidos durante el proceso de electroerosión, esto produce que las esquinas estén sometidas a un desgaste mayor, para calcular el este desgaste en las esquinas se utiliza la ecuación 2.2.

$$d_E = \left(\frac{PM}{DEA} + L_i - L_f \right) * 100 \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

d_E : Desgaste longitudinal [%]

L_i : Longitud inicial [mm]

L_f : Longitud final [mm]

PM: Profundidad de mecanizado [mm]

DEA: Desgaste de esquina aparente, que puede ser obtenido usando medios ópticos

El desgaste volumétrico o también llamado simplemente desgaste y que será objeto de análisis en la presente investigación, indica la cantidad de material arrancado del electrodo por unidad de tiempo. Dicho parámetro será analizado más adelante.

Por último tenemos el desgaste lateral del electrodo, este se produce a lo largo de las paredes del electrodo y principalmente es ocasionado por las partículas que arrastra el dieléctrico fuera de la zona del GAP produciendo una erosión del tipo mecánica. Cuando el desgaste lateral es menor al 1% normalmente se considera que no existe situación de desgaste.

2.1.8 PARÁMETROS EN EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN

Existen tres variables que pueden ser consideradas fundamentales para definir las condiciones del campo eléctrico, las cuales son:

- Diferencia de potencial entre electrodo y pieza
- Intensidad
- Conductividad de canal

Es importante analizar estas variables puesto que la ionización del canal de descarga tanto como la chispa y el arranque estarán determinadas por su evolución en el tiempo. En la figura 2.8 se describe cómo evolucionan en un ciclo tanto la tensión como la intensidad, cabe mencionar que la representación es idealizada puesto que dependiendo de la máquina los registros pueden mostrar variaciones.

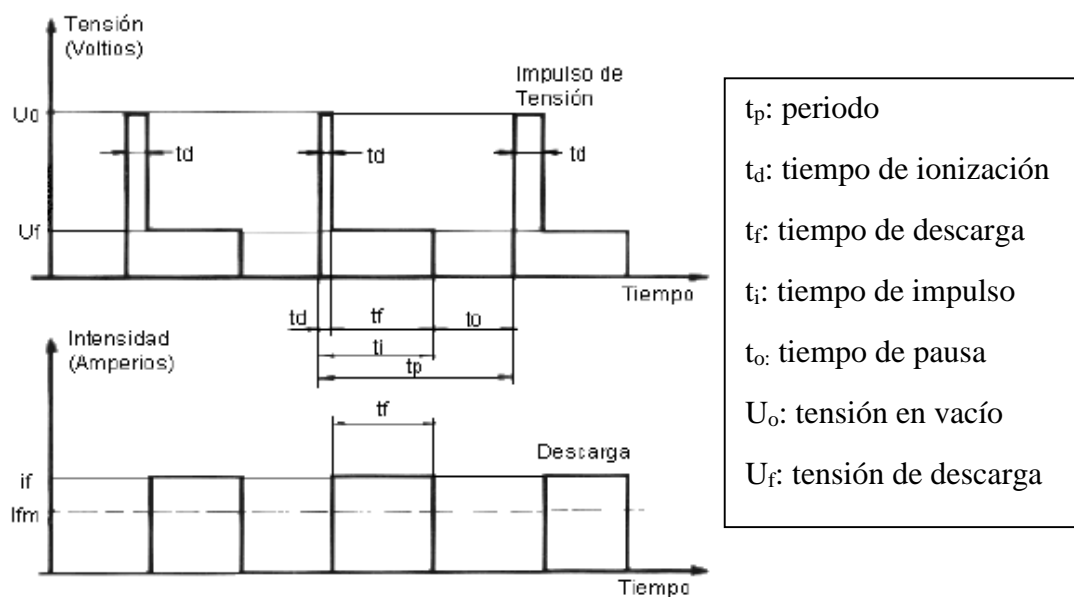


Figura 2. 8. Curvas de tensión intensidad durante la descarga

Fuente: [17]

De la gráfica podemos analizar que el tiempo de duración del ciclo (t_p) es la sumatoria del tiempo en cual al electrodo se le aplica una tensión de descarga (tiempo de impulso) y el tiempo durante el cual existe una ausencia de tensión (tiempo de pausa).

A su vez se puede ver que el tiempo de impulso se descompone en tiempo de ionización y tiempo de descarga. Se conoce como tiempo de ionización al retraso producido entre la aplicación de la tensión y la corriente deseada. Debido a este retraso se producen picos de tensión a los cuales se les denomina tensión de vacío. Por otra parte tenemos el tiempo de descarga que básicamente es el momento en que se aplica la intensidad de descarga (if) a una determinada tensión (uf).

2.1.8.1 TEMPERATURA DEL FLUIDO DIELECTRICO

El fluido dieléctrico como se ha mencionado anteriormente es en el cual se encuentran inmersos tanto la pieza como el electrodo en el proceso de electroerosión. La máquina para realizar este proceso debe tener termorregulador que sirve para variar la temperatura de dicho fluido.

En el momento de variar la temperatura el termorregulador requiere de un tiempo para llevar a cabo su función antes de iniciar el proceso de electroerosión, esto implicaría, a más de los efectos mencionados anteriormente, tanto un mayor tiempo de producción como un aumento el gasto eléctrico [18].

2.1.8.2 INTENSIDAD DE CORRIENTE

La intensidad de corriente se mide en amperios (A), este parámetro corresponde al flujo de carga eléctrica que es originada por el electrodo para poder erosionar la pieza arrancando el material y penetrándola.

La intensidad que se pueda producir dependerá de la máquina que se utilice. Al trabajar con una mayor intensidad de corriente el tiempo de erosión será menor, pero esto ocasionara que el electrodo tenga un mayor desgaste.

2.1.8.3 TIEMPO DE DESCARGA

Este parámetro se refiere básicamente al tiempo en cual esta aplicada la tensión, la misma que provocara la intensidad de corriente mencionada anteriormente. La

corriente eléctrica es la que provoca la erosión y permite la penetración, debido a esto si se incrementa el tiempo de descarga la erosión también será mayor.

2.1.8.4 TIEMPO DE PAUSA

La función principal de este parámetro es permitir el descanso y enfriamiento de las partes en contacto como son el electrodo y la pieza, esto debido a que durante este tiempo tanto la intensidad como la tensión son nulas.

Al tener un tiempo de pausa mayor el desgaste del electrodo se reduce puesto que no existe erosión pero por otro lado el mecanizado final tardara más.

2.1.8.5 TAMAÑO DEL GAP

Como se mencionó anteriormente el GAP es el espacio en el cual se produce la erosión y se ubica entre el electrodo y la pieza de trabajo en la figura 2.9 se puede apreciar dos tipos de GAP:

- GAP frontal: Se utiliza esta denominación cuando el espacio y el eje de penetración no son paralelos
- GAP lateral: Se lo denomina así cuando el espacio y el eje de penetración son paralelos

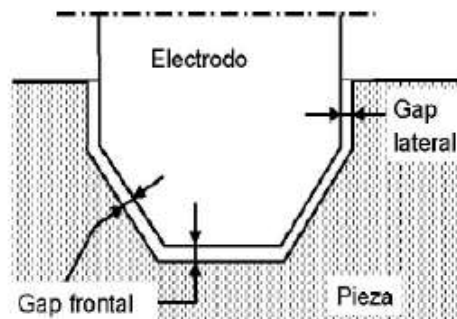


Figura 2. 9. GAP lateral y frontal

Fuente: [19]

Este es uno de los factores más importantes en el proceso de electroerosión y es servido controlado por una serie de sensores que posee la máquina, los cuales básicamente controlan el movimiento del cabezal de la máquina.

El GAP por lo general tiene valores que oscilan entre 0,010 y 0,050 mm, dependiendo de la aplicación el valor puede ser menor. Es importante mencionar que para mantener un GAP constante la tasa de eliminación de material y el avance del cabezal deben ser iguales.

2.1.8.6 TENSION

Este parámetro es el responsable de crear la diferencia de potencial, la cual se genera por una fuente de corriente continua, la cual entrega valores entre 40 y 400 voltios. En el caso que se utilice corriente alterna se debe agregar una etapa de rectificación.

La diferencia de potencial origina la intensidad de corriente para producir el arranque de material y a su vez determina tanto el tamaño de la chispa como el GAP. Tomando en cuenta esto al tener una tensión elevada se tendrá un incremento en el GAP, la tasa de eliminación del material y también del electrodo.

2.1.8.7 POLARIDAD

Normalmente en el proceso de electroerosión el electrodo corresponde al cátodo y la pieza el ánodo, aunque existe la posibilidad de invertir la polaridad, pero este cambio no provocara alteraciones importantes lo que hace recomendable trabajar con una polaridad constante, a continuación se muestra en la figura 2.10 un esquema del sistema en el proceso de electroerosión por penetración.

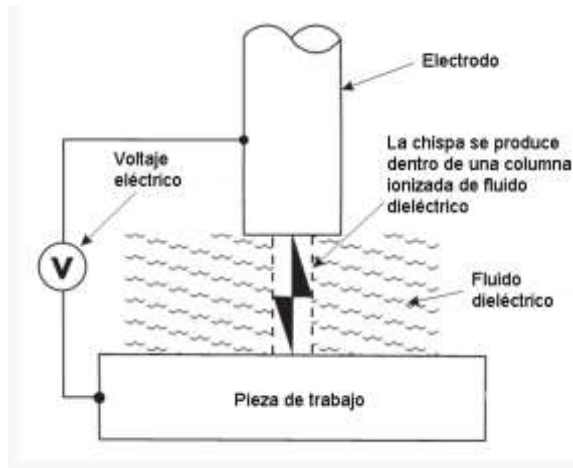


Figura 2. 10. Sistema del proceso de electroerosión por penetración.
Fuente: [20]

2.1.9 COEFICIENTES PARA EL CÁLCULO DEL DESGASTE EN ELECTRODOS DE FORMA

2.1.9.1 DESGASTE VOLUMÉTRICO DE LA HERRAMIENTA (TW)

La tasa de desgaste de la herramienta, o TW (Tool Wear), es un coeficiente que relaciona el volumen de material perdido por la herramienta y la duración del ensayo. Con el análisis de este parámetro podremos observar el desgaste volumétrico que se produce en el electrodo, a su vez este coeficiente es muy útil al tratar de conseguir un ahorro económico puesto que al minimizarlo se reduce el número de electrodos que deba adquirirse [21].

La ecuación 2.3 permite el cálculo de este parámetro:

$$TW = \frac{V_1}{t} \left[\frac{mm^3}{min} \right] \quad \text{Ec.2.3}$$

Donde:

V_1 : Volumen perdido del electrodo (mm^3)

t : Tiempo (minutos)

Para obtener V_1 :

$$V_1 = \frac{m}{\rho} \quad [mm^3] \quad \text{Ec.2.4}$$

Donde:

$$m = m_f - m_i \quad [g] \quad \text{Ec.2.5}$$

m_f : Masa final del electrodo (gr)

m_i : Masa inicial del electrodo (gr)

ρ : Densidad del electrodo (g/mm^3)

2.1.9.2 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL (MRR)

La tasa de eliminación de material, o MRR (Material Removing 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 2.6.

$$MRR = \frac{V_2}{t} \quad \left[\frac{mm^3}{min} \right] \quad \text{Ec.2.6}$$

Donde:

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

t: Tiempo (minutos)

Para obtener V_2 :

$$V_2 = \frac{m}{\rho} \quad [mm^3] \quad \text{Ec.2.7}$$

Donde:

$$m = m_f - m_i \quad [g] \quad \text{Ec.2.8}$$

m_f : Masa final de la pieza (gr)

m_i : Masa inicial de la pieza (gr)

ρ : Densidad de la pieza (g/mm^3)

2.1.9.3 COEFICIENTE DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA (TWR)

El coeficiente de desgaste de la herramienta o TWR (Tool Wear Rate) relaciona el volumen de material perdido por la herramienta con el material arrancado en la pieza para cada ensayo individual. El resultado obtenido será en valor porcentual. Para el cálculo se utiliza la ecuación 2.9.

$$TWR = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \% \quad \text{Ec.2.9}$$

Donde:

V_1 : Volumen perdido del electrodo (mm^3)

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

Los volúmenes V_1 y V_2 se calculan con las ecuaciones 2.4 y 2.7 respectivamente.

2.2 HIPÓTESIS

El análisis del desgaste en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración en el mecanizado de partes de aluminio permitirá determinar el material y la geometría con mayor coeficiente de desgaste.

2.3 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS

2.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Proceso de electroerosión por penetración con electrodos de grafito y cobre

2.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Desgaste en los electrodos

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

El método que tuvo una gran importancia en el desarrollo de la investigación es el bibliográfico, debido a que de esta manera es posible aprovechar la información existente en artículos técnicos, tesis, páginas web, revistas técnicas, catálogos y libros. La importancia de la recolección de esta información es conocer las características de los materiales que intervienen en el proceso de electroerosión y a su vez poder entender de mejor manera los parámetros que intervienen en el desgaste de los electrodos en el proceso de electroerosión por penetración y como el desgaste afecta la superficie de los electrodos.

3.1.1 EXPERIMENTAL

Por medio de este tipo de investigación se realizaron varios ensayos usando electrodos de distintos materiales y formas, los cuales fueron utilizados en el proceso de electroerosión por penetración a distintas profundidades de desbaste para poder medir el desgaste producido.

3.1.2 DESCRIPTIVO

La utilización de este nivel de investigación fue debido a que en el desarrollo del proyecto se necesitó describir las propiedades de las probetas y como se produjo el desgaste de acuerdo a cada material.

3.1.3 EXPLORATORIO

Se adopta este tipo de investigación debido a que se estableció una visión generalizada de lo que sucede al momento de utilizar electrodos de forma de distintos materiales y

geometrías diferentes, lo cual será de mucha utilidad en proyectos posteriores para la optimización del proceso, puesto que, la información existente sobre desgaste es poca.

3.1.4 CUANTITATIVA

Este tipo de investigación permitió que los resultados de los ensayos fueran tabulados y analizados mediante cálculos, para obtener datos porcentuales sobre la influencia del desgaste en cada uno de los electrodos analizados.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 POBLACIÓN

La población tomada en cuenta para este tipo de investigación fueron los electrodos de forma de distintos materiales para este caso de grafito y cobre, los cuales son utilizados de forma regular en el proceso de electroerosión, ya que estos materiales poseen propiedades favorables para este tipo de proceso y una buena disponibilidad en el mercado.

3.2.2 MUESTRA

Para la investigación se consideró una muestra conformada por electrodos de forma tanto de sección circular como de sección cuadrada para cada material analizado. Tomando en cuenta que el análisis se realizara en dos tipos de material se optó por utilizar 6 electrodos de grafito y 6 electrodos de cobre, para cada caso estos 6 electrodos están divididos en 3 de sección circular y 3 de sección cuadrada como se muestra en la tabla 3.1:

Tabla 3. 1. Número de probetas

Profundidad	Electrodos de Cobre		Electrodos de grafito		
	E. Sección Circular	E. Sección Cuadrada	E. Sección Circular	E. Sección Cuadrada	
2 mm	1	1	1	1	
4 mm	1	1	1	1	
6 mm	1	1	1	1	
Total	3	3	3	3	12

Fuente: Autor

Como se puede observar en la tabla 3.1 el total de electrodos necesarios para la investigación fueron 12, pero por precaución en el caso de que se presentara alguna anomalía se agregaron 2 electrodos de sección cuadrada y 2 de sección circular por cada material, es decir 4 de cada geometría, dando un total de 20 electrodos.

3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.3.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Proceso de electroerosión por penetración con electrodos de grafito y cobre

Tabla 3. 2. Operacionalización de la Variable Independiente

Conceptualización	Categorías	Indicadores	Ítems básicos	Técnicas e instrumentos
Proceso de mecanizado que utiliza descargas eléctricas para arrancar material de la pieza utilizando electrodos de forma	Profundidad de mecanizado	Distancia hasta la cual penetra el electrodo	2 mm 4 mm 6 mm	Observación directa, medición mediante calibrador
	Material del electrodo	Tipo material sobre el cual es fabricado el electrodo	Cobre Grafito	Investigación experimental
	Forma del electrodo	Tipo de geometría que tendrá el electrodo (barra maciza)	Sección rectangular Sección cuadrada	Observación directa

Fuente: Autor

3.3.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Desgaste del electrodo

Tabla 3. 3. Operacionalización de la variable dependiente

Conceptualización	Categorías	Indicadores	Ítems básicos	Técnicas e instrumentos
El desgaste de la herramienta es la pérdida del material en el electrodo debido al proceso de electroerosión por penetración	Desgaste volumétrico	Relaciona el volumen de material perdido por la herramienta y la duración del ensayo	[0 - 30 mm ³ /min]	Investigación experimental Medición mediante balanza Ficha de datos Toma del tiempo de duración del ensayo
	Coefficiente de desgaste	Relaciona el volumen de material perdido por la herramienta con el material arrancado en la pieza para cada ensayo individual	[0 – 50 %]	Investigación experimental Medición mediante balanza Ficha de datos

Fuente: Autor

3.4 PLAN DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Al tratarse de un proyecto experimental en el cual se buscó obtener datos sobre el desgaste de electrodos para el proceso de electroerosión por penetración y a pesar de que la información concreta sobre este tema es escasa, el medio fundamental de investigación fue el bibliográfico, por lo que la información obtenida para el desarrollo fue de libros, catálogos, proyectos de tesis, artículos técnicos y sitios web referentes a electroerosión en general. A su vez se realizó una observación directa para la asimilación del proceso y la selección de los materiales adecuados para el desarrollo del mismo.

Con la investigación previa se obtuvieron parámetros como son los tipos de materiales (grafito y cobre), geometría del electrodo (sección cuadrada y sección redonda) y profundidad de desbaste adecuados para el análisis.

Por otro lado se utiliza la investigación experimental y de campo puesto que se desarrollaran varios ensayos, en la máquina para electroerosión por penetración Chevalier DM-540, de los cuales se toman datos sobre el desgaste de cada electrodo para cada condición propuesta. Estos datos obtenidos son registrados en una ficha de acuerdo al material, geometría y profundidad a la que se haya realizado el ensayo.

Con los datos obtenidos se realizaron gráficas con respecto a la profundidad de penetración (2, 4 y 6 mm) y al tiempo de duración de los ensayos con el fin de comparar el desgaste en cada tipo de electrodo y concluir que material y geometría sufren el mayor desgaste.

3.5 PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

3.5.1 PLAN DE PROCESAMIENTO

El plan de procesamiento de la información está establecido básicamente de la siguiente manera:

- Evaluar la información obtenida de las fuentes bibliográficas como son libros, proyectos de tesis, catálogos, artículos técnicos y páginas web.
- Analizar los parámetros que intervienen en el desgaste de electrodos de forma.
- Establecer las condiciones y características que deberán tener los electrodos para cada caso.
- Toma de datos de los electrodos en estado previo a la realización de los ensayos.
- Realizar los ensayos correspondientes para cada caso.
- Recolección de datos de cada electrodo analizado, una vez culminado los ensayos.

3.5.2 PLAN DE ANÁLISIS

Una vez concluidos los ensayos, los datos recolectados son tabulados en fichas correspondientes de acuerdo a la profundidad analizada, material y geometría del electrodo. A partir de esta tabulación se realiza el cálculo de los factores como son el desgaste volumétrico del electrodo y el coeficiente de desgaste para cada caso.

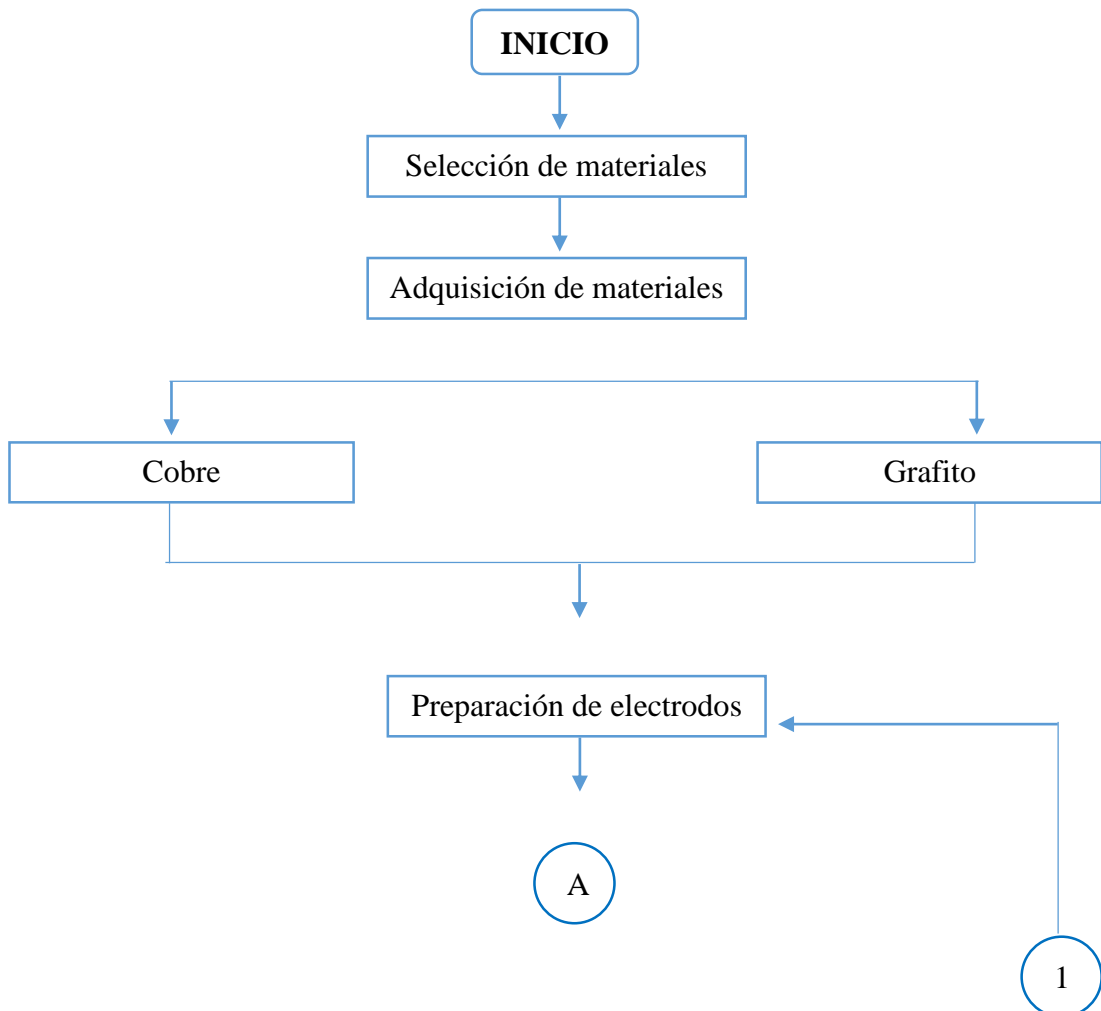
Con los factores de desgaste obtenidos para cada caso se procede a realizar una comparación de los resultados del desgaste entre las geometrías de los diferentes materiales.

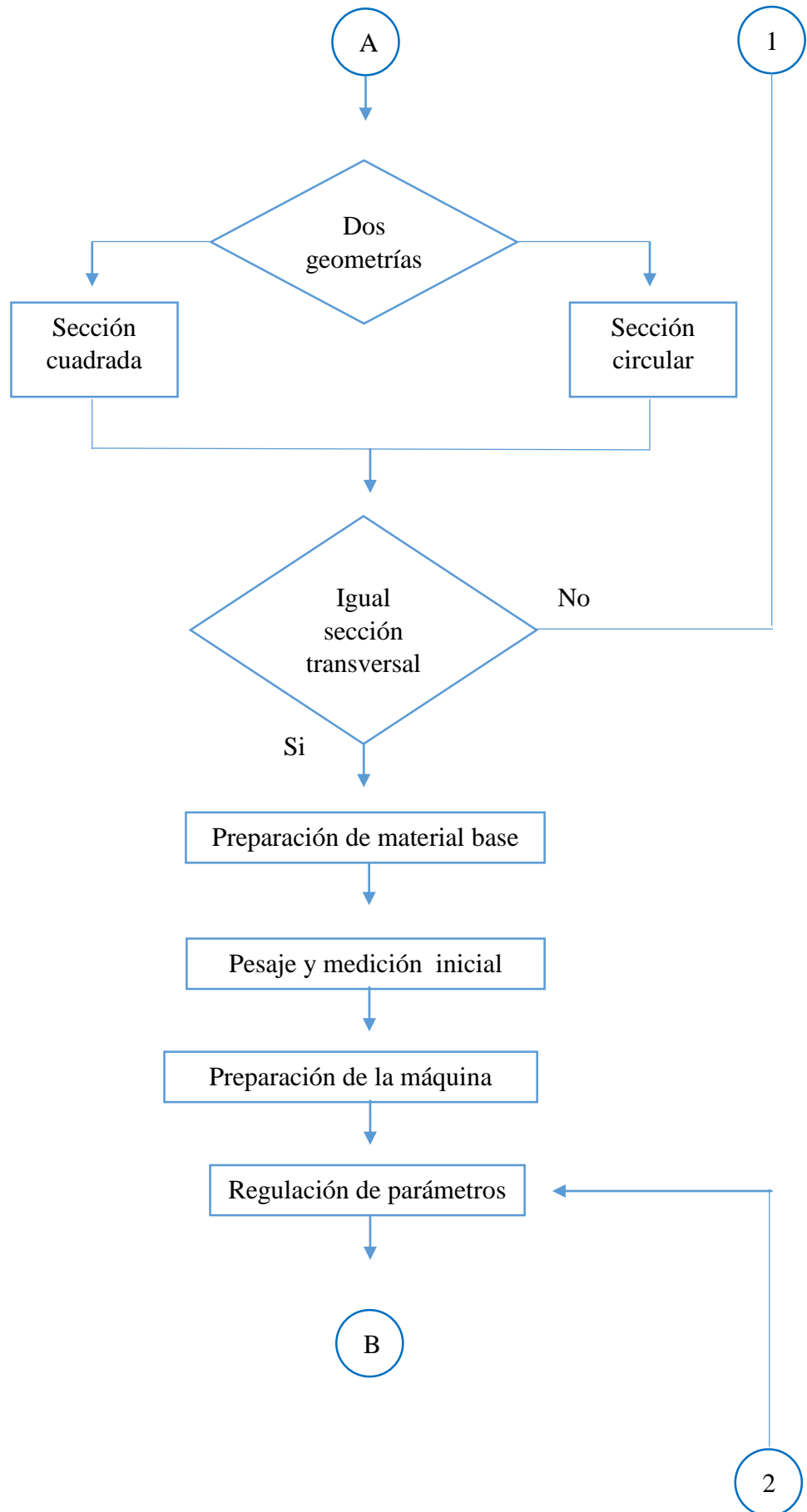
CAPÍTULO IV

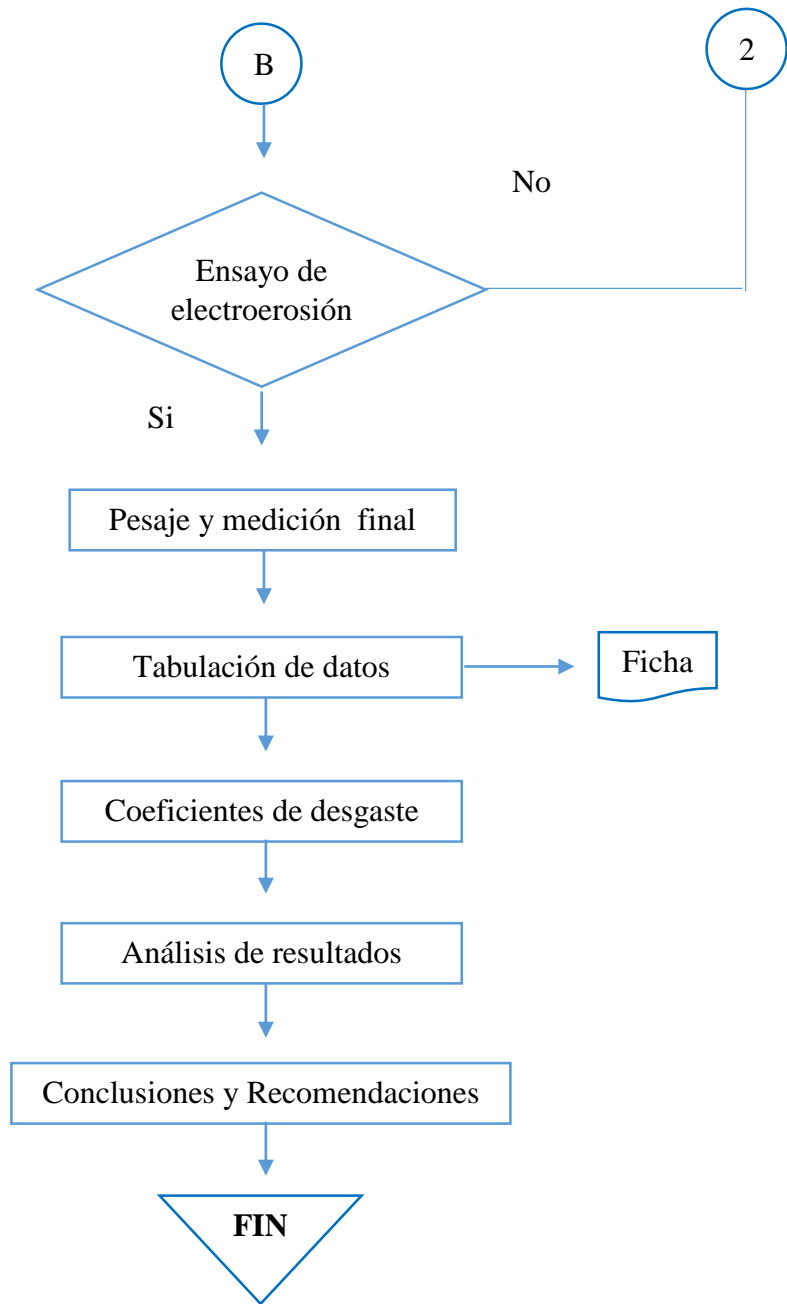
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

El desarrollo de los ensayos y el proceso de recolección de datos están especificados en el siguiente diagrama de flujo, el mismo que fue adaptado para el análisis de desgaste en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración.







4.1.1 GEOMETRÍAS DE LAS PROBETAS

Como se ha mencionado anteriormente la fuente de análisis son los electrodos de forma tanto de grafito como de cobre, teniendo en cuenta que se utilizan dos materiales distintos, las geometrías deben ser iguales para cada material. Teniendo en cuenta la sujeción del electrodo (30 mm) y la profundidad de mecanizado se optó por las dimensiones mostradas en las figuras 4.1 y 4.2:

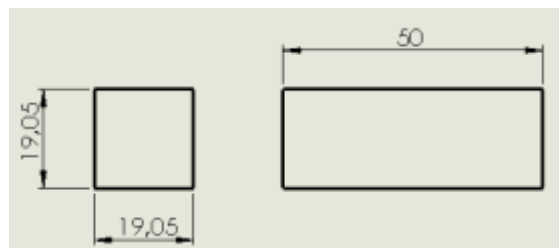


Figura 4. 1. Dimensiones de los electrodos de sección cuadrada (mm).

Fuente: Autor

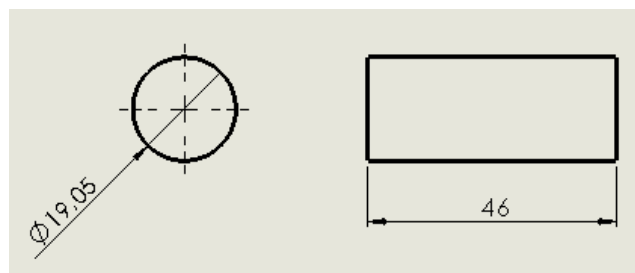


Figura 4. 2. Dimensiones de los electrodos de sección circular (mm).

Fuente: Autor

Para la erosión es necesario utilizar un material base, para lo cual se optó por micro fundición de aluminio. Dado las dimensiones del área del electrodo que estuvo en contacto con la placa (19.05 x 19.05 mm), la sujeción de la misma a la máquina y la facilidad de adquisición, las dimensiones seleccionadas para las placas de material base fueron las mostradas en la figura 4.3.

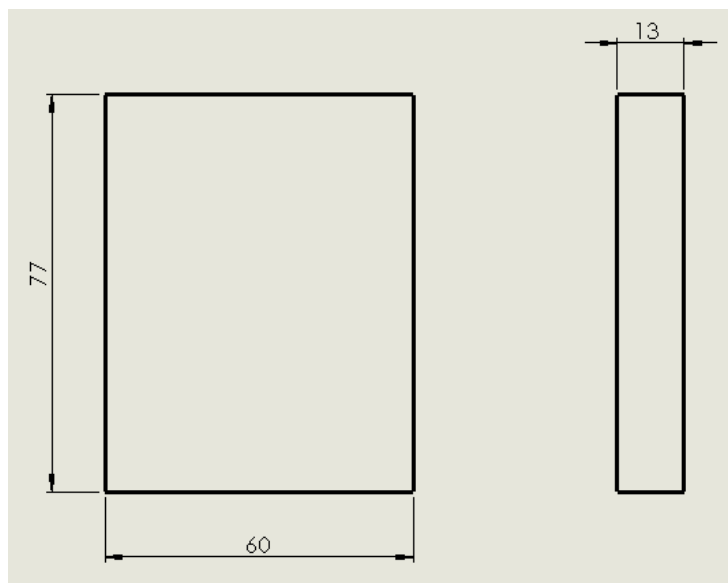


Figura 4. 3. Placa de micro fundición de aluminio (mm).

Fuente: Autor

4.1.2 ADQUISICIÓN DE MATERIALES

La investigación que se realizó sobre los tipos de materiales usados para la fabricación de electrodos confirmo que el grafito y el cobre son los más utilizados dentro del proceso de electroerosión por penetración para el mecanizado de piezas. La preferencia por estos materiales se basa en que los acabados que se obtienen en la pieza a mecanizar son bastante buenos, además de que estos son los materiales con mayor facilidad de adquisición en el mercado. Estos materiales se encuentran en el mercado comúnmente como barras macizas, tanto de sección circular como cuadrada, lo que fue beneficioso para la investigación puesto que estas secciones se adaptaron perfectamente a la geometría establecida para el estudio.

Se tomó en cuenta al aluminio para la utilización como material base puesto que este es un material usado comúnmente en la fabricación de moldes, principalmente en le industria del calzado. El proceso seleccionado para la obtención de las pequeñas placas que se utilizaron como material base en los ensayos fue microfundición debido a que de esta manera se obtienen piezas de mejor acabado y sin porosidad excesiva. En las siguientes fichas se muestran las principales propiedades y cantidad de probetas de cada material utilizado:

Ficha 4. 1 Propiedades del cobre electrolítico (sección cuadrada)

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 					
Material para electrodos					
Datos informativos					
Cantidad de probetas:	3	Autorizado por:	In. Mg. Segundo Espín	Realizado por:	David Núñez
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales F.I.C.M		Fecha de ejecución:	19/09/2016	
Especificación del material					
Tipo de material:	Cobre electrolítico		Detalle referencial		
Sección:	Cuadrada				
Dimensiones de la sección:	19,05 x 19,05 mm				
Características					
Temperatura de fusión	1083 °C				
Resistividad eléctrica	0,017 Ω mm ² /m				
Densidad:	8,81 Kg/dm ³				
Coef. de dilatación lineal	16x10 ⁻⁶ °C				
Composición química:					
99,9 % Cu					
Observaciones:					
Los materiales se obtuvieron en forma de barras macizas directamente del proveedor DAVICOM CIA. LTDA.					
Elaborado:	David Núñez		Verificado:	In. Mg. Segundo Espín	
Revisado:	In. Mg. Segundo Espín		Validado:	In. Mg. Segundo Espín	

Ficha 4. 2 Propiedades del cobre electrolítico (sección redonda)

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 					
Material para electrodos					
Datos informativos					
Cantidad de probetas	3	Autorizado por:	In. Mg. Segundo Espín	Realizado por:	David Núñez
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales F.I.C.M		Fecha de ejecución:	19/09/2016	
Especificación del material					
Tipo de material:	Cobre electrolítico		Detalle referencial		
Sección:	Redonda				
Diámetro de la sección:	19,05 mm				
Características					
Temperatura de fusión	1083 °C				
Resistividad eléctrica	0,017 Ω mm ² /m				
Densidad:	8,81 Kg/dm ³				
Coef. de dilatación lineal	16x10 ⁻⁶ °C				
Composición química:					
99,9 % Cu					
Observaciones:					
Los materiales se obtuvieron en forma de barras macizas directamente del proveedor DAVICOM CIA. LTDA.					
Elaborado:	David Núñez		Verificado:	In. Mg. Segundo Espín	
Revisado:	In. Mg. Segundo Espín		Validado:	In. Mg. Segundo Espín	




Ficha 4. 3 Propiedades del grafito (sección cuadrada)

 <p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p> 					
Material para electrodos					
Datos informativos					
Cantidad de probetas	3	Autorizado por:	In. Mg. Segundo Espín	Realizado por:	David Núñez
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales F.I.C.M		Fecha de ejecución:	19/09/2016	
Especificación del material					
Tipo de material:	Grafito		Detalle referencial		
Sección:	Cuadrada				
Dimensiones de la sección:	19,05 x 19,05 mm				
Características					
Temperatura de sublimación:	3.600- 3.700° C				
Resistividad eléctrica	12-16 Ω mm ³ /m				
Densidad:	1,78 Kg/dm ³				
Módulo de elasticidad:	900 Kg/mm ²				
Composición química:					
99,9 % C					
Observaciones:					
Los materiales se obtuvieron en forma de barras macizas directamente del proveedor DAVICOM CIA. LTDA.					
Elaborado:	David Núñez		Verificado:	In. Mg. Segundo Espín	
Revisado:	In. Mg. Segundo Espín		Validado:	In. Mg. Segundo Espín	

Ficha 4. 4 Propiedades del grafito (sección redonda)

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div>  </div>					
Material para electrodos					
Datos informativos					
Cantidad de probetas	3	Autorizado por:	In. Mg. Segundo Espín	Realizado por:	David Núñez
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales F.I.C.M		Fecha de ejecución:	19/09/2016	
Especificación del material					
Tipo de material:	Grafito				
Sección:	Redonda				
Diámetro de la sección:	19,05 mm				
Características					
Temperatura de sublimación:	3.600- 3.700° C				
Resistividad eléctrica	12-16 Ω mm ³ /m				
Densidad:	1,78 Kg/dm ³				
Módulo de elasticidad:	900 Kg/mm ²				
Composición química:					
99,9 % C					
Observaciones:					
Los materiales se obtuvieron en forma de barras macizas directamente del proveedor DAVICOM CIA. LTDA.					
Elaborado:	David Núñez		Verificado:	In. Mg. Segundo Espín	
Revisado:	In. Mg. Segundo Espín		Validado:	In. Mg. Segundo Espín	

Ficha 4. 5 Propiedades de la pieza a mecanizar (microfundición de aluminio)

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 					
Material para la pieza base					
Datos informativos					
Cantidad de probetas	12	Autorizado por:	In. Mg. Segundo Espín	Realizado por:	David Núñez
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales F.I.C.M		Fecha de ejecución:	19/09/2016	
Especificación del material					
Tipo de material:	Micro fundición de Aluminio		Detalle referencial		
Sección:	Rectangular				
Dimensiones:	87x70x13 mm				
Características					
Densidad:	2.7 Kg/dm ³				
Rango de Fusión:	575 – 650 °C				
Coefficiente de dilatación:	23.6 °C ⁻¹ x10 ⁶				
Módulo de elasticidad:	69500 MPa				
Composición química:					
0.8% Si – 0.7% Fe – 0.4%Cu – 0.15% Mg – 0.35% Cr – 0.25% Zn – 0.15% Ti0.15% - 0.15% Otros – 96.9% Al					
Observaciones:					
Las placas se obtuvieron de acuerdo a las medidas solicitadas directamente del proveedor DAVICOM CIA. LTDA.					
Elaborado:	David Núñez		Verificado:	In. Mg. Segundo Espín	
Revisado:	In. Mg. Segundo Espín		Validado:	In. Mg. Segundo Espín	

4.1.3 PREPARACIÓN DE ELECTRODOS

En los apartados anteriores se mencionan las geometrías y tipos de materiales utilizados, una vez que se tuvo definidos estos parámetros se realizó una preparación previa de las probetas, esto para el caso de los electrodos, debido a que en el mercado se los obtuvo en forma de barras macizas de medidas superiores a las establecidas.

Cada electrodo fue sometido a un proceso de rectificación, puesto que para este tipo de ensayos se requiere la mayor uniformidad posible y de esta manera evitar errores en los resultados.



Figura 4. 4. Electrodo de Cobre.

Fuente: Autor

Como se ha mencionado anteriormente, al mecanizar partes con el proceso de electroerosión por penetración la pieza obtiene la forma exacta del electrodo incluyendo rasgos superficiales, por más mínimos que sean, es por esto que para el estudio realizado se requirió lijar cada electrodo de tal manera que la superficie de la cara a ensayar fuera regular y sin rayones.



Figura 4. 5. Rectificado de la cara superior de los electrodos.

Fuente: Autor

4.1.4 PESAJE Y MEDICIÓN INICIAL

Una parte esencial en el desarrollo de la investigación fueron los datos iniciales, puesto que esto permite tener un registro del progreso del desgaste. Los datos que intervienen principalmente en el desarrollo del estudio son la masa del electrodo, la masa de la placa base, las dimensiones y el tiempo de duración del ensayo.

Los datos obtenidos junto con los que se obtienen al final de los ensayos sirven para el cálculo de los coeficientes de desgaste, esto debido a que el indicador principal en este tipo de ensayos es la variación de masa que a su vez es la diferencia entre la masa inicial y la final.

Estos datos pueden ser obtenidos de distinta manera, pero para este caso se utilizaron equipos como son: una balanza electrónica, un calibrador pie de rey y un cronómetro.



Figura 4. 6. Medición de los electrodos



Fuente: Autor


Para evitar inconvenientes y confusiones con los datos cada electrodo se asoció con una placa siguiendo una numeración específica. En las fichas que se muestran a continuación se pueden observar los datos iniciales obtenidos de cada electrodo y placa base:

Ficha 4. 6 Datos de la medición y pesaje inicial (electrodos)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 					
Medición y pesaje inicial de los electrodos					
Electrodos de sección circular					Detalle Referencial 
Probetas	Material	Diámetro	Longitud	Peso	
1	Cobre	19,05 mm	46,1 mm	115,8 gr	
2	Cobre	19,05 mm	46,3 mm	116,4 gr	
3	Cobre	19,05 mm	45,9 mm	115,2 gr	
4	Grafito	19,05 mm	47 mm	23 gr	
5	Grafito	19,05 mm	46,8 mm	22,7 gr	
6	Grafito	19,05 mm	46,5 mm	22,5 gr	
Electrodos de sección cuadrada					
Probetas	Material	Sección	Longitud	Peso	
7	Cobre	19,05x19,05mm	50,2mm	161,7 gr	
8	Cobre	19,05x19,05mm	49,8 mm	160,4 gr	
9	Cobre	19,05x19,05mm	50,5 mm	162,5 gr	
10	Grafito	19,05x19,05mm	50,8 mm	32,6 gr	
11	Grafito	19,05x19,05mm	50,6 mm	32,2 gr	
12	Grafito	19,05x19,05mm	50,9 mm	32,7 gr	
Observaciones: Las longitudes pueden variar ± 1 mm de lo establecido en el diseño debido al proceso de rectificación de la cara superior del electrodo.					

Ficha 4. 7 Datos de la medición y pesaje inicial (placas de material base)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
Medición y pesaje inicial de las placas			
Placa de micro fundición de aluminio			
Probetas	Material	Dimensiones	Peso
1	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	163,1 gr
2	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	166 gr
3	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	161,3 gr
4	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	162,5 gr
5	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	162,8 gr
6	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	162,5 gr
7	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	163,2 gr
8	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	162,9 gr
9	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	161,3 gr
10	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	162,3 gr
11	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	163,1 gr
12	Micro fundición de Aluminio	77x60x13 mm	161,9 gr



Observaciones: Las placas se adquirieron directamente del proveedor DAVICOM CIA. LTDA., la variación del peso se da debido eliminación de rebabas.

4.1.5 PREPARACIÓN DE LA MÁQUINA

La máquina utilizada para la realización de los ensayos fue la Chevalier DM-540 para electroerosión por penetración, cuyos datos técnicos se los puede observar en el Anexo 4.



Figura 4. 7. Máquina para electroerosión por penetración CHEVALIER DM- 540.

Fuente: [22]

Inicialmente la máquina requirió de un proceso de mantenimiento para lo cual se realizó una limpieza general puesto que las impurezas pueden acumularse y formar efectos no deseados tanto en el electrodo como en la pieza.

4.1.5.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

La máquina utilizada para los ensayos requiere del ingreso de ciertos parámetros como son el amperaje, tiempo de pausa, tiempo de duración del ciclo, tiempo de impulso y el GAP.



Figura 4. 8. Tablero de control de la máquina CHEVALIER DM- 540.

Fuente: [22]

En base a manuales de operación de máquinas para electroerosión por penetración, los parámetros óptimos, en lo que se refiere a tiempos, para el funcionamiento y para la obtención de un buen acabado superficial deben ser valores medios, esto debido a que valores demasiado altos provocarían un impulso en cortocircuito y por otra parte valores demasiado bajos un impulso en vacío [23].

En cuanto al amperaje los valores recomendados dependen del material, debido a que en este caso se trabajó con microfundición de aluminio los valores recomendados son [24]:

- Desbaste: 5- 7 Amperios
- Acabado: 0,5 - 2 Amperios

Otro aspecto a tomar en cuenta para selección del amperaje es la rugosidad superficial a obtener. El rango de rugosidades aceptables va de 1,6 a 6,3. Con la información recolectada se realizaron varias pruebas demostrando que la mejor opción para el amperaje es de 5 amperios para desbaste y 1 amperio para el acabado, obteniendo una rugosidad superficial entre 2,6 y 2,8 [25].

En cuanto a lo que se refiere al acabado, según el manual de operación de la máquina Chevalier DM-540 y a ensayos previos realizados, se recomienda que se lo realice a 0.25 mm, debido a que si la distancia es mayor se corre el riesgo de que el material removido se acumule entre el electrodo y la pieza provocando la formación de irregularidades en la superficie del electrodo o a su vez se extienda demasiado el tiempo del proceso y la pieza se queme.

Debido a que la investigación también se trata de una comparación del desgaste entre electrodos, los parámetros deben ser los mismos tanto para cobre como para grafito. Teniendo en cuenta lo anterior y con las recomendaciones mencionadas se seleccionaron los parámetros que se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1. Parámetros de mecanizado para electroerosión por penetración

Parámetros de la máquina		
	Desbaste	Acabado
Amperaje (A)	5	1
Tiempo de pausa (seg.)	3	3
Tiempo de duración del ciclo (seg.)	12	6
Tiempo de impulso (seg.)	9	3
GAP (mm)	0.05	0.05
	1.75	
Profundidad de desbaste (mm)	3.75	0.25
	5.75	

Fuente: Autor

4.1.5.2 FLUIDO DIELECTRICO

La máquina con la que se realizaron los ensayos puede utilizar como fluido tanto aceite dieléctrico como diésel, esto debido a que el diésel posee propiedades que son favorables para este proceso, como son su densidad y punto de inflamación. Teniendo en cuenta esto y la facilidad de adquisición se optó por utilizar diésel como fluido dieléctrico.

4.1.6 PESAJE Y MEDICIÓN FINAL

Una vez realizado los ensayos con los parámetros mencionados, se recolectaron los datos de la misma manera que se realizó en el apartado 4.1.4, a primera vista se observó una variación en la masa y longitud de las probetas.

Los datos obtenidos una vez realizados los ensayos se encuentran tabulados en las fichas 4.8 y 4.9 que se muestran a continuación:

Ficha 4. 8 Datos de la medición final de los electrodos

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 					
Medición y pesaje final de los electrodos					
Electrodos de sección circular					
Probetas	Material	Profundidad de desbaste (mm)	T (min)	m ₁ (gr)	m ₂ (gr)
1	Cobre	2	8,866	115,8	115
2	Cobre	4	46,35	116,4	115,7
3	Cobre	6	48,083	115,2	114,5
4	Grafito	2	8,55	23	22,94
5	Grafito	4	23,816	22,7	22,65
6	Grafito	6	32,7	22,5	22,46
Electrodos de sección cuadrada					
Probetas	Material	Profundidad de desbaste (mm)	T (min)	m ₁ (gr)	m ₂ (gr)
7	Cobre	2	21,783	161,7	160,7
8	Cobre	4	40,416	160,4	159,3
9	Cobre	6	52,75	162,5	161,4
10	Grafito	2	16,6	32,6	31,79
11	Grafito	4	30,783	32,2	31,41
12	Grafito	6	40,116	32,7	32,39
Observaciones: El grafito debido a su porosidad absorbe diésel, por esta razón se realizaron ensayos previos para determinar el porcentaje del peso que corresponde al diésel absorbido.					
T: Tiempo de duración del ensayo (min) m ₁ : Masa inicial de la probeta (gr) m ₂ : Masa final de la probeta (gr)					
Para el caso del grafito la masa de diésel absorbido corresponde al 4.629% de la masa inicial.					

Ficha 4. 9 Datos de la medición final de las placas de material base

 <p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p> 					
Medición y pesaje final de las placas					
Placa de micro fundición de aluminio					
Probetas	Material	Profundidad de desbaste (mm)	T (min)	m₁ (gr)	m₂ (gr)
1	Micro fundición de Aluminio	2	8,866	163,1	160,5
2	Micro fundición de Aluminio	4	46,35	166	161,9
3	Micro fundición de Aluminio	6	48,083	161,3	155,4
4	Micro fundición de Aluminio	2	8,55	162,5	160
5	Micro fundición de Aluminio	4	23,816	162,8	158,5
6	Micro fundición de Aluminio	6	32,7	162,5	156,6
7	Micro fundición de Aluminio	2	21,783	163,2	159,9
8	Micro fundición de Aluminio	4	40,416	162,9	157,9
9	Micro fundición de Aluminio	6	52,75	163,3	155
10	Micro fundición de Aluminio	2	16,6	162,3	159,7
11	Micro fundición de Aluminio	4	30,783	163,1	157,7
12	Micro fundición de Aluminio	6	40,116	161,9	154,6
Observaciones:					
<p>T: Tiempo de duración del ensayo (min.) m1: Masa inicial de la placa (gr) m2: Masa final de la placa (gr)</p>					

4.1.7 COEFICIENTES DE DESGASTE

Con los datos obtenidos de los ensayos se nota como en efecto el peso de cada probeta ha disminuido, demostrando que no es la pieza la única que presenta pérdida de material, sino que a su vez el electrodo también disminuye su masa debido al proceso de electroerosión.

Los coeficientes que se determinan a continuación permiten observar de manera concreta como se ha producido el desgaste.

4.1.7.1 DESGASTE VOLUMÉTRICO DE LA HERRAMIENTA

Como ya se ha dicho anteriormente, el desgaste volumétrico de la herramienta (TW) relaciona directamente el volumen de material perdido por la herramienta (electrodo) con el tiempo de duración del ensayo, para el cálculo de estos valores se utilizó la ecuación Ec. 2.3.

$$TW = \frac{V_1}{t} \left[\frac{mm^3}{min} \right]$$

Con esta ecuación se obtuvo valores de TW para cada ensayo es decir se obtienen 12 datos de desgaste volumétrico los cuales nos indican como se produjo la pérdida de material del electrodo debido al proceso de erosión en términos de volumen por unidad de tiempo.

Para este caso V_1 se lo obtuvo multiplicando el valor de la masa pérdida por el electrodo y la densidad del mismo, teniendo en cuenta que para cada caso existirá una variación de acuerdo al material, puesto que se utilizó cobre y grafito.

En la ficha 4.10, que se muestra a continuación, se puede apreciar cómo varía este coeficiente para cada electrodo:

Ficha 4. 10 Valores del desgaste volumétrico

 						
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
Desgaste volumétrico de la herramienta						
Electrodos de sección circular						
Probetas	Material	Profundidad de desbaste (mm)	T (min)	m ₁ (gr)	m ₂ (gr)	TW (mm ³ /min)
1	Cobre	2	8,866	115,8	115	10,24
2	Cobre	4	46,35	116,4	115,7	1,71
3	Cobre	6	48,083	115,2	114,5	1,65
4	Grafito	2	8,55	23	22,94	4,26
5	Grafito	4	23,816	22,7	22,65	1,20
6	Grafito	6	32,7	22,5	22,46	0,72
Electrodos de sección cuadrada						
Probetas	Material	Profundidad de desbaste (mm)	T (min)	m ₁ (gr)	m ₂ (gr)	TW (mm ³ /min)
7	Cobre	2	21,783	161,7	160,7	5,21
8	Cobre	4	40,416	160,4	159,3	3,09
9	Cobre	6	52,75	162,5	161,4	2,37
10	Grafito	2	16,6	32,6	31,79	27,39
11	Grafito	4	30,783	32,2	31,41	14,43
12	Grafito	6	40,116	32,7	32,39	4,39

T: Tiempo de duración del ensayo (min)
 m₁: Masa inicial de la probeta (gr)
 m₂: Masa final de la probeta (gr)
 TW: Desgaste volumétrico de la herramienta (mm³/min)

4.1.7.2 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL

Este es otro de los parámetros que ayuda apreciar el desgaste mostrando la tasa volumétrica de eliminación del material (MRR), es decir la cantidad volumétrica de material arrancado de la pieza por unidad de tiempo, para lo cual se utilizó la Ec. 2.6.

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

Es importante recordar que el valor de V_2 se lo obtiene multiplicando la densidad del material base, es decir el aluminio, por la masa de material perdido. Para este caso la densidad no varía puesto que es aluminio para cada ensayo.

Los datos para los valores de la tasa de eliminación de material para cada ensayo se muestran en la ficha 4.11.

Ficha 4. 11 Tasa de eliminación de material

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 						
Tasa de eliminación de material						
Electrodos de sección circular						
Probetas	Material	Profundidad de desbaste (mm)	T (min)	m₁ (gr)	m₂ (gr)	MRR (mm³/min)
1	Cobre	2	8,866	115,8	115	108,61
2	Cobre	4	46,35	116,4	115,7	32,76
3	Cobre	6	48,083	115,2	114,5	45,45
4	Grafito	2	8,55	23	22,94	108,30
5	Grafito	4	23,816	22,7	22,65	66,87
6	Grafito	6	32,7	22,5	22,46	66,83
Electrodos de sección cuadrada						
Probetas	Material	Profundidad de desbaste (mm)	T (min)	m₁ (gr)	m₂ (gr)	MRR (mm³/min)
7	Cobre	2	21,783	161,7	160,7	56,11
8	Cobre	4	40,416	160,4	159,3	45,82
9	Cobre	6	52,75	162,5	161,4	58,28
10	Grafito	2	16,6	32,6	31,79	58,01
11	Grafito	4	30,783	32,2	31,41	64,97
12	Grafito	6	40,116	32,7	32,39	67,31
<p>T: Tiempo de duración del ensayo (min) m₁: Masa inicial de la probeta (gr) m₂: Masa final de la probeta (gr) MRR: Tasa de eliminación de material (mm³/min)</p>						

4.1.7.2 COEFICIENTE DE DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

Este coeficiente está determinado tanto por el volumen de material perdido por el electrodo como por el perdido por la pieza, de manera que el resultado es un valor porcentual con el cual se podrá comparar el desgaste entre los diferentes materiales, para esto se utilizó la Ec. 2.9

$$TWR = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \%$$

Aplicando la ecuación anterior se obtienen los valores mostrados en la ficha 4.12.

Ficha 4. 12 Coeficiente de desgaste de la herramienta

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 						
Coeficiente de desgaste de la herramienta						
Electrodos de sección circular						
Probetas	Material	Profundidad de desgaste (mm)	T (min)	m ₁ (gr)	m ₂ (gr)	TWR (%)
1	Cobre	2	8,866	115,8	115	9,43
2	Cobre	4	46,35	116,4	115,7	5,23
3	Cobre	6	48,083	115,2	114,5	3,64
4	Grafito	2	8,55	23	22,94	3,93
5	Grafito	4	23,816	22,7	22,65	1,80
6	Grafito	6	32,7	22,5	22,46	1,07
Electrodos de sección cuadrada						
Probetas	Material	Profundidad de desgaste (mm)	T (min)	m ₁ (gr)	m ₂ (gr)	TWR (%)
7	Cobre	2	21,783	161,7	160,7	9,29
8	Cobre	4	40,416	160,4	159,3	6,74
9	Cobre	6	52,75	162,5	161,4	4,06
10	Grafito	2	16,6	32,6	31,79	47,21
11	Grafito	4	30,783	32,2	31,41	22,21
12	Grafito	6	40,116	32,7	32,39	6,52
<p>T: Tiempo de duración del ensayo (min) m₁: Masa inicial de la probeta (gr) m₂: Masa final de la probeta (gr) TWR: Coeficiente de desgaste de la herramienta (%)</p>						

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.2.1 PÉRDIDA DE MASA

La masa en cada electrodo muestra una variación que no solo se asocia a su material sino también a la geometría del mismo y a la profundidad de mecanizado.

Para poder analizar lo ocurrido con la masa durante la exposición a la erosión se tabularon los datos de tal manera que fuera posible realizar una comparación entre lo ocurrido para cada geometría, esto se lo realizó independientemente para cada material.

4.2.1.2 PÉRDIDA DE MASA EN EL COBRE

De los ensayos realizados y como se muestra en las fichas anteriores se recolectaron 6 datos para cada material. Para el caso del cobre los datos referentes a la pérdida de masa, profundidad de penetración del electrodo y tiempo de duración de los ensayos son los mostrados en la tabla 4.2, a partir de los cuales se realiza la comparación respectiva.

Tabla 4. 2. Valores de la masa perdida por los electrodos de cobre

Sección	Tiempo de mecanizado (min)	$m_2 - m_1$ (gr)	Profundidad de penetración (mm)
Redonda	8,866	0,80	2
	46,35	0,70	4
	48,083	0,70	6
Cuadrada	21,783	1,00	2
	40,416	1,10	4
	52,75	1,10	6

Fuente: Autor

En las siguientes figuras se muestra el cambio que sufrió la masa en cada geometría para el caso del cobre:

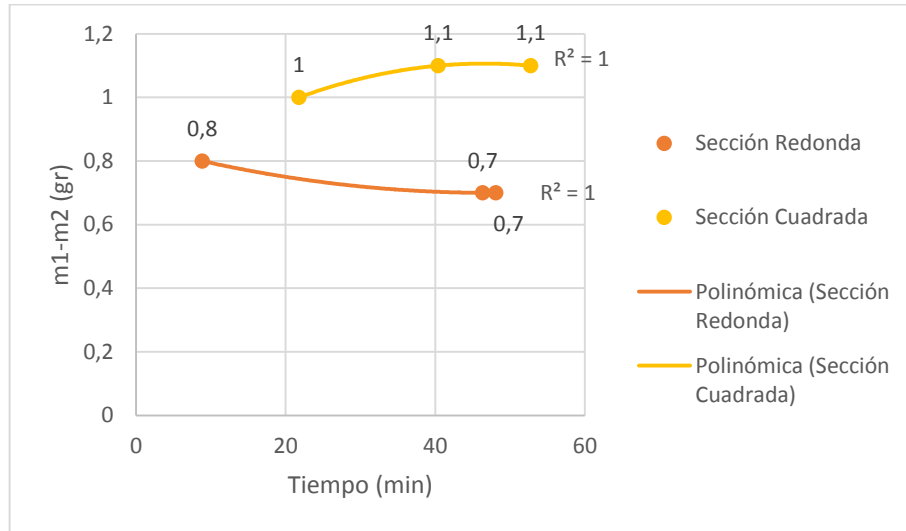


Figura 4. 9. Pérdida de masa con respecto al tiempo (cobre)
Fuente: Autor

Como se puede observar en la figura 4.9 los electrodos de sección cuadrada tienden a perder mayor masa mientras el tiempo de exposición a la erosión incrementa, por otro lado los electrodos de sección redonda tienen una mayor estabilidad al incrementar el tiempo de exposición, es decir al incrementarse el tiempo la pérdida de masa empieza a ser menor y casi uniforme.

Puesto que los ensayos se realizaron bajo las mismas condiciones podemos observar que al realizar un mecanizado por electroerosión el tiempo para el caso de electrodos de cobre de sección cuadrada es mayor y la cantidad de masa pérdida incrementa, por otro lado los electrodos de sección redonda realizan el mecanizado en un menor tiempo y presentan una pérdida menor en su masa.

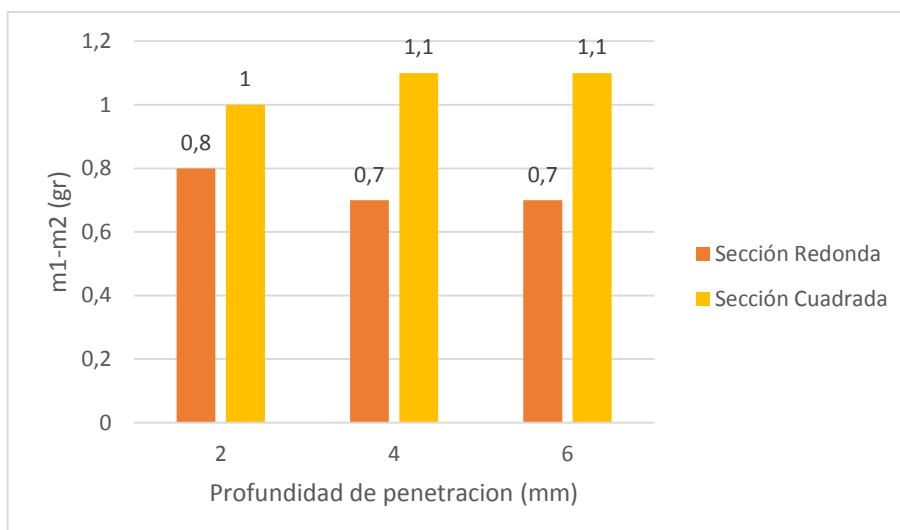


Figura 4. 10. Pérdida de masa con respecto a la profundidad de penetración (cobre)
Fuente: Autor

Con respecto a la profundidad de mecanizado se puede observar en la figura 4.10 que los electrodos de sección redonda pierden menor masa tanto en profundidades menores como en mayores. Con los electrodos de sección cuadrada pasa algo similar pero estos en comparación con los de sección redonda sufren una pérdida mayor de masa.

4.2.1.3 PÉRDIDA DE MASA EN EL GRAFITO

Al igual que en el caso del cobre, para el grafito también se agruparon los valores de la diferencia de masa y el tiempo, de tal manera que se pudiera analizar lo ocurrido, para esto tenemos los siguientes datos:

Tabla 4. 3. Valores de la masa perdida por los electrodos de grafito

Sección	Tiempo de mecanizado (min)	$m_2 - m_1$ (gr)	Profundidad de penetración (mm)
Redonda	8,55	0,06	2
	23,816	0,05	4
	32,7	0,04	6
Cuadrada	16,6	0,81	2
	30,783	0,79	4
	40,166	0,31	6

Fuente: Autor

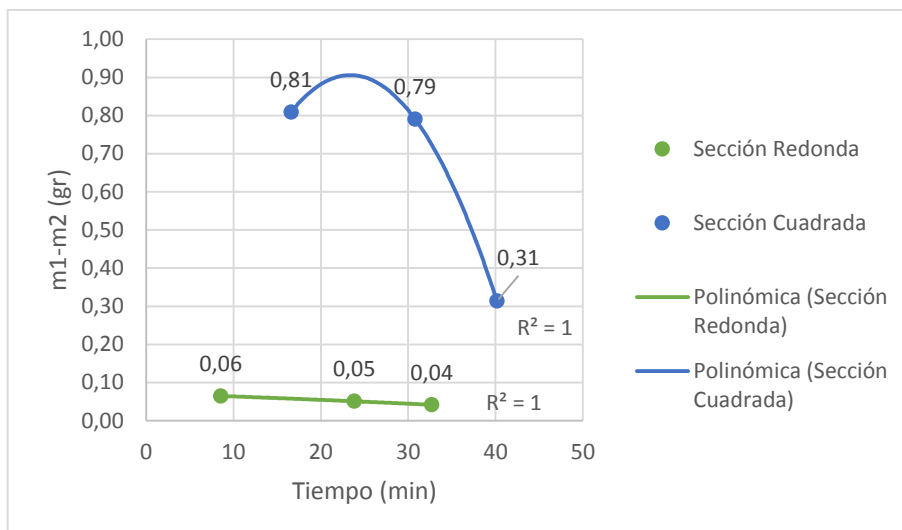


Figura 4. 11. Pérdida de masa con respecto al tiempo (grafito)

Fuente: Autor

En la figura 4.11 se observa que de manera similar en los electrodos de sección cuadrada existe una mayor pérdida de masa que en los de sección redonda y de igual manera provocan que el tiempo de mecanizado aumente, estos tienden a disminuir la cantidad de masa pérdida al incrementarse el tiempo de erosión.

Los electrodos de sección redonda al igual que en el caso del cobre, presentan una mayor estabilidad y realizan el mecanizado en un tiempo menor, a su vez también se observa que estos pierden menor masa al exponerse mayor tiempo a la erosión.

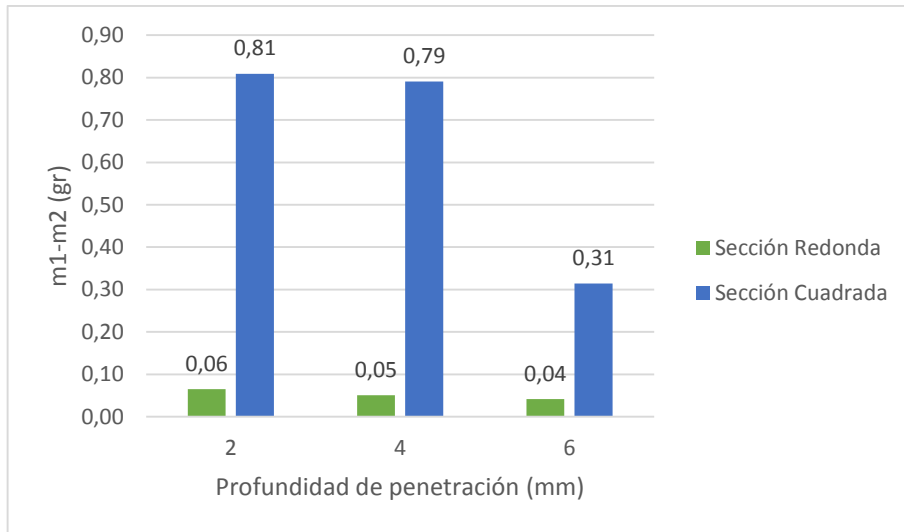


Figura 4. 12. Pérdida de masa con respecto a la profundidad de penetración (grafito)

Fuente: Autor

Como se muestra en la figura 4.12 la pérdida de masa va disminuyendo conforme se aumenta la profundidad de mecanizado pero se nota una gran diferencia entre las geometrías puesto que los electrodos que poseen sección cuadrada pierden una mayor cantidad de masa que los de sección redonda.

4.2.1.4 PÉRDIDA DE MASA EN EL GRAFITO Y COBRE

Anteriormente se realizó una comparación entre geometrías, pero el análisis también trata sobre lo que ocurre y la diferencia entre los dos materiales, para lo cual a continuación se presenta una gráfica global de la masa pérdida, comparando los electrodos de diferentes materiales para cada geometría.

En las figuras 4.13 y 4.14 que se muestran a continuación se puede observar la pérdida de masa en los electrodos de sección redonda para cada material con respecto al tiempo de mecanizado.

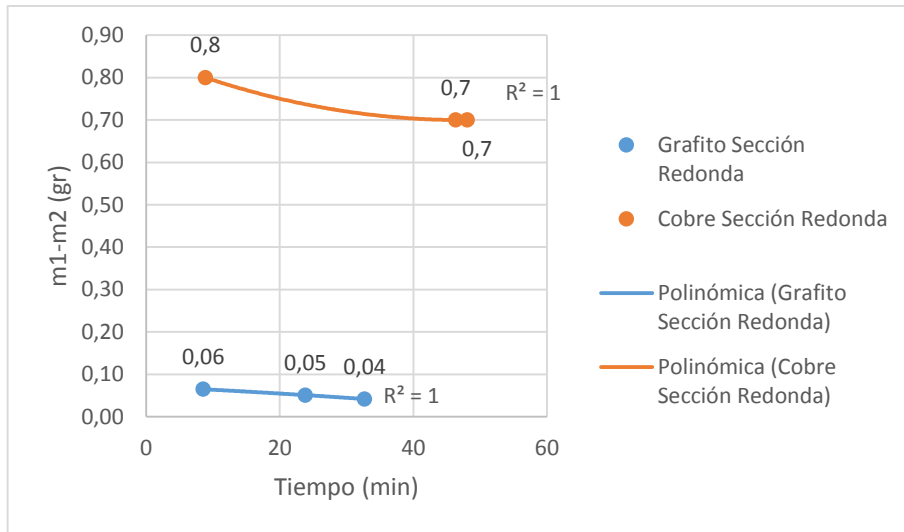


Figura 4. 13. Pérdida de masa con respecto al tiempo en electrodos de grafito y cobre (sección redonda)

Fuente: Autor

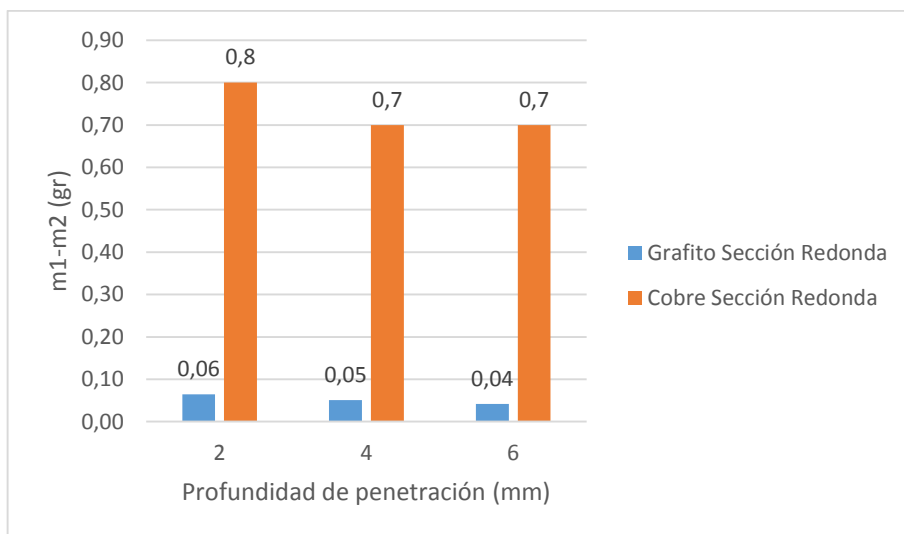


Figura 4. 14. Pérdida de masa con respecto a la profundidad de penetración en electrodos de grafito y cobre (sección redonda)

Fuente: Autor

En la figura 4.13 se observa que el grafito realizó el mecanizado en menor tiempo que el cobre y a su vez tiene una pérdida de masa menor, la cual se reduce si el tiempo de exposición al mecanizado incrementa, siendo similar lo que ocurre con el cobre, puesto que a pesar de perder mayor masa, también tiende a estabilizarse cuando el tiempo incrementa.

Demostrando que los electrodos de grafito, con respecto a la pérdida de masa, trabajan mejor que los de cobre al tratarse de secciones redondas, puesto que el electrodo perderá menor masa y realizara el mecanizado en menor tiempo.

Tomando en cuenta la profundidad de mecanizado como se observa en la figura 4.14, el cobre pierde mayor cantidad de masa, pero al aumentar la profundidad este reduce el desgaste. Por otro lado se observa que el grafito también reduce la pérdida de masa al incrementar la profundidad de penetración.

El mismo análisis se realizó para los electrodos de sección cuadrada, como se muestra en las figuras 4.15 y 4.16.

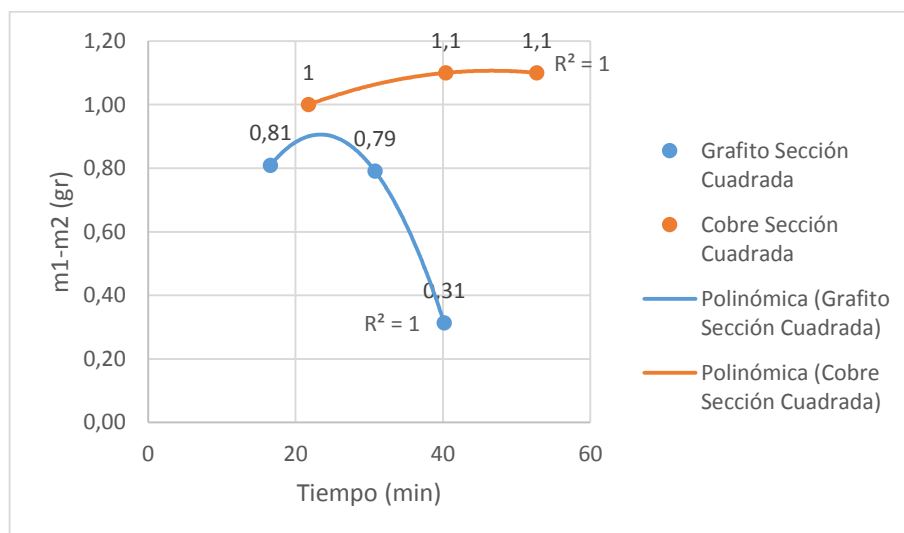


Figura 4. 15. Pérdida de masa con respecto al tiempo en electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)

Fuente: Autor

De la figura 4.15 se puede decir que, el cobre sufre una pérdida mayor de masa y el mecanizado lleva un tiempo mayor. Por otra parte el grafito también tiene una pérdida no tan alejada al inicio, la cual se reduce al aumentar el tiempo. Con esto se puede apreciar que si el mecanizado tuviera un tiempo mayor de duración la pérdida de masa con este tipo de electrodo sería mínima.

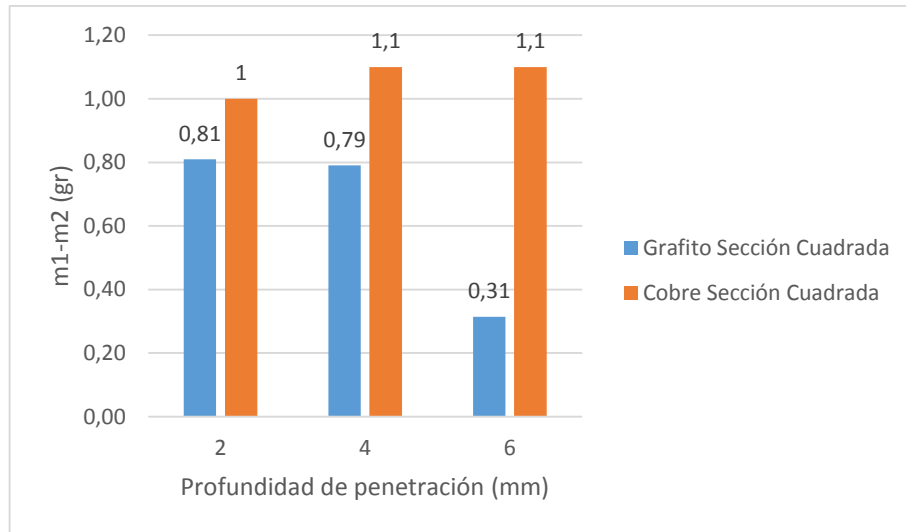


Figura 4. 16. Pérdida de masa con respecto a la profundidad de penetración en electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)

Fuente: Autor

Como se aprecia en la figura 4.16, en términos de pérdida de masa vemos que el cobre es el más afectado y si hablamos de la geometría los electrodos de sección cuadrada son los que tienden a perder una mayor cantidad de masa. Para los dos materiales la masa pérdida empieza a disminuir al aumentar la profundidad de penetración siendo el cobre el que tiene la mayor pérdida.

4.2.2 DESGASTE VOLUMÉTRICO DE LA HERRAMIENTA

Como se ha mencionado anteriormente el electrodo debido a la erosión sufre un desgaste el cual puede ser medido de manera volumétrica, esto representa la cantidad de volumen que pierde por unidad de tiempo, en este caso por minuto.

Para poder entender de mejor manera como se está comportando el desgaste, se realizó una comparación entre las geometrías para cada material y luego una entre los dos materiales como se muestra a continuación.

4.2.2.1 DESGASTE VOLUMÉTRICO EN ELECTRODOS DE GRAFITO

A partir de los datos obtenidos sobre el desgaste volumétrico se establecieron los datos que se muestran a continuación en la tabla 4.4, para el grafito.

Tabla 4. 4. Desgaste volumétrico de los electrodos de grafito

Sección	Tiempo de mecanizado (min)	TW (mm ³ /min)	Profundidad de penetración (mm)
Redonda	8,55	4,26	2
	23,816	1,20	4
	32,7	0,72	6
Cuadrada	16,6	27,39	2
	30,783	14,43	4
	40,166	4,39	6

Fuente: Autor

Para observar de una manera más representativa se realizaron las gráfica mostradas en las figuras 4.17 y 4.18, en las que se comparan los resultados para cada geometría de los electrodos de grafito con respecto al tiempo y a la profundidad de mecanizado.

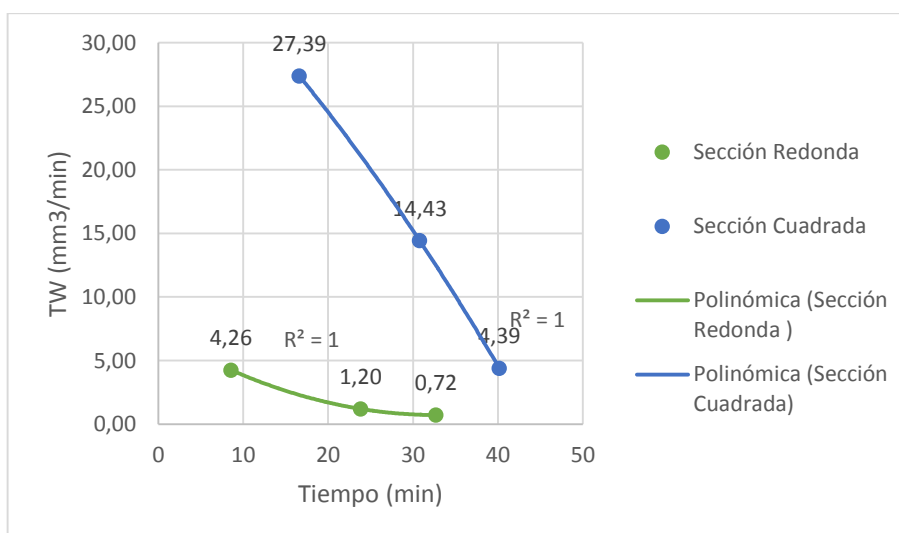


Figura 4. 17. Desgaste volumétrico de los electrodos con respecto al tiempo (grafito)

Fuente: Autor

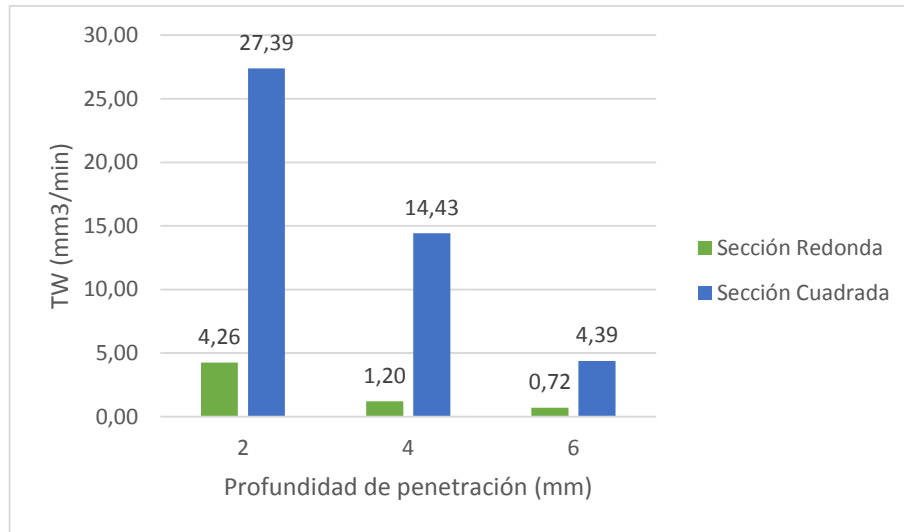


Figura 4. 18. Desgaste volumétrico de los electrodos con respecto a la profundidad de penetración (grafito)

Fuente: Autor

Como se puede observar en la figura 4.17 los electrodos de sección cuadrada poseen un mayor desgaste, el mismo que al aumentar el tiempo va disminuyendo, por otro lado los de sección redonda muestran una tendencia un poco más estable, pero que igual que los anteriores disminuye al aumentar el tiempo de erosión.

El comportamiento del desgaste con respecto a la profundidad de mecanizado se muestra en la figura 4.18, en donde se observa que, conforme aumenta la profundidad de penetración el desgaste disminuye pero la diferencia se encuentra en que los electrodos de sección cuadrada tienen mayor desgaste volumétrico que los de sección redonda.

En profundidades menores se nota un desgaste más brusco mostrando una diferencia significativa entre las diferentes geometrías. Los electrodos de sección cuadrada son los más afectados en profundidades menores, como en este caso a 2mm.

El desgaste volumétrico promedio para electrodos de grafito de sección redonda es $2.06 \text{ mm}^3/\text{min}$ y para electrodos de sección cuadrada es $15.4 \text{ mm}^3/\text{min}$.

4.2.2.2 DESGASTE VOLUMÉTRICO EN ELECTRODOS DE COBRE

En la tabla 4.5 se muestran los valores obtenidos del desgaste volumétrico para los electrodos de cobre.

Tabla 4. 5. Desgaste volumétrico de los electrodos de cobre

Sección	Tiempo de mecanizado (min)	TW (mm ³ /min)	Profundidad de penetración (mm)
Redonda	8,866	10,24	2
	46,35	1,71	4
	48,083	1,65	6
Cuadrada	21,783	5,21	2
	40,416	3,09	4
	52,75	2,37	6

Fuente: Autor

En la figura 4.19 se puede observar el desgaste con respecto al tiempo en electrodos de cobre de distinta geometría, de manera similar se observa en la figura 4.20 el desgaste con respecto a la profundidad de mecanizado.

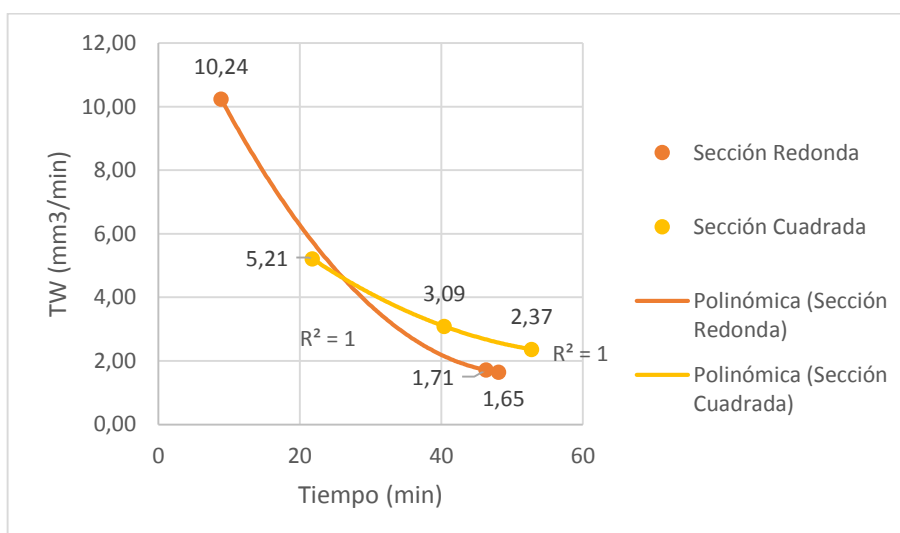


Figura 4. 19. Desgaste volumétrico de los electrodos con respecto al tiempo (cobre)

Fuente: Autor

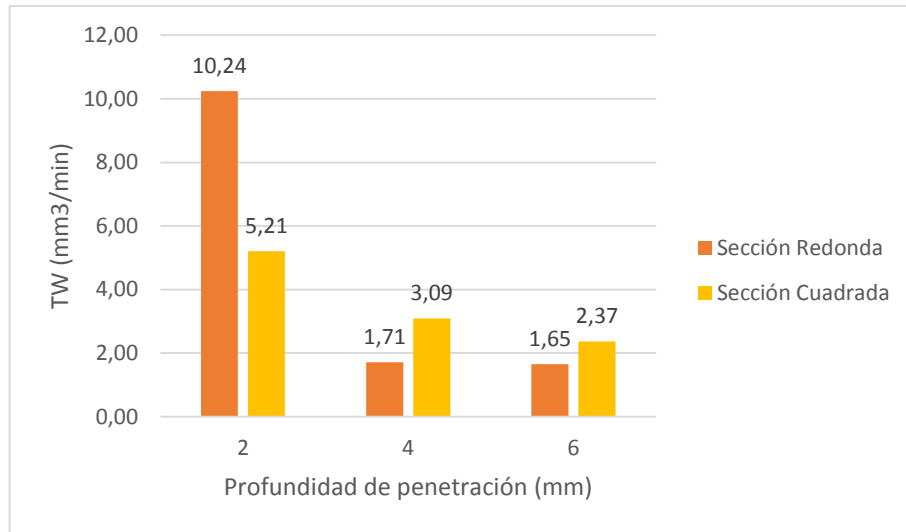


Figura 4. 20. Desgaste volumétrico de los electrodos con respecto a la profundidad de penetración (cobre)

Fuente: Autor

En las figuras 4.19 y 4.20 mostradas anteriormente se observa cómo afecta el desgaste a cada geometría de los electrodos de cobre. Los electrodos de sección redonda tienen un mayor valor de desgaste volumétrico a profundidades menores, pero al aumentar la profundidad este valor disminuye.

El desgaste volumétrico promedio para electrodos de cobre de sección redonda es $4.53 \text{ mm}^3/\text{min}$ y para electrodos de sección cuadrada es $3.55 \text{ mm}^3/\text{min}$.

4.2.2.3 DESGASTE VOLUMÉTRICO EN ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE

En los apartados anteriores se analizó el desgaste para cada material, debido a esto a continuación se muestra una comparación de los resultados de cada material relacionándolos por su geometría para lo cual en las figuras siguientes se muestran curvas que los representan.

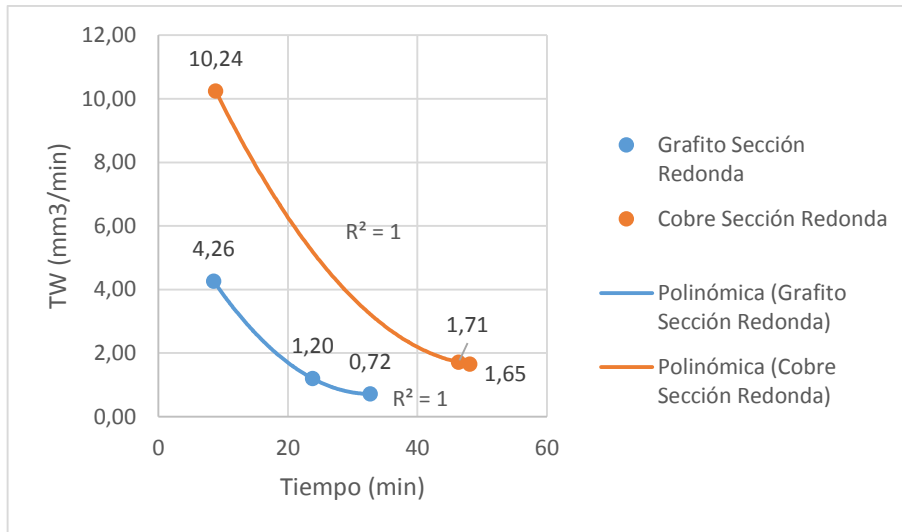


Figura 4. 21. Desgaste volumétrico con respecto al tiempo de los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)

Fuente: Autor

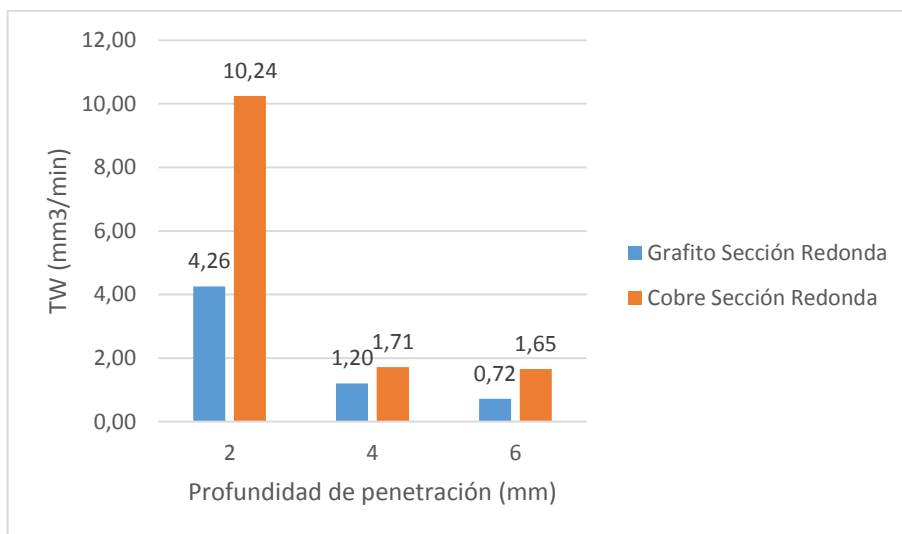


Figura 4. 22. Desgaste volumétrico con respecto a la profundidad de penetración de los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)

Fuente: Autor

En las figuras 4.21 y 4.22 se muestra el desgaste volumétrico de cada material para electrodos de sección redonda, de estas figuras se observa que los electrodos de cobre tienen un desgaste mayor y que a profundidades menores el desgaste es brusco por lo que se los hace adecuados para su uso en profundidades mayores, puesto que el desgaste se reduce considerablemente.

Para los dos materiales el desgaste se reduce al incrementar el tiempo de erosión, a mas de esto los electrodos de grafito de sección redonda trabajan de manera más eficiente a profundidades menores.

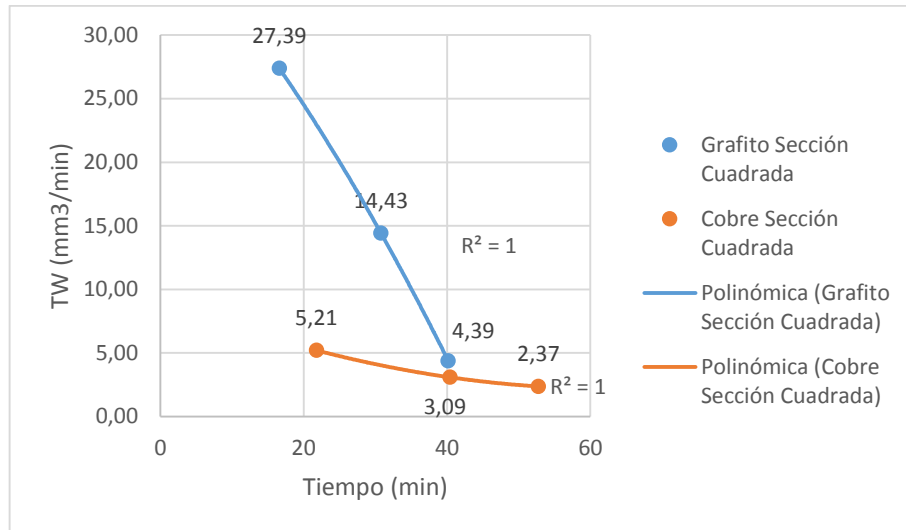


Figura 4. 23. Desgaste volumétrico con respecto al tiempo de los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)

Fuente: Autor

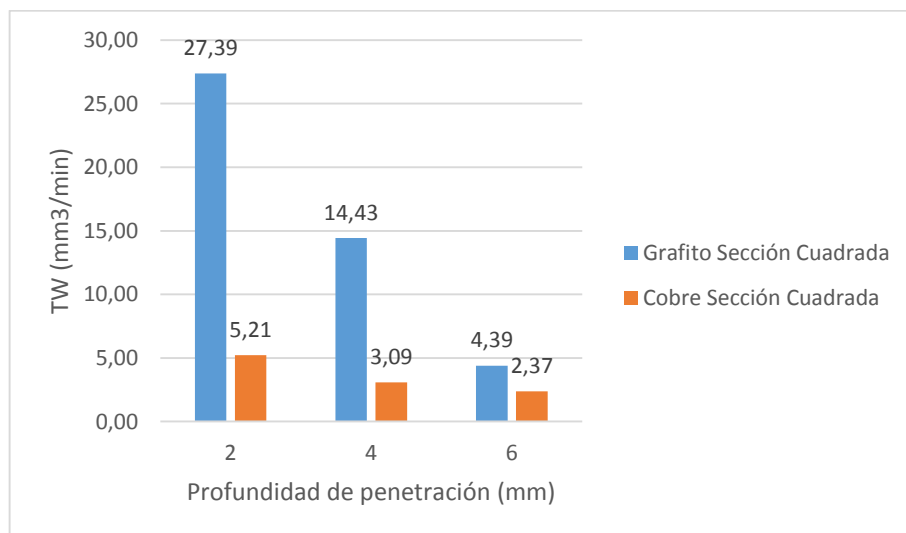


Figura 4. 24. Desgaste volumétrico con respecto a la profundidad de penetración de los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)

Fuente: Autor

En el caso de los electrodos de sección cuadrada se observa que el grafito es el material que posee un desgaste volumétrico mayor, a pesar de que anteriormente se mostró que este era el que menor masa perdía, pero debido a su densidad este material ocupa mayor volumen con una masa menor, de la figura 4.24 se puede observar que en este caso el grafito tuvo un desgaste brusco a profundidades menores, demostrando que para trabajar con secciones cuadradas la mejor opción es el cobre puesto que este muestra un desgaste menor y con mayor uniformidad.

4.2.3 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL

La tasa de eliminación del material nos indica la cantidad de material removido de la pieza por el electrodo, con lo cual se puede determinar qué tipo de electrodo realiza el mecanizado en menor tiempo.

4.2.3.1 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL EN ELECTRODOS DE GRAFITO

A partir de los datos calculados se obtuvo la tabla 4.6, la misma que se la utilizó para la realización de las gráficas que ayudaron a comparar los resultados.

Tabla 4. 6. Tasa de eliminación de material para los electrodos de grafito

Sección	Tiempo de mecanizado (min)	MRR (mm³/min)	Profundidad de penetración (mm)
Redonda	8,55	108,30	2
	23,816	66,87	4
	32,7	66,83	6
Cuadrada	16,6	58,01	2
	30,783	64,97	4
	40,166	67,31	6

Fuente: Autor

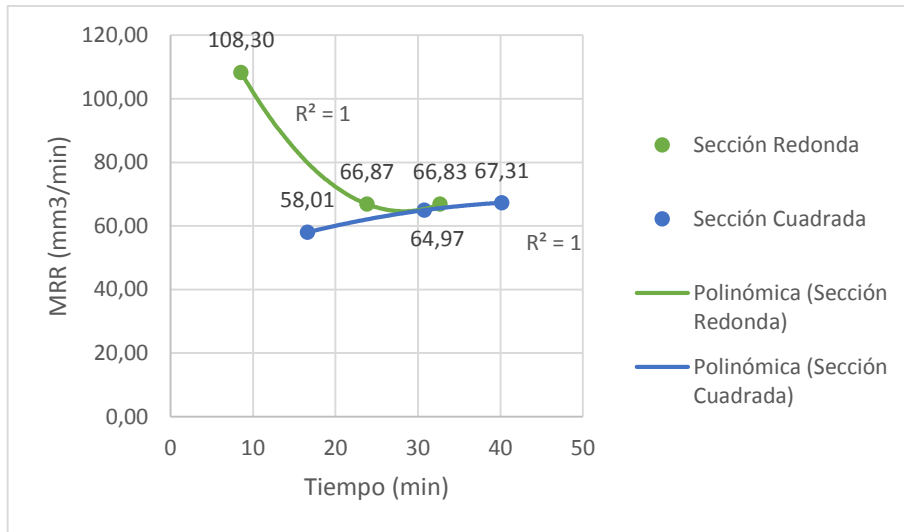


Figura 4. 25. Tasa de eliminación del material con respecto al tiempo (grafito)

Fuente: Autor

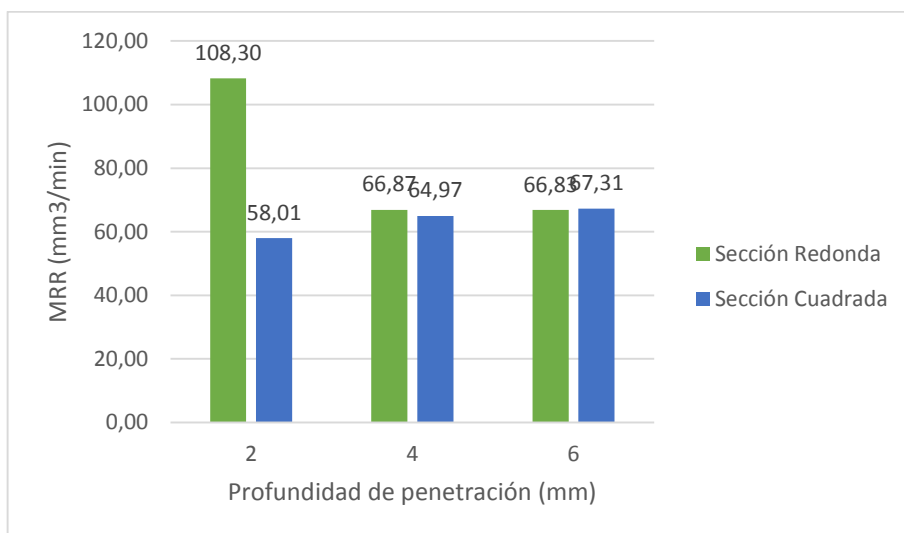


Figura 4. 26. Tasa de eliminación del material con respecto a la profundidad de penetración (grafito)

Fuente: Autor

Como se observa en las figuras 4.25 y 4.26 los electrodos de sección redonda tienen la mayor tasa de arranque de material por lo que este tipo de electrodos realizarán el mecanizado en menor tiempo, a pesar de esto la diferencia muestra mayor significancia cuando se trata de mecanizado a profundidades menores (2mm).

4.2.3.2 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL EN ELECTRODOS DE COBRE

Para el caso del cobre también se obtuvieron datos de la tasa de eliminación de material con respecto al tiempo de duración de los ensayos y a la profundidad de mecanizado como se muestra en la tabla 4.7.

Tabla 4. 7. Tasa de eliminación de material para los electrodos de cobre

Sección	Tiempo (min)	MRR (mm ³ /min)	Profundidad de penetración (mm)
Redonda	8,866	108,61	2
	46,35	32,76	4
	48,083	45,45	6
Cuadrada	21,783	56,11	2
	40,416	45,82	4
	52,75	58,28	6

Fuente: Autor

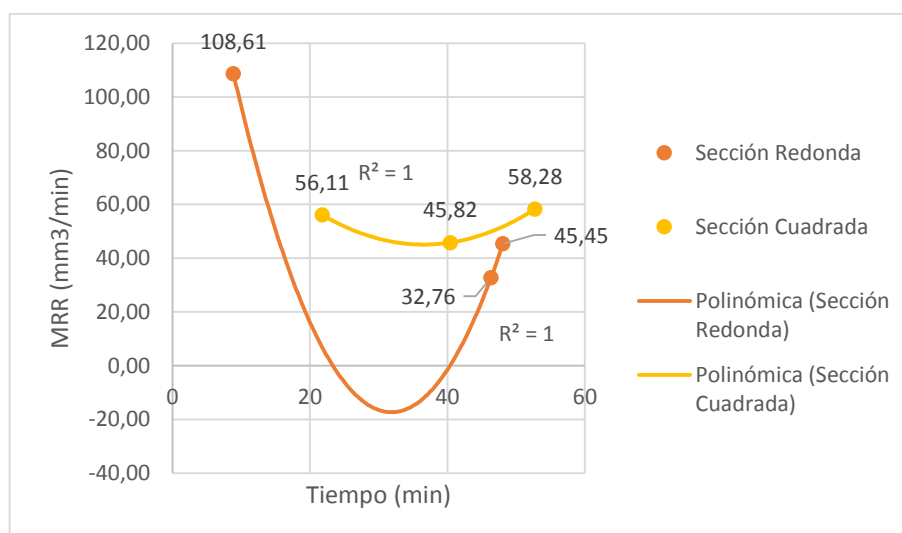


Figura 4. 27. Tasa de eliminación del material con respecto al tiempo (cobre)

Fuente: Autor

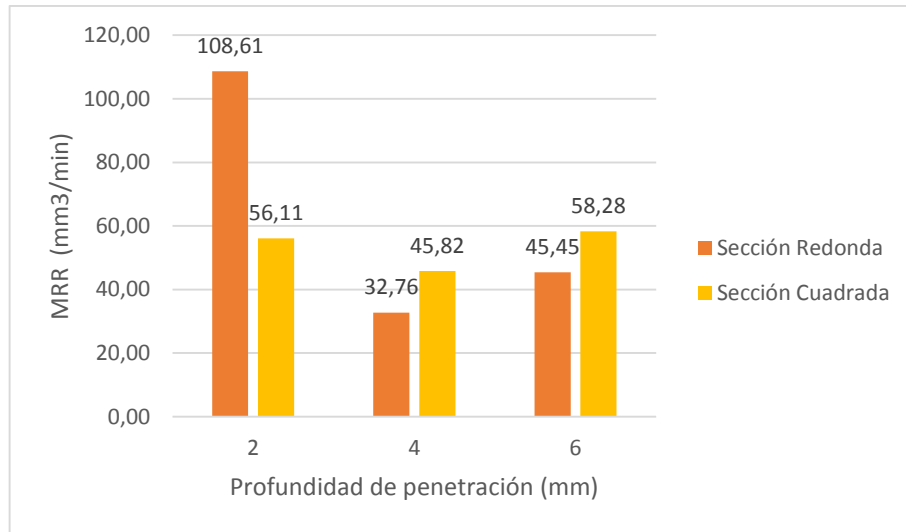


Figura 4. 28. Tasa de eliminación del material con respecto a la profundidad de penetración (cobre)

Fuente: Autor

Los resultados mostrados en las figuras 4.27 y 4.28 indican que contrario al grafito los electrodos de sección cuadrada permiten realizar el mecanizado en menor tiempo, a pesar de esto se observa que a menor profundidad la mejor opción siguen siendo los electrodos de sección redonda, puesto que tienen una tasa de eliminación de material mayor.

4.2.3.3 TASA DE ELIMINACIÓN DEL MATERIAL EN ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE

A continuación se muestran los resultados de tal manera que se puede observar la tasa de eliminación de material de los electrodos en los diferentes materiales de acuerdo a su geometría.

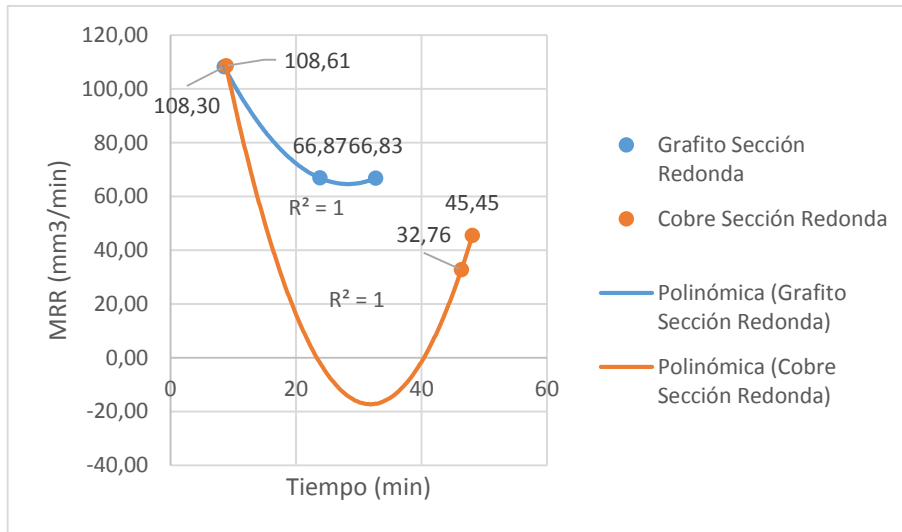


Figura 4. 29. Tasa de eliminación de material con respecto al tiempo en los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)

Fuente: Autor

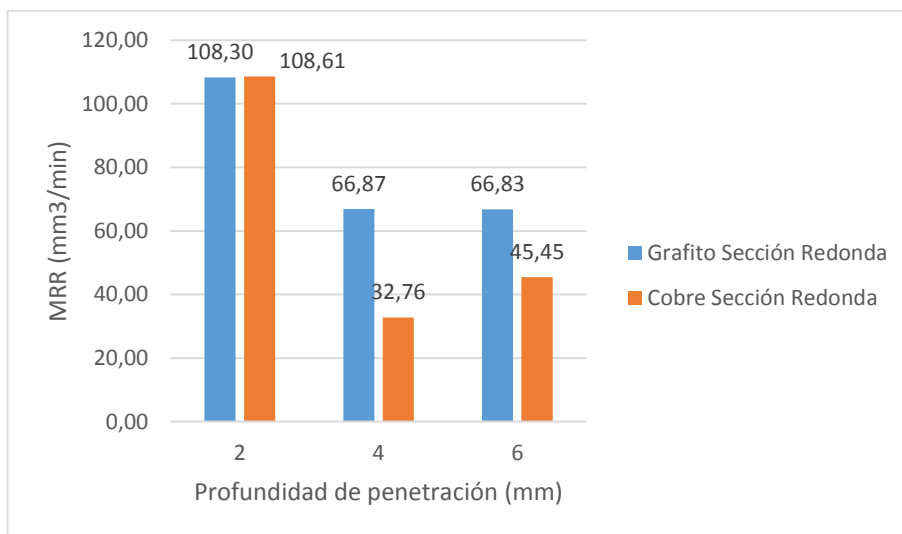


Figura 4. 30. Tasa de eliminación de material con respecto a la profundidad de penetración en los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)

Fuente: Autor

De las figuras 4.29 y 4.30 se puede decir que para el caso de geometrías de sección redonda el grafito permite que el mecanizado se realice en un tiempo menor puesto que la tasa de eliminación de material es mayor.

A más de lo mencionado anteriormente se puede observar que a la menor profundidad analizada (2 mm), el cobre presenta una leve superioridad en cuanto a la tasa de eliminación de material. En las figuras 4.31 y 4.32 se puede observar una comparación similar pero en esta caso se muestran los resultados para electrodos de sección cuadrada.

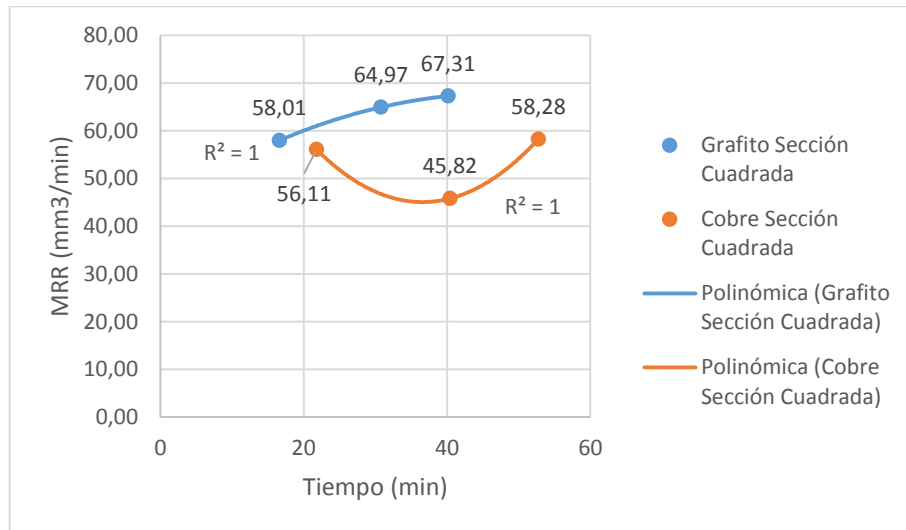


Figura 4. 31. Tasa de eliminación de material con respecto al tiempo en los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)

Fuente: Autor

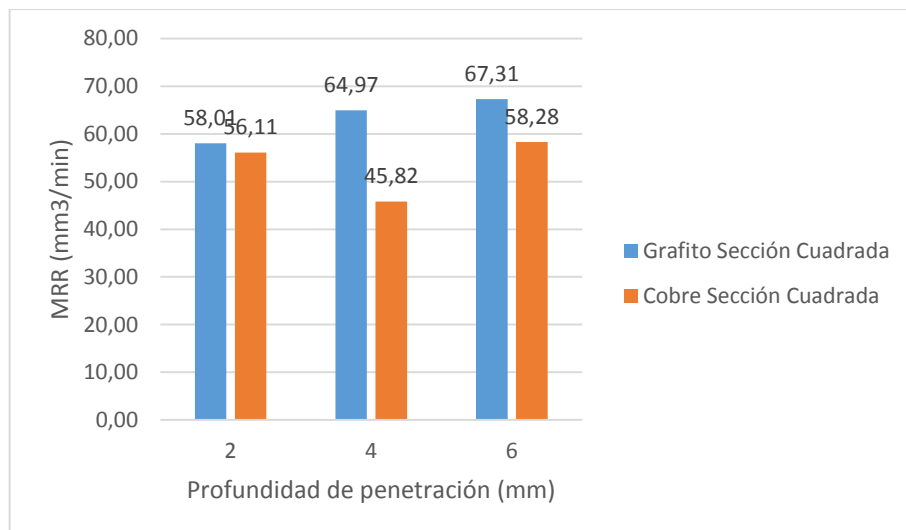


Figura 4. 32. Tasa de eliminación de material con respecto a la profundidad de penetración en los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)

Fuente: Autor

Para el caso de los electrodos con geometrías de sección cuadrada, se puede observar en las gráficas anteriores que el grafito presenta la mayor tasa de eliminación de material debido a esto, este material es el que permite realizar el mecanizado en menor tiempo.

De esta manera se observa que aunque la geometría varíe el tiempo de mecanizado será menor si se utiliza electrodos de grafito.

4.2.4 COEFICIENTE DE DESGASTE

El coeficiente de desgaste relaciona el volumen perdido por el electrodo con el volumen perdido por la pieza mecanizada, a partir de este coeficiente se determina que geometría y material sufre el mayor desgaste, al ser sometidos al proceso de electroerosión para mecanizado de partes de aluminio. De la misma manera que en los parámetros anteriores el análisis se lo realizó inicialmente entre geometrías de un mismo material y luego entre materiales de una misma geometría.

4.2.4.1 COEFICIENTE DE DESGASTE EN ELECTRODOS DE GRAFITO

Los valores medidos y calculados en apartados anteriores se agruparon en la tabla 4.8 que se muestra a continuación de tal manera que se pudo realizar gráficas para poder analizar el coeficiente de desgaste para cada geometría en los electrodos de grafito.

Tabla 4. 8. Valores del coeficiente de desgaste para los electrodos de grafito

Sección	Tiempo de mecanizado (min)	TWR (%)	Profundidad de penetración (mm)
Redonda	8,55	3,93	2
	23,816	1,80	4
	32,7	1,07	6
Cuadrada	16,6	47,21	2
	30,783	22,21	4
	40,166	6,52	6

Fuente: Autor

A partir de estos datos la figura 4.33 muestra una relación entre el coeficiente de desgaste y el tiempo para cada geometría y la figura 4.34 relaciona el coeficiente de desgaste con la profundidad de mecanizado para el caso de electrodos de grafito.

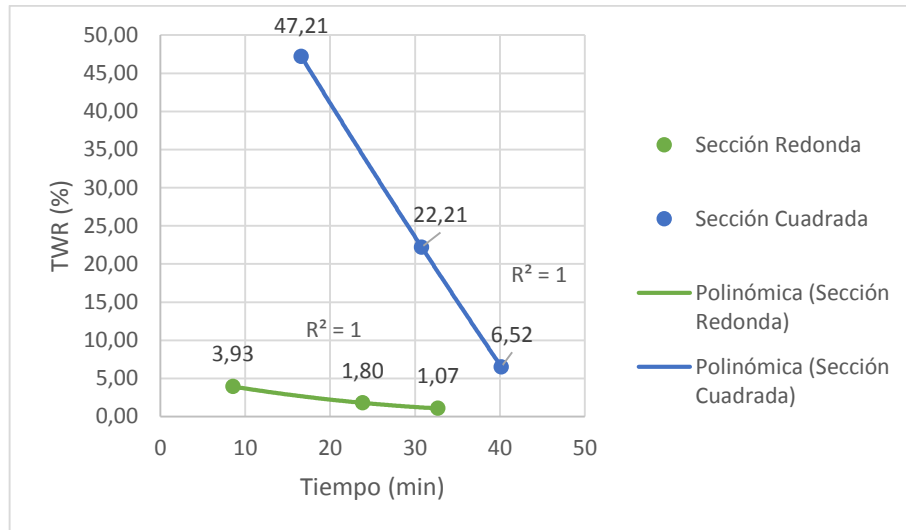


Figura 4. 33. Coeficiente de desgaste con respecto al tiempo (grafito)

Fuente: Autor

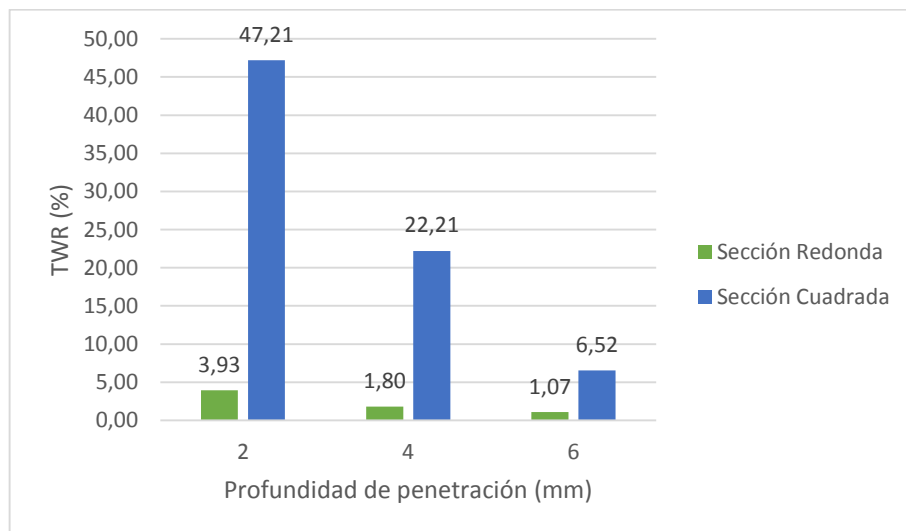


Figura 4. 34. Coeficiente de desgaste con respecto a la profundidad de penetración (grafito)

Fuente: Autor

Como se puede observar en las gráficas anteriores, para el caso del grafito los electrodos de sección cuadrada poseen el mayor coeficiente de desgaste, es decir los

electrodos de sección cuadrada perderán su forma con mayor rapidez que los de sección redonda puesto que la diferencia de desgaste es muy significativa.

Para el caso de los electrodos de grafito de sección redonda se tiene un valor del coeficiente de desgaste promedio de 2.26% y para los de sección cuadrada 25.31%.

Los electrodos de sección cuadrada se desgastan en valor promedio un 23.05% más que los de sección redonda y a su vez se observa que estos trabajan mejor que los de sección cuadrada tanto a profundidades menores como a mayores.

4.2.4.2 COEFICIENTE DE DESGASTE EN ELECTRODOS DE COBRE

Con los valores medidos y calculados para los electrodos de cobre se obtuvieron los datos de la tabla 4.9, a partir de los cuales se desarrollaron las gráficas para analizar el coeficiente de desgaste para cada geometría analizada de este material.

Tabla 4. 9. Valores del coeficiente de desgaste para los electrodos de cobre

Sección	Tiempo de mecanizado (min)	TWR (%)	Profundidad de penetración (mm)
Redonda	8,866	9,43	2
	46,35	5,23	4
	48,083	3,64	6
Cuadrada	21,783	9,29	2
	40,416	6,74	4
	52,75	4,06	6

Fuente: Autor

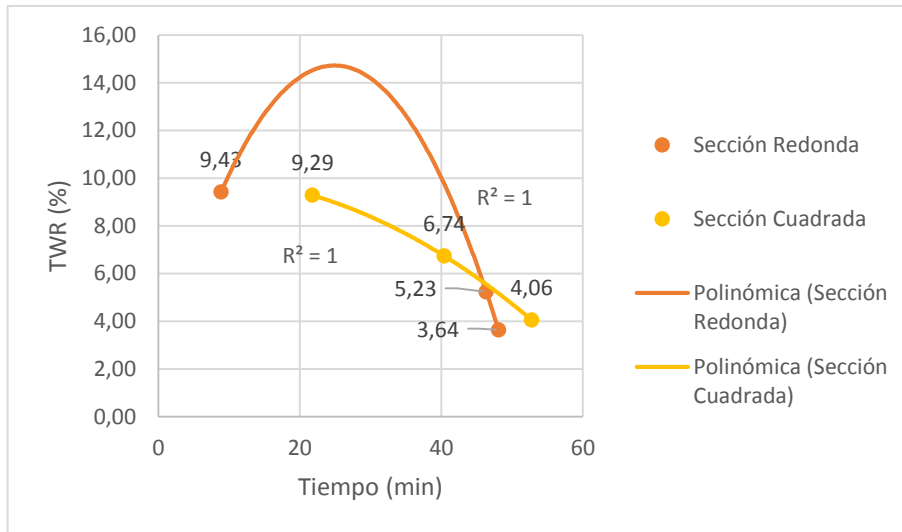


Figura 4. 35. Coeficiente de desgaste con respecto al tiempo (cobre)

Fuente: Autor

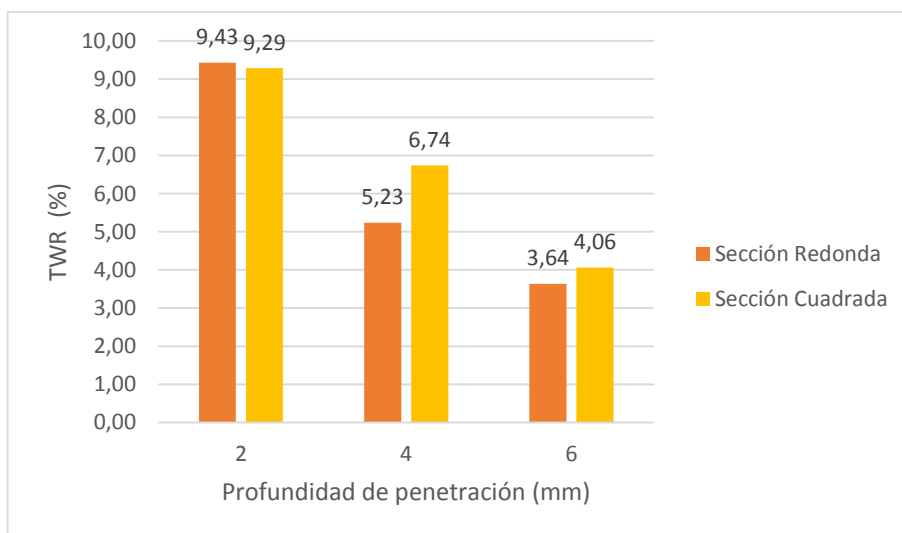


Figura 4. 36. Coeficiente de desgaste con respecto a la profundidad de penetración (cobre)

Fuente: Autor

En las figuras 4.35 y 4.36 se observan las gráficas del coeficiente de desgaste para los electrodos de cobre con respecto al tiempo de duración de los ensayos y a la profundidad de mecanizado respectivamente.

Para el caso del cobre se observa que la variación en el desgaste entre geometrías es menor comparada con la del grafito, pero aún así los electrodos de sección cuadrada

se desgastan más que los de sección cuadrada. Los electrodos de cobre de sección redonda se desgastan en valor promedio 6.1% y los de sección cuadrada 6.69%

Los electrodos de sección cuadrada se desgastan en valor promedio un 0.59 % más que los de sección redonda para el caso del cobre.

4.2.4.3 COEFICIENTE DE DESGASTE EN ELECTRODOS DE GRAFITO Y COBRE

Teniendo clara la diferencia del coeficiente de desgaste para cada geometría, a continuación se realiza una comparación entre los materiales con una misma geometría. En las figuras 4.37- 4.40 se muestra dicha comparación.

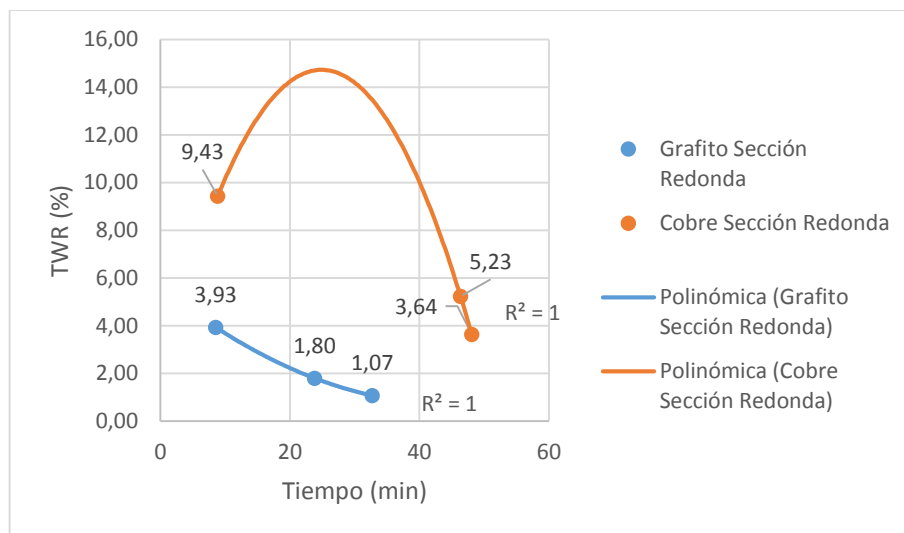


Figura 4. 37. Coeficiente de desgaste con respecto al tiempo en los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)

Fuente: Autor

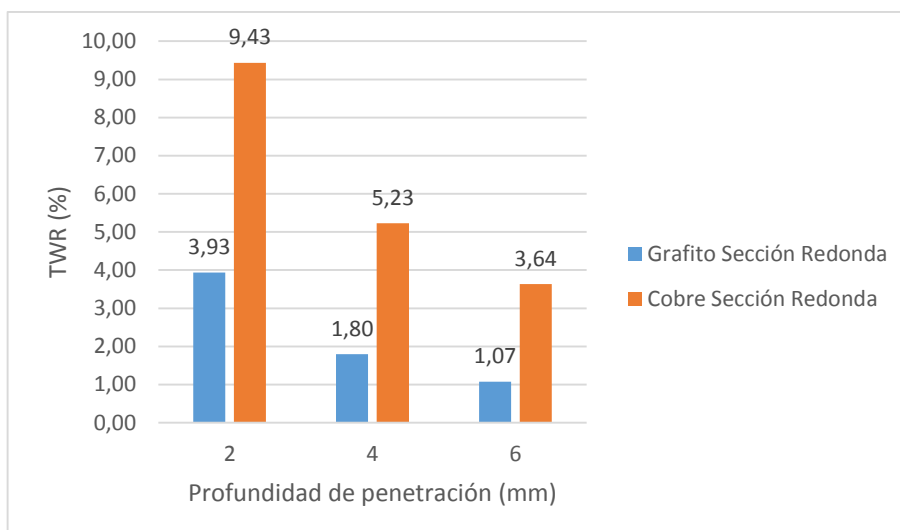


Figura 4. 38. Coeficiente de desgaste con respecto a la profundidad de penetración en los electrodos de grafito y cobre (sección redonda)

Fuente: Autor

En las figuras 4.37 y 4.38 se observa los coeficientes de desgaste con respecto al tiempo de duración de los ensayos y a la profundidad de mecanizado, respectivamente, tanto para el grafito como para el cobre. A partir de estas gráficas se puede decir que los electrodos de cobre de sección redonda se desgastan más que los de grafito, debido a que a la profundidad de 2mm el cobre presenta el desgaste mayor es recomendable utilizar electrodos de grafito de sección redonda para el mecanizado en profundidades pequeñas.

Los electrodos de cobre de sección redonda se desgastan en valor promedio un 3.84% más que los de grafito. El valor promedio de desgaste para los electrodos de grafito de sección redonda es 2.26% y para los electrodos de cobre de la misma geometría es 6.1%.

A continuación en la figura 4.39 y 4.40 se muestran una comparación similar para electrodos de sección cuadrada.

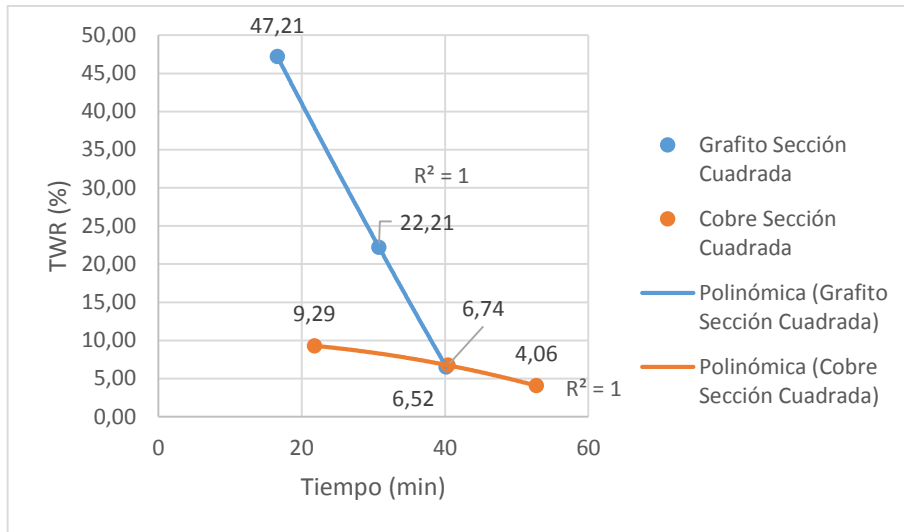


Figura 4. 39. Coeficiente de desgaste con respecto al tiempo en los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)

Fuente: Autor

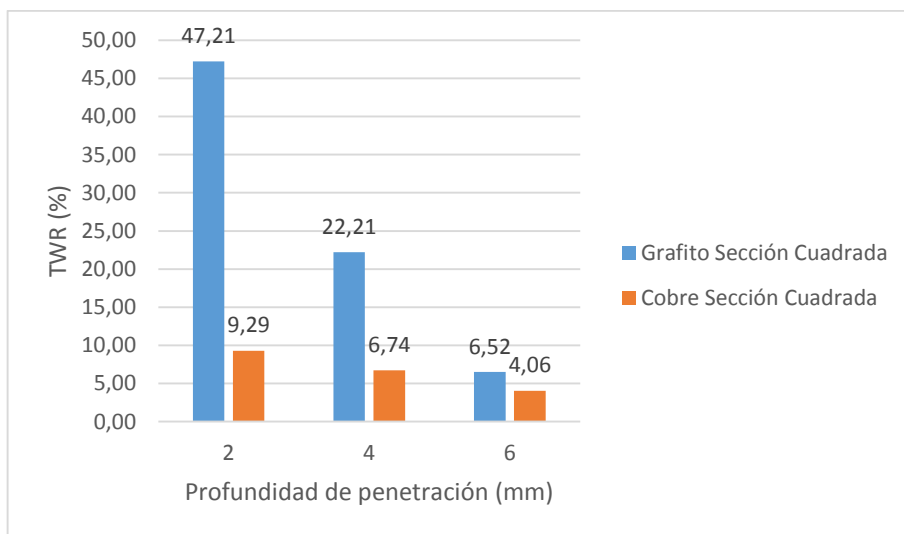


Figura 4. 40. Coeficiente de desgaste con respecto a la profundidad de penetración en los electrodos de grafito y cobre (sección cuadrada)

Fuente: Autor

En las figuras 4.39 y 4.40 se observa que los electrodos de grafito de sección cuadrada presentan un mayor desgaste, debido a que el valor mayor se lo obtuvo a una profundidad de 2 mm se recomienda el uso de electrodos de cobre de sección cuadrada para profundidades pequeñas.

Los electrodos de grafito de sección cuadrada se desgastan en valor promedio un 18.62% más que los de cobre de la misma geometría. El valor promedio de desgaste de los electrodos de grafito de sección cuadrada es 25.31% y para los electrodos de cobre de la misma geometría es 6.69%.

4.3 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

4.3.1 Ho HIPÓTESIS NULA

El análisis del desgaste en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración en el mecanizado de partes de aluminio no permitirá determinar el material y la geometría con mayor coeficiente de desgaste.

4.3.2 Ha HIPÓTESIS ALTERNA

El análisis del desgaste en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración en el mecanizado de partes de aluminio permitirá determinar el material y la geometría con mayor coeficiente de desgaste.

4.3.3 VERIFICACIÓN:

La hipótesis se verificó utilizando la prueba “T-Student” para muestras pequeñas en los grupos de datos: Coeficiente de desgaste en distintas geometrías y Coeficientes de desgaste en distintos materiales.

Simbología:

Ho: Hipótesis nula

Ha: Hipótesis alterna

α : Nivel de significancia

GL: Grados de libertad

m: Población 1

n: Población 2

t_c: “t” calculado

t: “t” tabulado

S²: Varianza

Para realizar la verificación de la hipótesis se realizó un ensayo bilateral (hacia las dos colas) puesto que para este tipo de experimento se trabaja con un nivel de confianza del 95%, el nivel de significancia es del 5%.

Obtención de t tabulado:

Puesto que se analiza para las dos colas el nivel de significancia se divide para 2:

$$\alpha = \frac{5}{2} = 2.5$$

$$\text{Probabilidad (P)} = \frac{\alpha}{100} = 0.025$$

Los grados de libertad (GL) se obtienen de:

$$GL = n - 1$$

Con P y GL vamos a la tabla que se muestra en la figura 4.41 de donde se obtiene el valor de t tabulado

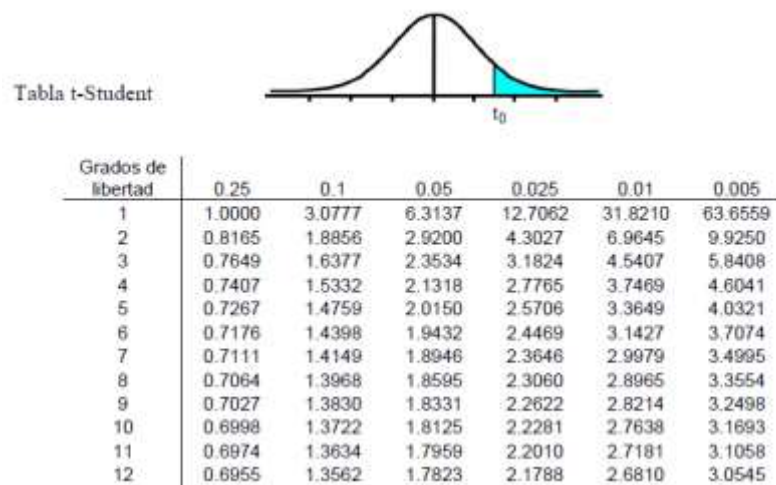


Figura 4. 41. Distribución “t-Student”

Fuente: [27]

4.3.4 REGLA DE DECISIÓN

Se acepta la hipótesis alterna H_a “El análisis del desgaste en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración en el mecanizado de partes de aluminio permitirá determinar el material y la geometría con mayor coeficiente de desgaste”, si el valor de t calculada no está entre el rango de -2.57061 a 2.5706, caso contrario se acepta la hipótesis nula H_0 “El análisis del desgaste en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración en el mecanizado de partes de aluminio no permitirá determinar el material y la geometría con mayor coeficiente de desgaste”.

4.3.5 CÁLCULO DE LA DISTRIBUCIÓN “t”

4.3.5.1 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS CON RESPECTO A LA GEOMETRÍA DEL ELECTRODO

Tabla 4. 10 Datos para la verificación de la hipótesis con respecto a la geometría

Nº	sección Redonda (X_i)	sección cuadrada (Y_i)
1	3,93	47,21
2	1,80	22,21
3	1,07	6,52
4	9,43	9,29
5	5,23	6,74
6	3,64	4,06

Fuente: Autor

Para el cálculo de la varianza se utilizó la siguiente ecuación:

$$S^2 = \frac{\sum(X_i - X_m)^2 + \sum(Y_i - Y_m)^2}{n+m-2} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

X, Y: Denotan el coeficiente de desgaste para cada muestra

X_m, Y_i: Media aritmética de la muestra

N, m: Población de la muestra

Puesto que la hipótesis trata sobre demostrar que el desgaste en electrodos de sección redonda es diferente al de electrodos de sección cuadrada, se utiliza un solo grupo de datos y con el uso de la ecuación 4.2 se demuestra que existe una diferencia significativa entre las medias de cada geometría.

$$t_c = \frac{X_m - Y_m}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

t_c: valor de t calculado

S: Desviación estándar

Tabla 4. 11. Verificación de la hipótesis con respecto a la geometría del electrodo

Nº	Sección Redonda (X _i)	Sección cuadrada (Y _i)	(X _i -X _m) ²	(Y _i -Y _m) ²
1	3,93258944	47,2126259	0,06275606	973,836373
2	1,79644927	22,2118219	5,69610662	38,5088198
3	1,07122667	6,52224355	9,68376201	89,9468413
4	9,42984371	9,28696729	27,5283088	45,1490881
5	5,23241328	6,74233825	1,1010562	85,8205131
6	3,6360838	4,06164955	0,29922784	142,674063
SUMA	25,0986062	96,0376464	44,3712175	1375,9357
X_m	4,18310103	16,0062744		
S²	8,8742435	275,18714		

n	6
GL	5
t_c	-9,72174024
t_t	2,5706

Fuente: Autor

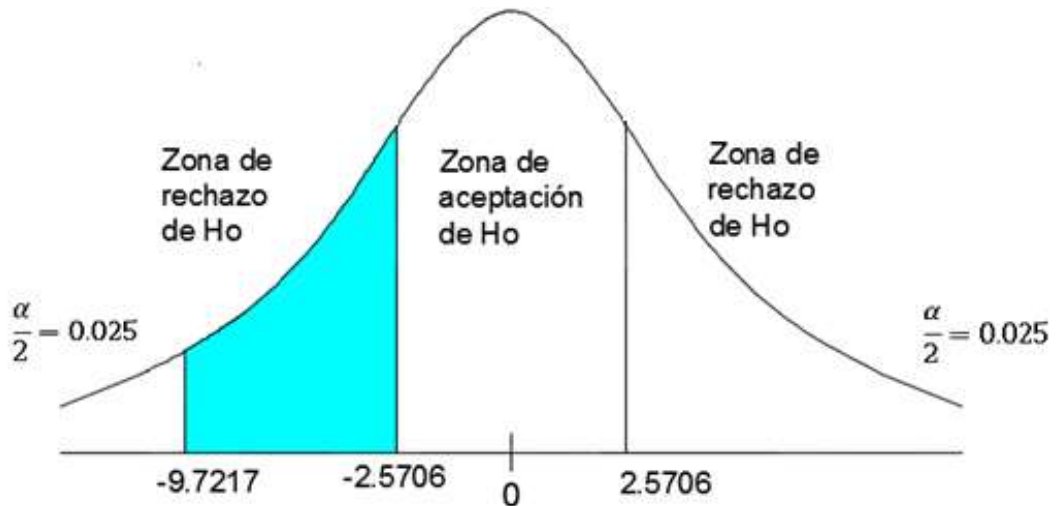


Figura 4. 42. Campana de la distribución “t” (geometría)

Fuente: Autor

4.3.5.1 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS CON RESPECTO AL MATERIAL DEL ELECTRODO

Tabla 4. 12. Verificación de la hipótesis con respecto al material del electrodo

Nº	Electrodos de Grafito (X _i)	Electrodos de Cobre (Y _i)	(X _i -X _m) ²	(Y _i -Y _m) ²
1	3,93	9,43	0,06275606	973,836373
2	1,80	5,23	5,69610662	38,5088198
3	1,07	3,64	9,68376201	89,9468413
4	47,21	9,29	27,5283088	45,1490881
5	22,21	6,74	1,1010562	85,8205131
6	6,52	4,06	0,29922784	142,674063
SUMA	82,75	38,39	44,37	1375,94
X_m	13,7911595	6,39821598		
S²	8,8742435	275,18714		

n	6
GL	5
t_c	6,07893277
t_t	2,5706

Fuente: Autor

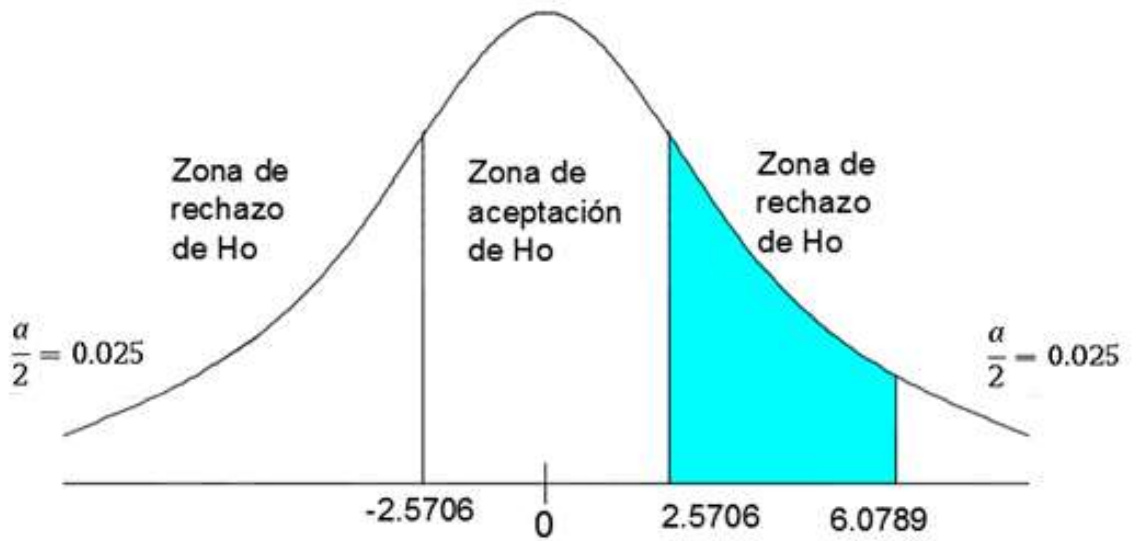


Figura 4. 43. Campana de la distribución “t” (material)

Fuente: Autor

En los dos casos analizados el valor de la t calculada es mayor a de la t tabulada, por lo que se establece la existencia de una diferencia significativa entre las muestras emparejadas, debido a esto se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alterna H_a que dice:

“El análisis del desgaste en electrodos de forma para el proceso de electroerosión por penetración en el mecanizado de partes de aluminio permitirá determinar el material y la geometría con mayor coeficiente de desgaste”.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los materiales comúnmente utilizados como electrodos en este tipo de proceso son el grafito y el cobre, por lo que se determinó un valor promedio para el coeficiente de desgaste de los mismos. De lo cual se obtuvo que los electrodos de cobre de sección redonda se desgastaron un 6.1%, los electrodos de cobre de sección cuadrada un 6.69 %, los electrodos de grafito de sección redonda un 2.26 % y los electrodos de grafito de sección cuadrada un 25.31 %.
- De la investigación realizada, parámetros como la geometría y el material influyeron en el coeficiente de desgaste. Al comparar los electrodos de igual geometría y distinto material se obtuvo que, los electrodos de grafito de sección cuadrada se desgastaron 18.62% más que los de cobre de la misma sección, por otro lado los electrodos de cobre de sección redonda se desgastaron 3.84% más que los de grafito de la misma sección.
- El proceso experimental que se utilizó permitió analizar el desgaste tanto con respecto a su geometría como al material de fabricación del electrodo puesto que este proceso consto de 6 probetas de cada material de las cuales el 50% tuvieron una geometría distinta. Todo el proceso se realizó bajo las mismas condiciones y las profundidades de mecanizado para el análisis fueron de 2, 4 y 6 mm.
- De las tres profundidades de mecanizado (2, 4 y 6 mm), el mayor coeficiente de desgaste se lo obtuvo a 2 mm para cada caso. Al incrementar la profundidad y a su vez el tiempo de mecanizado el proceso gana una mayor estabilidad disminuyendo el desgaste.

- Los parámetros adecuados para el mecanizado de partes de aluminio por medio de la electroerosión por penetración son 5 A para desbaste y 1 A para acabado con un GAP de 0.05 mm, el tiempo de duración del impulso recomendable para electrodos de cobre es de 300 μ s y para grafito de 70 μ s, para la máquina EDM CHEVALIER DM-540.

5.2 RECOMENDACIONES

- El desgaste en los electrodos de forma para el proceso de electroerosión es un factor importante puesto que esta información ayuda a la selección del material más apropiado de acuerdo a la aplicación que se desee, es por esto, que se deben realizar más investigaciones que ayuden a complementar la información expuesta en el presente estudio, ya que este tipo de mecanizado está teniendo una gran acogida en los últimos tiempos.
- Al seleccionar los parámetros para el mecanizado hay que tener presente que la mejor opción son valores medios puesto que de esta manera se asegura que no se produzcan impulsos al vacío e impulsos en cortocircuito.
- Es recomendable revisar que el líquido dieléctrico del tanque en el que se encuentran inmersos el electrodo y la pieza se haya drenado completamente, esto debido a que al abrir el compartimento el fluido se puede derramar, por la misma razón el operario debe utilizar el equipo de protección adecuado.
- Para ensayos en los cuales se requiere realizar una comparación específica, es recomendable trabajar en iguales condiciones tanto en lo que se refiere a parámetros de la máquina como en las medidas de las probetas.
- Los electrodos para este tipo de procesos deben ser rectificadas, de tal manera que no existan irregularidades en la cara que estará en contacto con la pieza, puesto que mediante este proceso la pieza adquiere la forma del electrodo hasta con el mínimo detalle.
- Para realizar las mediciones respectivas es importante retirar los residuos de material que se quedan pegados tanto en el electrodo como la pieza, para que de esta manera se reduzca el margen de error.

Bibliografía

- [1] Blanco, L. *Optimización del proceso de Electroerosión (EDM Process Optimization)*. Universidad de Cantabria, 2014.
- [2] Espinosa, M. *La Electroerosión*. Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales – UNED, 2002.
- [3] Bolufer, P. *Mecanizado por electroerosión*. Instituto Químico de Sarrià, 2012.
- [4] Aramburu, I. *Introducción a la electroerosión*. Escuela Superior de Ingenieros San Sebastián/Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra, 2014.
- [5] Andino, D. *Diseño, modelación, simulación y construcción de molde para tapas de cilindros de gas de uso doméstico por inyección plástica*. Escuela Politécnica de Chimborazo, 2009.
- [6] UM, Universidad de Navarra. *Introducción a la electroerosión*. Escuela Superior de Ingenieros.
- [7] Margüello, I. *Caracterización del desgaste de electrodos de grafito en electroerosión por penetración*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao, 2015.
- [8] Rodríguez, F. *Lecturas de ingeniería 4: Electroerosión*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, 2007.
- [9] Senner, A. (1994). *Principios de Electrotecnia*. (1^{ra} edición). [On-line]. Disponible:
<https://books.google.com.ec/books?id=PW7jBPNU8hwC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>, [Sep. 21, 2016].

- [10] Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. (1^{ra} edición). [On-line]. Disponible: <https://books.google.com.ec/books?id=tcV0l37tUr0C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>, [Sep. 21, 2016].
- [11] Solà, P. (1989). *Electromecanizado*. (1^{ra} edición). [On-line]. Disponible: <https://books.google.com.ec/books?id=3-fVPR9HN4C&pg=PA21&dq=materiales+para+electrodos+de+electroerosion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwimk659YfNAhUKpB4KHS7VCG4Q6AEIQDAE#v=onepage&q=materiales%20para%20electrodos%20de%20electroerosion&f=false>, [Sep. 21, 2016].
- [12] CT electromecánica srl, Lectura Resumen, “Proceso de Electroerosión (EDM).” Departamento Técnico – SC, Buenos Aires, junio de 1983
- [13] Refinería la Pampilla S.A. Ficha de datos de seguridad – Petróleo Diésel. Internet: https://imagenes.repsol.com/pe_es/g84%20010607_tcm18-422402.pdf, [Sep. 23, 2016].
- [14] Castro, D. *Construcción de un molde metálico (coquilla) con noyo para la fundición de aleaciones de aluminio*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015.
- [15] DELMETAL, “Aluminio 6061.” Internet: <http://www.delmetal.com.ar/productos/aluminio/6061.pdf>, [Sep. 27, 2016].
- [16] Hexágono Metrology S.A. La electroerosión por penetración. Internet: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/12327-La-electroerosion-por-penetracion.html>, Mar. 15, 2003, [Sep. 24, 2016].
- [17] Ávila, R. *Diseño y manufactura de moldes para la elaboración de blocs utilizando la máquina electroerosionadora form 20 y de inyección de plástico ft90*. Universidad Tecnológica de Querétaro, 2013.

- [18] CT electromecánica srl, Lectura Resumen, “Proceso de Electroerosión (EDM).” Departamento Técnico – SC, Buenos Aires, junio de 1983
- [19] Castro, G. Lectura “Mecanizado de alta velocidad” Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A, Febrero de 2008.
- [20] A.N. Benítez et al. “Desarrollo de electrodos EDM a partir de fabricación aditiva de electroconformado.” XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, España, 2010.
- [21] Graell, A. (2007). *Electro-erosión*. (1^{ra} edición). [On-line]. Disponible:
https://books.google.com.ec/books?id=YBviAL_qBYEC&pg=PA145&dq=electrodos+para+electroerosion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwWij6dzRqIfNAhXFwiYKHdb_CiAQ6AEIGjAA#v=onepage&q&f=false, [Sep. 27, 2016].
- [22] MachineKs.com, “EDM Chevalier DM 540 (especificaciones técnicas).” Internet: <http://www.machineks.com/machines/14433/Chevalier-SURE-FIRST-DM540-15.7Inch-Y-Axis-19.7Inch-X-Axis-Chevalier-SURE-FIRST-DM540-RAM-TYPE-EDM,-75-AMP,.html>, [Sep. 27, 2016].
- [23] CHARMILLES TECHNOLOGIES, “Manual de utilización de la electroerosión CHARMILLES.” Internet: <http://www.etitudela.com/profesores/jfcm/mipagina/downloads/manualdeutilizaciondelaelectroerosiondepenetra.pdf>, [Nov. 24, 2016].
- [24] M. Camilo. “Electroerosionadoras” *Metal Actual*. [On-line], pp. 16-22. Available: <http://docplayer.es/21138019-Electroerosionadoras.html> [Oct. 26, 2016].
- [25] R. Oscar. Lectura, Topico: “ Calida Superficial: Rugosidad” Escuela de Educación Técnica Profesional N°466, Rosario, Santa Fe, Argentina
- [26] Domínguez, E. (2011). *Mecanizado básico*. (1^{ra} edición). [On-line]. Disponible:

<https://books.google.com.ec/books?id=eybWoUSJXpEC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>, [Sep. 23, 2016].

- [27] Appold, H. (1985). *Tecnología de los Metales*. (1^{ra} edición). [On-line]. Disponible:
https://books.google.com.ec/books?id=_e0h1WvbEpYC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false, [Sep. 27, 2016].
- [28] IUSA, “Catalogo de Cobre y Aleaciones.” Internet: www.iusa.com.mx, [Sep. 21, 2016].
- [29] Coordinación general de minería de México. “Perfil de mercado del Grafito.” Internet:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5557/pm_grafito_2014.pdf, Dic. 2014, [Sep. 27, 2016].
- [30] Universidad de Buenos Aires. Departamento de matemáticas. “Tabla T-Student” Internet:
http://cms.dm.uba.ar/academico/materias/1ercuat2015/probabilidades_y_estadistica_C/tabla_tstudent.pdf, [Oct. 27, 2016].

ANEXOS

ANEXO 1: Densidad del cobre electrolítico



Composiciones Químicas Nominales			
Descripción	Liga IUSA	Aleación ASTM	Densidad
Cobre Electrolítico	Liga 1	110	0.322 lb/in ³
Cobre Fosforado	Liga 2	122	0.322 lb/in ³
Bronce Comercial	Liga 3	220	0.318 lb/in ³
Latón Rojo 87%	Liga 4	226	0.317 lb/in ³
Tumbaga	Liga 5	230	0.316 lb/in ³
Latón Cartucho	Liga 7	260	0.308 lb/in ³
Latón Amarillo	Liga 8	272	0.305 lb/in ³
Latón Maquinable	Liga 12	360	0.307 lb/in ³
Latón de Forja	Liga 13	377	0.305 lb/in ³
Latón de Forja	Liga 380	380	0.305 lb/in ³
Latón Alto Plomo	Liga 353	353	0.306 lb/in ³

ANEXO 2: Densidad del grafito

PERFIL DE MERCADO DEL

GRAFITO



2014
DICIEMBRE

DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO MINERO

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

ANEXO 3: Propiedades del Aluminio 6061



ALUMINIO 6061

USOS MÁS FRECUENTES

Componentes de chapa conformada y/o soldada, piezas mecánicas, industria del plástico, camiones, torres, canoas, vagones, muebles, cañerías y otras aplicaciones estructurales donde se requiera soldabilidad y resistencia a la corrosión y mecánica.

COMPOSICIÓN QUÍMICA EN %

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
Min	0.40		0.15		0.80	0.04				
Max	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20	0.35	0.25	0.15	0.15	Resto

PROPIEDADES FÍSICAS

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

PROPIEDADES TECNOLÓGICAS

Proceso	Clasificación	Proceso	Clasificación
Soldabilidad:		Maquinabilidad (Temple T6)	
Electrón Beam	A	Corte de viruta	C
Gas Inerte (TIG o MIG)	B	Brillo de sup. mecanizada	A
Por resistencia	B		
Brazing	B		
Embutido Profundo		Resistencia a la corrosión	
Recocido		Agentes atmosféricos	A
Semi duro		Ambiente marino	B
Duro			
Repujado		Anodizado	
Temple 0		Protección	A
		Brillante	C
		Duro	A

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

PROPIEDADES MECÁNICAS

Dureza Brinell: 65

ANEXO 4: Hoja de información técnica de la máquina CHEVALIER DM – 540



Description:

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.

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 IS 43Inch 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


** F.O.B. HARRISON, N.J. **
 ** EXCEPTIONAL CONDITION & APPEARANCE **







NOTE: This Chevalier SURE FIRST-DM540 #14433 15.7Inch Y Axis 19.7Inch X Axis Chevalier SURE FIRST-DM540 RAM-TYPE EDM, 75 AMP, is listed for sale by Machinery Values Inc., For any additional info regarding this Chevalier SURE FIRST-DM540 #14433 15.7Inch Y Axis 19.7Inch X Axis Chevalier SURE FIRST-DM540 RAM-TYPE EDM, 75 AM please contact directly its Seller.



ANEXO 5: Ficha de imágenes de las probetas luego de realizado los ensayos.

 <p style="text-align: center;">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p> 					
Fotografías de las probetas					
Datos informativos					
Cantidad de probetas	24	Autorizado por:	In. Mg. Segundo Espín	Realizado por:	David Núñez
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales F.I.C.M			Fecha de ejecución:	19/09/2016
Especificación del material					
Ensayo N°	1		Profundidad de penetración: 2 mm		
					
Electrodo de cobre (sección redonda)			Placa de microfundición de aluminio		
Ensayo N°	2		Profundidad de penetración: 4 mm		
					
Electrodo de cobre (sección redonda)			Placa de microfundición de aluminio		

Ensayo N°	3	Profundidad de penetración: 6 mm
		
Electrodo de cobre (sección redonda)		Placa de microfundición de aluminio
Ensayo N°	4	Profundidad de penetración: 2 mm
		
Electrodo de grafito (sección redonda)		Placa de microfundición de aluminio
Ensayo N°	5	Profundidad de penetración: 4 mm
		
Electrodo de grafito (sección redonda)		Placa de microfundición de aluminio

Ensayo N°	6	Profundidad de penetración: 6 mm
		
Electrodo de grafito (sección redonda)		Placa de microfundición de aluminio
Ensayo N°	7	Profundidad de penetración: 2 mm
		
Electrodo de cobre (sección cuadrada)		Placa de microfundición de aluminio
Ensayo N°	8	Profundidad de penetración: 4 mm
		
Electrodo de cobre (sección cuadrada)		Placa de microfundición de aluminio

Ensayo N°	9	Profundidad de penetración: 6 mm
		
Electrodo de cobre (sección cuadrada)		Placa de microfundición de aluminio
Ensayo N°	10	Profundidad de penetración: 2 mm
		
Electrodo de grafito (sección cuadrada)		Placa de microfundición de aluminio
Ensayo N°	11	Profundidad de penetración: 4 mm
		
Electrodo de grafito (sección cuadrada)		Placa de microfundición de aluminio

Ensayo N°	12	Profundidad de penetración: 6 mm
		
Electrodo de grafito (sección cuadrada)	Placa de microfundición de aluminio	

ANEXO 6: Facturas de equipos y materiales utilizados


DÁVILA INDUSTRIA Y COMERCIO DAVICOM CIA. LTDA.
R.U.C.: 1792098254001
 Sector Bellavista. Av. El Rey 1436 y Av. de los Andes
Tel.: (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 002-001-0023842
AUT. SRI.: 1118706797
 FECHA AUTORIZACIÓN: 26 / ABR / 2016 • Documento Categorizado: NO

Clientes: MUÑEZ LLAMBO JOSE FRANCISCO

RUC/CI: 1802218279001
Dirección: CARLOS AMABLE ORTIZ S/N Y
Fecha Emisión: 24-09-2016, 09:54
Pedido No: 002-001/0004744

Descripción	Cent.	PVP	Total
COBRE BARRA CUADRADA 3/4			
	0.21	322.25	67.67
COBRE BARRA REDONDA 3/4			
	0.159	166.38	26.45



	Subtotal 14%	94.12
	Subtotal 0%	0.00
	Subtotal	94.12
	IVA 14%	13.17
TOTAL USD		107.29
Efectivo		107.29
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
 Cotacocha. 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 001-001-0010957
AUT. SRI.: 1119032479
 FECHA AUTORIZACIÓN: 27 / JUNIO / 2016 • Documento Categorizado: NO

Clientes: MUÑEZ LLAMBO JOSE FRANCISCO

RUC/CI: 1902218279001
Dirección: CARLOS AMABLE ORTIZ S/N Y
Fecha Emisión: 23-09-2016, 16:31
Pedido No: 001-001/0000891

Descripción	Cent.	PVP	Total
ALUMINIO 1/2 X 3 PLATINA			
	0.819	50.16	41.08

	Subtotal 14%	41.08
	Subtotal 0%	0.00
	Subtotal	41.08
	IVA 14%	5.75
TOTAL USD		46.83
Cambio		0.00
Usted fue atendido por:		gsangria

FECHA DE CADUCIDAD: 27 DE JUNIO DEL 2017



Ron Obando Mario Facundo 321 4968 • RUC: 1704112737001 • AUT. SRI: 1836 - De 02/2011 a 02/2016 • ORIGINAL; Adquiriente / COPIA CELESTE; Emisor

Ron Obando Mario Facundo 321 4968 • RUC: 1704112737001 • AUT. SRI: 1836 - De 01/06/11 a 01/26/16 • ORIGINAL; Adquiriente / COPIA AMARILLA; Emisor

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

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

RUC: 1804605184
Señor: Cámara Ingeniería Mecánica OTA
Dir: Av. Los Chasquis y Rio Payamón Telf: _____
Guía Rem: _____

CANT.	DETALLE	P. Unitario	V. Total
1	Inicio de mecanizado electromotión 30 h.		260, ⁴⁰
Ortega Moreira Esteban Eduardo Nectario / Imprenta LISSANTI Aut. 1499 / RUC: 1802058817001 / Emisión: 19 / Enero / 2016 Caduca: 18 / Enero / 2017 Serie 00751 al 00850			SUB-TOTAL 260, ⁴⁰
			DESCUENTO
			IVA 0 %
			IVA 12 % 36, ⁴⁰
RECIBI CONFORME			V. TOTAL \$ 296,⁴⁰
ENTREGUE CONFORME			

ORIGINAL: Adquirente * COPIA: Emisor