

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**



**MAESTRÍA EN MECÁNICA**

**(COHORTE 2017)**

**TEMA:**

---

**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE UN DIELECTRICO ECOLÓGICO  
SOBRE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL MAQUINADO DEL  
ACERO K100 MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR  
HILO (WEDM)”**

---

Trabajo de Titulación

Previa a la obtención del Grado Académico de Magíster en Mecánica Mención Diseño

**Autor:** Ing. Diego Patricio Molina Molina

**Director:** Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza, Mg

**Ambato- Ecuador**

**2020**

**A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica**

El tribunal receptor del Trabajo de Titulación presidido por el Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg., e integrado por: Ing. Diego Fernando Núñez Núñez, Mg., Ing. María Belén Paredes Robalino, Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE UN DIELECTRICO ECOLÓGICO SOBRE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL MAQUINADO DEL ACERO K100 MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)” elaborado y presentado por el señor: Ing. Diego Patricio Molina Molina, para optar por el Grado Académico de Magister en Mecánica Mención Diseño; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



-----  
Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg.  
Presidente del Tribunal



-----  
Ing. Diego Fernando Núñez Núñez, Mg.  
Miembro del Tribunal



-----  
Ing. María Belén Paredes Robalino, Mg.  
Miembro del Tribunal

## AUTORIA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE UN DIELECTRICO ECOLÓGICO SOBRE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL MAQUINADO DEL ACERO K100 MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)”, le corresponde exclusivamente al: Ingeniero Diego Patricio Molina Molina, Autor bajo la Dirección del Ingeniero Oscar Iván Analuiza Maiza, Mg., Director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



-----  
Ing. Diego Patricio Molina Molina

C.C. 0503064065

**AUTOR**



-----  
Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza, Mg

C.C. 1803828266

**DIRECTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de esta, dentro de las regulaciones de la Universidad.



---

Ing. Diego Patricio Molina Molina  
C.C. 0503064065

## **DEDICATORIA**

*Dedico esta investigación a Dios y a mi querida familia.*

*A Dios por haberme dando el don de la vida y permitido culminar con éxito.*

*A mi amada hija Valentina por su amor y cariño incondicional.*

*A mi querida esposa Sonia por la paciencia y compromiso que demostró durante este tiempo.*

*A mis padres, Arquivaldo e Irene por ese apoyo incondicional durante todo este proceso de lucha continua.*

*A mis hermanas Jimena y Jessica por brindarme ese positivismo durante mi preparación profesional.*

*A mi hermano Washington por sus palabras de perseverancia y éxito.*

*Diego Molina*

## **AGRADECIMIENTO**

*A la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato y quienes forman parte del grupo de Docentes y de Servicio.*

*A la Unidad Educativa San José “La Salle” por brindarme el tiempo necesario para mi preparación y superación personal.*

*A mi tutor Ing. Oscar Analuiza Mg., por el apoyo constate, brindado durante la investigación realizada.*

*Al Ing. Cristian Pérez Mg., por su tiempo y colaboración continua durante el desarrollo de este trabajo investigativo.*

*A mis compañeros de la maestría por compartir conmigo gratos momentos llenos de nuevas experiencias.*

## ÍNDICE GENERAL

### PÁGINAS PRELIMINARES

AUTORIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	III
DERECHOS DE AUTOR.....	IV
DEDICATORIA .....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVII
RESUMEN EJECUTIVO .....	XVIII
EXECUTIVE SUMMARY .....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XX
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tema.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.2.1 Contextualización.....	1
1.2.2 Análisis crítico .....	2
1.2.3 Prognosis .....	2
1.2.4 Formulación del problema .....	3
1.2.5 Preguntas directrices .....	3
1.2.6 Delimitación del problema.....	3
1.2.6.1 Delimitación de contenidos.....	3
1.2.6.2 Delimitación espacial .....	3
1.2.6.3 Delimitación temporal.....	4
1.3 Justificación .....	4
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 General .....	5
1.4.2 Específicos .....	5
<b>2. CAPÍTULO II.....</b>	<b>6</b>
2.1 Antecedentes Investigativos.....	6
2.2 Fundamentación teórica .....	8

2.2.1 Técnicas no convencionales de mecanizado .....	8
2.2.2 Proceso de mecanizado por electroerosión .....	9
2.2.3 Características del mecanizado por electroerosión. ....	10
2.2.4 Explicación física del proceso.....	10
2.2.4.1 Proceso de descarga eléctrica.....	11
2.2.5 Clasificación de los procesos de mecanizado por electroerosión. ....	13
2.2.5.1 Electroerosión por penetración (EDM).....	13
2.2.5.2 Rectificado por electroerosión. ....	15
2.2.5.3 Corte por electroerosión por hilo (WEDM). ....	15
2.2.6 Características del hilo - electrodo.....	19
2.2.6.1 Tipos de alambres. ....	19
2.2.7 Fluido de corte.....	20
2.2.7.1 Tipos de dieléctricos. ....	22
2.2.8 Parámetros de mecanizado.....	23
2.2.9 Rugosidad.....	24
2.2.9.1 Medidas de la rugosidad.....	25
2.2.9.2 Grado de rugosidad superficial. ....	25
2.3 Fundamentación Filosófica .....	27
2.4 Fundamentación legal. ....	28
2.5 Categorías fundamentales .....	29
2.6 Hipótesis.....	29
2.7 Señalamiento de variables.....	29
2.7.1 Variable independiente.....	29
2.7.2 Variable dependiente.....	29
2.7.3 Término de relación .....	30
<b>3. CAPÍTULO III.....</b>	<b>31</b>
3.1 Enfoque .....	31
3.2 Modalidad Básica de la investigación.....	31
3.2.1 Bibliográfica.....	31
3.2.2 De campo .....	32
3.3 Nivel o tipo de investigación .....	32



3.3.1 Investigación experimental .....	32
3.3.2 Investigación prospectiva.....	32
3.4 Población y muestra .....	33
3.4.1 Población.....	33
3.4.2 Muestra.....	33
3.4.2.1 Metodología de Taguchi. ....	33
3.5 Operacionalización de variables .....	36
3.5.1 Variable Independiente .....	36
3.5.2 Variable Dependiente.....	36
3.6 Recolección de la información.....	37
3.6.1 Observación.....	37
3.7 Plan de Procesamiento. ....	37
3.8 Plan de Análisis e interpretación de resultados.....	38
<b>4. CAPÍTULO IV .....</b>	<b>39</b>
4.1 Análisis de resultados.....	39
4.1.1 Características técnicas del material base .....	41
4.1.1.1 Determinación de la composición química del material base .....	41
4.1.1.2 Ensayo de espectrofotometría. ....	42
4.1.2 Determinación de la dureza del material base.....	44
4.1.2.1 Ensayo de dureza.....	44
4.1.3 Mecanizado de especímenes o probetas.....	44
4.1.3.1 Selección del equipo de mecanizado no convencional .....	44
4.1.4 Especificación de la muestra a obtenerse .....	45
4.1.5 Aplicación del tipo de dieléctrico. ....	45
4.1.6 Parámetros de mecanizado de cada espécimen .....	46
4.1.7 Medición del tiempo de mecanizado de probetas .....	47
4.1.8 Ensayo de rugosidad media (Ra) en la superficie de corte .....	48
4.1.8.1 Características del equipo de medición de Rugosidad.....	49
4.1.8.2 Reporte de rugosidad superficial.....	49
4.1.8.3 Análisis de normalidad de los valores de rugosidad .....	52
4.1.9 Ensayo de dureza en la zona afecta por el efecto electroquímico.....	53
4.1.9.1 Características del equipo de medición de Dureza .....	53

4.1.9.2 Reporte de dureza.....	54
4.1.9.3 Análisis de normalidad de los valores de dureza .....	57
4.1.10 Ensayo de microscopía electrónica (SEM) .....	58
4.1.10.1 Ensayo topográfico bajo la aplicación de la Taladrina como medio dieléctrico convencional.....	58
4.1.10.2 Ensayo topográfico bajo la aplicación del TL-ECO250-MG como medio dieléctrico ecológico. ....	60
4.2 Interpretación de Resultados .....	62
4.2.1.1 Tiempo de mecanizado. ....	62
4.2.1.2 Rugosidad superficial en la sección de corte .....	63
4.2.1.3 Dureza en la sección de corte.....	65
4.2.1.4 Rugosidad superficial en relación al tiempo de mecanizado .....	66
4.2.2 Rugosidad superficial frente a la dureza .....	67
4.2.3 Análisis Topográfico.....	69
4.2.3.1 Mecanizado aplicando taladrina como fluido dieléctrico de corte.....	69
4.2.3.2 Mecanizado aplicando TL-ECO250-MG como fluido dieléctrico de corte de carácter ecológico.....	70
4.3 Verificación de la Hipótesis.....	72
4.3.1 Análisis de Varianza ANOVA de la Rugosidad superficial .....	72
4.3.1.1 Hipótesis estadística para el análisis ANOVA de la Rugosidad. ....	72
4.3.1.2 Análisis experimental.....	72
4.3.1.3 Resultado del Análisis ANOVA .....	77
4.3.1.4 Optimización de los parámetros de corte con relación a la rugosidad. ....	78
4.3.2 Análisis de Varianza ANOVA de la Dureza superficial.....	79
4.3.2.1 Hipótesis estadística para el análisis ANOVA de la Dureza.....	79
4.3.2.2 Análisis experimental.....	80
4.3.2.3 Resultado del Análisis ANOVA .....	82
4.3.2.4 Optimización de los parámetros de corte con relación a la dureza. ....	83
4.4 Análisis químico del fluido dieléctrico posterior al mecanizado. ....	84
<b>5. CAPÍTULO V.....</b>	<b>87</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>87</b>
5.1 Conclusiones .....	87
5.2 Recomendaciones.....	89

<b>6. CAPÍTULO VI .....</b>	<b>90</b>
6.1 Datos informativos .....	90
6.1.1 Título .....	90
6.1.2 Beneficiario .....	90
6.1.3 Equipo Técnico Responsable .....	90
6.2 Antecedentes de la propuesta .....	90
6.3 Justificación .....	91
6.4 Objetivos .....	92
6.4.1 General .....	92
6.4.2 Específicos .....	92
6.5 Análisis de factibilidad.....	92
6.6 Fundamentación .....	92
6.6.1 Descripción de un manual operativo .....	92
6.6.2 Características de la máquina.....	93
6.6.3 Características del fluido dieléctrico.....	95
6.6.4 Características del hilo de corte .....	95
6.7 Metodología .....	96
6.7.1 Etapas del proceso de operación del equipo. ....	96
6.7.2 Condiciones iniciales del proceso de maquinado.....	97
6.7.3 Ajuste de parámetros iniciales de corte de la máquina electroerosionadora.....	98
6.7.4 Puesta en marcha del equipo o cero máquina. ....	101
6.7.4.1 Operación de la máquina electroerosionadora modelo DK 7735. ....	103
6.7.5 Control de la operación de corte. ....	104
6.7.6 Control de calidad .....	106
6.7.7 Valores de rugosidad y dureza en función al cumplimiento de los parámetros establecidos para el mecanizado. ....	108
6.7.8 Normas de seguridad.....	109
6.7.9 Equipos de protección personal .....	109
6.7.10 Medidas de prevención en general.....	110
6.7.11 Mantenimiento del equipo.....	110
6.8 Administración.....	112

6.8.1 Costos directos .....	112
6.8.2 Costos indirectos .....	113
6.8.3 Costos totales .....	114
6.9 Previsión de la evaluación.....	114
6.10 Conclusiones y recomendaciones .....	115
6.10.1 Conclusiones .....	115
6.10.2 Recomendaciones.....	116
<b>7. Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>117</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descarga ramificada en un medio gaseoso.....	9
Figura 2. Principio del proceso de electroerosión.....	10
Figura 3. Ionización del fluido dieléctrico.....	11
Figura 4. Formación del canal de descarga.....	11
Figura 5. Paso de la corriente a través del canal de descarga .....	12
Figura 6. Caída de la resistencia y paso de la corriente por el canal.....	12
Figura 7. Separación del material producto de la descarga.....	13
Figura 8. Separación del material producto de la descarga.....	14
Figura 9. Electrodo de forma.....	14
Figura 10. Mecanizado mediante el proceso de electroerosión por hilo.....	15
Figura 11. Ciclo de funcionamiento del proceso por electroerosión. ....	18
Figura 12. Perfil de un material después del mecanizado.....	25
Figura 13. Categorías fundamentales.....	29
Figura 14. Diagrama de flujo- procesamiento de datos y análisis. ....	41
Figura 15. Preparación del espécimen y ejecución del ensayo químico. ....	42
Figura 16. Rugosímetro Mitutoyo SJ210.....	49
Figura 17. Normalidad de la Rugosidad media - Taladrina.....	52
Figura 18. Normalidad de la Rugosidad media – TL-ECO250-MG.....	53
Figura 19. Durómetro Phase II Plus.....	54
Figura 20. Normalidad de la Dureza – Taladrina.....	57
Figura 21. Normalidad de la Dureza – TL-ECO250-MG.....	57
Figura 22. Relación del tiempo de mecanizado vs tipo de medio dieléctrico.....	63
Figura 23. Relación de la rugosidad superficial vs tipo de medio dieléctrico. ....	64
Figura 24. Relación de la dureza vs tipo de medio dieléctrico. ....	65
Figura 25. Relación de la dureza vs tipo de medio dieléctrico. ....	67
Figura 26. Relación de la rugosidad vs dureza superficial.....	68
Figura 27. Topografía de la muestra con un valor mínimo de rugosidad al emplear a la taladrina como medio dieléctrico de corte (DC-TL-11: Experimento 11).....	69
Figura 28. Topografía de la muestra con un valor máximo de rugosidad al emplear la taladrina como medio dieléctrico de corte (DC-TL-05: Experimento 05).....	70

Figura 29. Topografía de la muestra con un valor mínimo de rugosidad al emplear TL-ECO250-MG como medio dieléctrico ecológico de corte (DE-TLECO-10: Experimento 10).....	70
Figura 30. Topografía de la muestra con un valor máximo de rugosidad al emplear TL-ECO250-MG como medio dieléctrico ecológico de corte (DE-TLECO-05: Experimento 05).....	71
Figura 31. Diagrama de Pareto en función de la Rugosidad.....	76
Figura 32. Relación de los 4 factores bajo la media de ajuste. ....	76
Figura 33. Relación de las combinaciones entre los 4 factores.....	77
Figura 34. Optimización de los parámetros que influyen en la obtención del mínimo valor de rugosidad. ....	79
Figura 35. Diagrama de Pareto en función de la Dureza superficial. ....	82
Figura 36. Optimización de parámetros que influyen en la obtención de la máxima dureza en zona de corte.....	84
Figura 37. Producción de bacterias. ....	86
Figura 38. Componentes que integran una máquina electroerosionadora de hilo.. ...	93
Figura 39. Máquina Electroerosionadora DK 7735. ....	94
Figura 40. Proceso de operación del equipo. ....	96
Figura 41. Instalación eléctrica de la máquina electroerosionadora .....	97
Figura 42. Instalación eléctrica de la máquina electroerosionadora.....	97
Figura 43. Operación de la máquina electroerosionadora DK 7735.....	104
Figura 44. Equipos de protección personal.....	109

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Procesos de mecanizado no convencionales.....	9
Tabla 2. Tipos de alambres comúnmente empleados.....	20
Tabla 3. Clasificación de dieléctricos en función de la tasa de desgaste de la herramienta.....	21
Tabla 4. Configuración de factores de control.....	23
Tabla 5. Parámetros fijos en el proceso de corte.....	24
Tabla 6. Factores de control por niveles. ....	24
Tabla 7. Grados de rugosidad superficial.....	26
Tabla 8. Valores de rugosidad superficial.....	27
Tabla 9. Réplicas o corridas en función al diseño factorial. ....	33
Tabla 10. Matriz ortogonal L <sub>32</sub> .....	34
Tabla 11. Operacionalización de variable independiente. ....	36
Tabla 12. Operacionalización de variable dependiente.....	36
Tabla 13. Valor porcentual de la composición química del material base.....	42
Tabla 14. Análisis químico – acero K100.....	43
Tabla 15. Error porcentual en el análisis químico – acero K100.....	43
Tabla 16. Ensayo de dureza del material base en estado de suministro.....	44
Tabla 17. Características del equipo – EDM Wire Cut Machine.....	45
Tabla 18. Parámetros de mecanizado.....	46
Tabla 19. Parámetros de corte y tiempo de mecanizado - aplicando dieléctrico convencional (Taladrina) .....	47
Tabla 20. Parámetros de corte y tiempo de mecanizado - aplicando dieléctrico ecológico (TL-ECO250-MG).....	48
Tabla 21. Especificaciones técnicas del equipo de medición de rugosidad.....	49
Tabla 22. Especificaciones técnicas – Durómetro Phase II Plus. ....	54
Tabla 23. Tiempo de mecanizado mediante WEDM.....	62
Tabla 24. Rugosidad media (Ra) alcanzada en el mecanizado WEDM. ....	64
Tabla 25. Valores de dureza en la sección de corte mediante WEDM.....	65
Tabla 26. Relación entre la rugosidad superficial y tiempo durante el proceso de mecanizado mediante electroerosión por hilo (WEDM) .....	66

Tabla 27. Relación entre la rugosidad y dureza superficial en el proceso de mecanizado mediante electroerosión por hilo (WEDM).....	67
Tabla 28. Niveles de cada factor. ....	72
Tabla 29. Matriz de estudio del diseño factorial con 4 factores.....	73
Tabla 30. Diseño factorial $2^4$ .....	74
Tabla 31. Estimación de los efectos que influyen en la Rugosidad. ....	75
Tabla 32. Análisis ANOVA de la Rugosidad. ....	77
Tabla 33. Matriz de estudio del diseño factorial con 4 factores con respecto a la dureza en la zona de corte.....	80
Tabla 34. Estimación de los efectos que influyen en la Dureza.....	80
Tabla 35. Análisis ANOVA de la Dureza. ....	82
Tabla 36. Análisis microbiológico de la Taladrina posterior al corte. ....	85
Tabla 37. Análisis microbiológico del dieléctrico ecológico (TL-ECO250-MG) posterior al corte.....	85
Tabla 38. Especificaciones técnicas del dieléctrico TL-ECO250-MG (Anexo 2).....	95
Tabla 39. Características del hilo de corte. ....	96
Tabla 40. Parámetros iniciales de control, bajo las especificaciones del proveedor del equipo.....	98
Tabla 41. Valores de rugosidad y dureza bajo la aplicación de las variables de ajuste de la máquina electroerosionadora.....	100
Tabla 42. Descripción del panel de control.....	101
Tabla 43. Ficha técnica para la calibración y puesta en marcha del equipo. ....	105
Tabla 44. Formato de control de calidad.....	107
Tabla 45. Valores establecidos de rugosidad, dureza y tiempo de mecanizado con relación a la calidad final obtenida.....	108
Tabla 46. Mantenimiento de los sistemas que comprende la máquina electroerosionadora. ....	110
Tabla 47. Costos relacionados a adquisición de materiales. ....	112
Tabla 48. Costos relacionados al alquiler del equipo de corte y ensayos. ....	113
Tabla 49. Costos asociados a recursos humanos.....	113
Tabla 50. Costos relacionados a recursos adicionales. ....	114
Tabla 51. Costo total de la Investigación. ....	114



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Ficha técnica del material base (acero k100) .....	121
Anexo 2: Ficha técnica del dieléctrico ecológico .....	123
Anexo 3: Informe técnico del ensayo del análisis químico del material base (espectrofotometría) .....	125
Anexo 4: Norma de rugosidad (ISO 4287-1997) .....	128
Anexo 5: Informe técnico del ensayo de rugosidad. ....	129
Anexo 6: Norma de dureza (ASTM E18) .....	136
Anexo 7: Informe técnico del ensayo de dureza. ....	138
Anexo 8: Informe del análisis topográfico mediante microscopia SEM. ....	143

## RESUMEN EJECUTIVO

En el Ecuador, aquellos procesos de mecanizado no convencional han llevado a un análisis en cuanto se refiere a la forma de producción de elementos mecánicos de geometría compleja, por lo cual, se ve la necesidad de investigar los procesos de corte por electroerosión por hilo (WEDM); empleando a su vez un medio dieléctrico alternativo de carácter ecológico en base al efecto electroquímico; con la finalidad de sustituir el medio de uso común de la taladrina sin alterar la rugosidad y dureza final en la sección de corte, a su vez, preservar la integridad del equipo, contribuyendo a las empresas dedicadas a procesos de matricería, a la ecología y medioambiente que nos rodea. El proceso mencionado va de la mano a través de un estudio en cuanto a los parámetros de corte, como lo es la intensidad de corriente, velocidad de avance, rapidez del hilo y tipo de dieléctrico; fundamentado en una investigación de carácter experimental que conlleva a caracterizar aquellos que son más representativos en cuanto al acabado superficial. El análisis se encuentra basado en un tratamiento de carácter comparativo el cual permite conocer la variabilidad de los valores adquiridos de rugosidad y dureza en la zona de corte mediante el análisis de varianzas ANOVA sobre los factores que influyen en el proceso de corte, además de ello observar la presencia de posibles alteraciones en la zona de corte mediante la aplicación de microscopía electrónica de barrido (SEM). Dando como resultado la aplicabilidad del medio dieléctrico alternativo, ya que bajo la influencia del mismo se logra alcanzar en promedio un valor significativo de rugosidad igual a  $4,658 \mu\text{m}$ , el cual es menor al valor promedio alcanzado con la aplicación de la taladrina, donde su valor es de  $5,253 \mu\text{m}$ . Además, la superficie presenta menor índice de irregularidades, y un valor significativo en cuanto a dureza se refiere. Es por ello que el uso del fluido ecológico consigue sustituir con facilidad, cumpliendo con las expectativas solicitadas por el tipo de mecanizado.

**Descriptor:** Electroerosión, dieléctrico, rugosidad, parámetros de corte, microscopía electrónica de barrido.

## EXECUTIVE SUMMARY

In the Ecuador, non-conventional mechanized process have carried an analysis that is referred to the form of production of mechanic elements of complex geometry, that's why the necessity of investigate the cuts of wire electroerosion (WEDM); using an alternative dielectric which is ecological in base to the electrochemical effect, for the aim of substitute the common way of coolant without the alteration of the final roughness and hardness on the cutting section, and preserve the equipment integrity, and contributing to the factories dedicated to the sheet metal process, to the ecology and the environment around us. The mentioned process goer together with the adequate cutting parameters study, based on an experimental investigation lead to characterized the representative ones of the surface finishing. The analysis is based on a comparative treatment which permits knowing the variability of the roughness and hardness acquired amounts on the cutting section through a variances analysis ANOVA about the factors that influence on the cutting process, in addition observe the presence of possible alterations on the cutting zone through the application of a scanning electron microscope (SEM). Having as a result the applicability of the alternative dielectric because under the influence of the same is achieved to obtain in average a significant value of roughness equal to 4,658  $\mu\text{m}$  which is less to the achieved average amount with the application of the coolant, where the average is 5,253  $\mu\text{m}$ . Furthermore, the surface represents less rate of irregularities, and one significant average to hardness it is referred. That is why the ecologic fluent gets to substitute easily, achieving with the asked expectations for the mechanized type.

**Key words:** electroerosion, dielectric, roughness, cutting parameters, scanning electron microscope.

## INTRODUCCIÓN

La constante evolución tecnológica en cuanto al perfeccionamiento en la producción de piezas con geometrías complejas ha producido cambios significativos en la técnica operativa, la productividad y la precisión; donde procesos electroquímicos, como la electroerosión representa uno de los procesos claves en la fabricación de moldes y herramientas, ya que permite trabajar con materiales que han sido previamente tratados térmicamente. El proceso de electroerosión por hilo (WEDM) se basa en la remoción térmica de material a través de cortas descargas eléctricas entre el hilo o herramienta y el material base o pieza de trabajo, acompañado de un medio dieléctrico. Su capacidad para generar cavidades de alta relación en cuanto a la confiabilidad y calidad superficial, permitiendo la obtención de piezas irregulares con áreas restringidas como lo es en la industria automovilística, aeroespacial y electrónica.

Las metodologías de mecanizado con medios de refrigeración de carácter biodegradable ha sido a nivel mundial uno de los temas con mayor énfasis de estudio, debido a los altos costos que afrontan las empresas por cuestiones de carácter ambiental resultado de la adquisición, almacenamiento y mantenimiento de aquellos aceites como la taladrina (considerados altamente contaminantes). Donde, el principal problema inicia con la incorrecta disposición de los residuos propiamente de los refrigerantes desechados hacia los vertederos de aguas o afluentes que contaminan de forma directa hacia el ecosistema.

La empresa “Lauer Harz GmbH” de origen alemana, certifica que la aplicación de esta tecnología en sus productos ha permitido disminuir considerablemente, aquellas fuerzas presentes en el desmoldeo, en comparación a los originales. La empresa colombiana “PM Tec Engineering” ha dedicado grandes esfuerzos y recursos en la investigación, conjuntamente con el Instituto “WZL” de la Universidad RWTH de Alemania, con el fin de fortalecer el conocimiento necesario para deducir características posteriores al mecanizado como es la rugosidad superficial generada por el proceso de electroerosión [3].

A nivel nacional, se han realizado estudios en cuanto a las distintas formas de mecanizado generando mínimas cantidades de agentes contaminantes, tal es el caso del proceso de mínima cantidad de lubricación (MQL) donde se espera preservar la vida útil de las herramientas. Otras investigaciones están realizadas en función al

mecanizado en seco donde se analiza los parámetros de corte adecuados en relación a las características del material a ser trabajado.

A nivel local, el Ing. Diego Nuñez de la Universidad Técnica de Ambato Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ha demostrado la aplicabilidad de medios ecológicos como aceites vegetales en procesos de fresado, lo que le ha permitido determinar parámetros adecuados de mecanizado tomando en cuenta la vida de la herramienta y el acabado superficial de la pieza obtenida al final del proceso.

Con el presente trabajo investigativo, se proyecta analizar cómo cambia la rugosidad y dureza superficial en el corte frente al uso de un medio dieléctrico alternativo de carácter ecológico que remplace el uso común de la taladrina; al mismo tiempo el estudio de aquellos parámetros de corte adecuados durante el proceso de mecanizado por electroerosión por hilo (WEDM) tomando como base un acero k100 el cual es por lo general empleado en la industria matricera. Además, se espera interpretar la posible presencia de alteraciones o irregularidades en la sección mecanizada mediante un análisis topográfico a través del uso de microscopía electrónica; dado que aún no se han presentado estudios similares en cuanto a procesos no convencionales con medios ecológicos. Pese a ello, existe un estudio en cuanto al análisis de parámetros de mecanización en micro-fundición de aluminio bajo el proceso de electroerosión por penetración y su relación directa con la rugosidad resultante en la superficie de corte, el cual será considerado durante el proceso investigativo.

Dentro de su estructura se contempla 6 capítulos los cuales estarán divididos de la siguiente manera: en el primer capítulo se presenta brevemente el planteamiento del problema, su contextualización, el análisis crítico, delimitación, justificación y objetivos. El segundo capítulo estará contemplado bajo el marco teórico, su fundamentación e hipótesis. En el tercer capítulo se habla de la metodología a ser empleada para el estudio al igual que la forma en cómo se estructurará las variables de estudio y la recolección de datos. En el cuarto capítulo se presentará el tratamiento de datos e interpretación y análisis de los mismo; para en el quinto capítulo establecer las debidas conclusiones y recomendaciones correspondientes. Como sexto y último capítulo se verá la propuesta de mejora que estará en función a la mejora productiva.

## **CAPÍTULO I**

### **1.1 Tema**

“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE UN DIELECTRICO ECOLÓGICO SOBRE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL MAQUINADO DEL ACERO K100 MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)”

### **1.2 Planteamiento del problema**

#### **1.2.1 Contextualización**

Los procesos no convencionales Electrical Discharge Machining (EDM), por sus siglas en inglés, representan una tecnología bastante desarrollada que a su vez representa un aproximado del 7% en ventas de máquinas-herramientas a nivel mundial [1]. El mecanizado por descarga eléctrica se encuentra enfocado en operaciones como la fabricación de moldes y matrices, partes y piezas para motores de aviación, producción de minicomponentes para la industria electrónica y hoy en día, para la fabricación de prótesis metálicas.

Su función está en base a la aplicación de un medio dieléctrico quien básicamente es extremadamente importante en cuanto a costos, productividad y calidad en las piezas mecanizadas. Al mismo tiempo, es aquel que va a influir en la salud y seguridad; recordando su grado de afectación hacia la conservación del medio ambiente.

El presente trabajo cubrirá una revisión en cuanto se refiere a la aplicación de medios dieléctricos, al igual que, el desempeño y correcto funcionamiento de los equipos de Corte por Electroerosión por Hilo (WEDM); tomando muy en cuenta los respectivos parámetros de uso, quienes están estrechamente ligados con la rugosidad final obtenida al efectuar el proceso de mecanizado. Lo cual permitirá un estudio de carácter comparativo en relación al uso de la taladrina como medio dieléctrico convencional, al igual que de un medio ecológico; quienes están actuando en la calidad superficial

en la zona de corte. Cabe mencionar que se procederá a una sustentación a través de una interpretación topográfica de la superficie mecanizada; con el objetivo de tener una visión a futuro sobre el potencial uso de medios dieléctricos específicamente de carácter ecológico.

### **1.2.2 Análisis crítico**

El avance tecnológico ha impulsado en el desarrollo de las empresas en el Ecuador, es por ello que se encuentran nuevos procesos en cuanto a mecanizado de materiales. Estudios previos han permitido encontrar metodologías, una de ellas, el proceso WEDM, el cual permite mecanizar materiales de cualquier tipo de dureza, siempre y cuando tenga una buena conductividad eléctrica. El uso de medios dieléctricos alternativos o ecológicos han permitido reducir en gran medida la concentración de agentes altamente contaminantes a la salud. Motivo por el cual nace la necesidad de conocer a nivel nacional, cómo influye el cambio del dieléctrico dentro del proceso de mecanizado no convencional WEDM. Sabiendo que a nivel Industrial y de Educación Superior no se ha desarrollado un análisis de este tipo, ya que la mayor cantidad de empresas no han sido intervenidas por entidades de carácter ambiental, lo cual se verá en un futuro no muy lejano.

### **1.2.3 Prognosis**

Empresas relacionadas al tema de investigación requieren minimizar el impacto ambiental, lo cual ha sido un tema muy importante, tomando en cuenta la relación que mantiene con los costos de producción. Estudios realizados en base a aceites naturales aplicados al proceso EDM establecen, a través de la norma ISO 14000 que se puede identificar y minimizar la contaminación en fluidos dieléctricos, en particular, aquellos que son subproductos o derivados del petróleo. De acuerdo a la normativa NBR 10004 (1987) los fluidos dieléctricos son considerados residuos de clase I, es decir, son sustancias peligrosas. El contacto con estos fluidos puede alterar y generar reacciones internas o externas [2].

Por lo tanto es necesario realizar una investigación que permita determinar alteraciones o cambios en el acabado superficial por corte al emplear un medio dieléctrico ecológico, sin alterar o modificar los parámetros iniciales de mecanizado.

#### **1.2.4 Formulación del problema**

¿Cómo influye el uso de un dieléctrico ecológico sobre la rugosidad y dureza superficial considerando parámetros de corte adecuados en el maquinado del acero K100 utilizado en la industria matricera, mediante el proceso de electroerosión por hilo (WEDM)?

#### **1.2.5 Preguntas directrices**

- ¿Cuáles son los parámetros adecuados que inciden en la rugosidad y dureza superficial del acero k100 durante el corte por electroerosión WEDM?
- ¿Cómo influye el uso del dieléctrico alternativo en la rugosidad superficial del corte y dureza del acero k100 empleado para matricería?
- ¿Habrá presencia de defectos o alteraciones en la topografía superficial de corte al utilizar un medio dieléctrico alternativo?

#### **1.2.6 Delimitación del problema**

##### **1.2.6.1 Delimitación de contenidos**

El presente estudio se centra en el análisis de la influencia de un dieléctrico alternativo y parámetros de corte adecuados sobre la rugosidad y dureza superficial del corte durante el proceso de mecanizado por electroerosión por hilo (WEDM), complementado el mismo a través de una interpretación topográfica de la sección de corte. Además, se fundamenta en el campo de la Maestría en Diseño Mecánico en el área de Materiales conjuntamente con el Diseño de Experimentos.

##### **1.2.6.2 Delimitación espacial**

La obtención de muestras (probetas) se efectuará en una electroerosionadora de hilo de la empresa “Ingeniería del Acero y Matricería” ubicada en la ciudad de Ambato, posteriormente serán analizadas en las instalaciones correspondientes a los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM) de la Universidad Técnica de Ambato (UTA) al igual que en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana de la ciudad de Quito (UPS).



### **1.2.6.3 Delimitación temporal**

El presente estudio se llevará a cabo a partir de septiembre 2018 a noviembre 2019, tiempo establecido para el desarrollo e investigación de nuevos procesos no convencionales en cuanto a mecanizado de partes y piezas mecánicas, aplicando medios alternativos con la finalidad de preservar el ecosistema.

### **1.3 Justificación**

Dentro de los procesos de mecanizado no convencionales, la electroerosión ha ganado terreno, ya que permite la obtención de piezas complejas, que resultan prácticamente imposible de lograr por otros métodos.

Su principio se caracteriza a través de descargas eléctricas que fluyen mediante un hilo conductor generando un efecto electro-erosivo lo que da paso al desprendimiento del material base. Dicha operación se mediante un control del flujo del dieléctrico sobre la superficie de corte; dando como resultado del proceso un líquido que contamina. De esta manera, surge la necesidad de realizar un análisis comparativo en cuanto al uso de un dieléctrico tradicional y un alternativo o ecológico.

Es por esta razón que se hace uso de cierto material en común como lo es el acero K100, generalmente empleado en actividades de matricería; y un fluido de tipo degradable el cual no afecte en absoluto al aspecto o acabado final, de igual forma, que permita conservar el estado físico del equipo. Para el estudio, se modifican las variables de entrada con la finalidad de alcanzar valores de rugosidad y dureza superficial cercanos a aquellos obtenidos mediante la aplicación de dieléctricos comunes.

Además, la investigación cuenta con un nivel de carácter experimental, a través de una metodología exploratoria empleando un arreglo de tipo ortogonal mediante la metodología de Taguchi, recalando que las variables de aplicación se encuentran inmersas en las variables de operacionalización, es decir, se declara a las variables independientes donde se encuentran los parámetros de mecanizado más el tipo de dieléctrico, y las variables dependientes conformadas por la rugosidad, dureza y topografía superficial en la zona de corte. Por lo tanto, las variables serán declaras como cuantitativas y cualitativas.

A diferencia de otras metodologías, se planea introducir técnicas aplicadas como lo es el análisis de varianza (ANOVA) para conocer los efectos de las variables de entrada sobre las de salida, sin desalinear el propósito de la investigación.

El análisis de este trabajo permite contribuir de forma positiva en cuanto a procesos productivos en la empresa “Ingeniería del Acero y Matriceria” ya que su orientación está en base a trabajos de mecanizado que contempla la fabricación de matrices a nivel provincial.

Fortaleciendo el ideal de que toda empresa tome conciencia en cuanto a los elementos que quedan posteriormente a sus procesos productivos, tal es el caso de los fluidos de corte subproductos de hidrocarburos, lo cuales deben ser tratados previamente a su exposición externa, ya que contienen elementos que alteran a la salud de quien este inmerso en el proceso, al igual que al medio que lo rodea.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

Analizar la influencia de un dieléctrico ecológico sobre la rugosidad superficial en el maquinado del acero K100 mediante el proceso de electroerosión por hilo (WEDM).

### **1.4.2 Específicos**

- Evaluar los parámetros que inciden en la calidad de corte por electroerosión y el comportamiento de un dieléctrico ecológico como alternativa al uso convencional de taladrina.
- Realizar un análisis comparativo en cuanto a la rugosidad que presenta el maquinado del acero K100 al utilizar un dieléctrico convencional y un ecológico.
- Visualizar la presencia de defectos o alteraciones en la superficie de corte aplicando microscopía electrónica.

## CAPÍTULO II

### 2.1 Antecedentes Investigativos

Investigaciones desarrolladas a lo largo del tiempo han aportado en cuanto a la mejora de los parámetros óptimos en procesos no convencionales de mecanizado.

T. Newman, S. Rahimifard y R. [1], analizan el comportamiento de ciertos factores que están interrelacionados con las variables que se controlan para obtener un óptimo proceso de mecanizado, basado en la calidad final. Las propiedades mecánicas que tiene el material base e hilo de corte (electrodo), la geometría final de la pieza y el fluido dieléctrico son aquellos elementos que han sido tratados para mejorar la rugosidad en el corte.

El uso de ciertas herramientas estadísticas ayuda a la selección de la mejor combinación de variables de corte para generar el óptimo rendimiento. Sin embargo, resulta complicado relacionar los parámetros de entrada con las medidas de rendimiento o de salida [1].

El estudio realizado por V. [2], establece que existen factores adicionales que influyen en la rugosidad superficial, tal es el caso del diámetro del alambre (electrodo) y la velocidad de alimentación del hilo, ya que presenta una serie de chispa eléctrica ocasionando cráteres en la superficie de corte. Moreno empleó un análisis en base a la Planificación de Procesos Asistidos por Computadora (CAPP) con la finalidad de obtener un enlace entre el Diseño Asistido por Computadora (CAD) y la Fabricación Asistida por Computadora (CAM), lo que le permitió garantizar la vida útil de la herramienta o hilo y la optimización en cuanto a tiempos de fabricación [2].

B. Nayak y S. Mahapatra realizaron su investigación en base a la optimización de los parámetros del proceso WEDM usando Inconel 718 crioprocesado como material de trabajo, donde los resultados proponen un enfoque híbrido en cuanto a la optimización de ciertos parámetros. La teoría de desviación es utilizada para transformar múltiples características en lo que se refiere al rendimiento. Con la operación de corte cónico se logra predecir varias características que generan beneficios al tener un alto grado de correlación con la rugosidad [3].

K. Mohapatra, V. Shaibua, S. Sahoob, realizaron un modelado y análisis de electroerosión por hilo en un proceso de corte de engranajes para un modelo 2D” el cual trata de la modelación bidimensional del hilo de corte, con la finalidad de conocer la temperatura y tensión equivalente en el electrodo sin considerar los cambios producidos en la pieza de trabajo. Con la ayuda de la modelación en ANSYS Fluent lograron determinar que el pulso eléctrico generado durante el corte es el factor más representativo en dicho proceso. Además, concluyeron que la temperatura del alambre frente a la descarga eléctrica es la máxima en la región en contacto con la pieza de trabajo, tomando en cuenta que la tensión equivalente se presenta en el centro del conductor (electrodo) debido a la velocidad de alimentación y a las chispas generadas en el mismo [4].

B. Lodhia, S. Agarwalb, focalizado en la optimización de parámetros de mecanizado, analiza la producción de piezas con formas complejas debido al crecimiento exponencial en lo referente a fabricación en la última década. El análisis se enfocó directamente en las condiciones de mecanizado y en la rugosidad final que obtiene el material de trabajo, en base a la metodología de Taguchi. Los experimentos fueron llevados a cabo variando el pulso eléctrico a través del tiempo, las corrientes máximas y la alimentación del electrodo (hilo). Al final observaron que el diseño planteado en base a la metodología de Taguchi, es confiable y eficiente para optimizar ciertos parámetros de mecanizado como lo es el pulso eléctrico y su tiempo de accionamiento, corrientes máximas y alimentación del electrodo; donde el pulso eléctrico y el tipo de corriente han influido sobre el resto de parámetros [5].

De igual forma, es necesario conocer cómo influye ciertos medios dieléctricos, el estudio realizado por S. Sahu, T. Jadam, y S Datta [6], detalla un análisis del rendimiento de mecanizado al emplear aceites convencionales y agua destilada como medio alternativo, dando a conocer los efectos superficiales; revelando que el medio dieléctrico ecológico provoca la formación de óxidos en la zona desbaste, e incluso, afecta la integridad del equipo. Por otro lado, aquel medio dieléctrico tradicional atribuye a la formación de carburos debido a la pirólisis de hidrocarburos, lo cual mejora la calidad superficial.

G. Pellegrini y Ch. Ravasio [7], deciden analizar la eficiencia y productividad del sistema de fabricación a través del corte por electroerosión por hilo, bajo ciertas restricciones ecológicas prestando mayor atención a la protección del medio ambiente.

Para lo cual emplearon agua desmineralizada y aceite vegetal, donde sus resultados son altamente influyentes en el rendimiento del proceso ya que presentan un menor impacto ambiental, aunque la calidad de corte es menor a la obtenida con fluidos convencionales dado que al exponer la superficie a un análisis de microscopía electrónica, se observa la presencia de alteraciones en la superficie de desbaste debido a la composición química que poseen de los medios ecológicos.

L. Yadav, S. Lal, N. Kumar Singh, D. Chouhan, Y. Singh [8], analizan el impacto de ciertos aditivos (resinas) en líquidos dieléctricos, los cuales permiten disminuir el efecto nocivo sobre la salud de quien opere la máquina, y al mismo tiempo hace que los residuos no sean degradantes hacia el medio ambiente. Permitiendo, además, preservar el estado físico del equipo, alcanzado valores estándares en cuanto a la calidad en el mecanizado, como si se trabajara con productos convencionales como lo es la taladrina.

## **2.2 Fundamentación teórica**

### **2.2.1 Técnicas no convencionales de mecanizado**

El desarrollo industrial se encuentra fuertemente ligado con el avance tecnológico, procesos de mecanizado mediante el accionamiento de una herramienta de extracción de material han sido perfeccionados logrando una reducción en cuanto a tiempos de producción en el área de manufactura. Actualmente se está generando un incremento en la demanda de ciertos elementos o mecanismos que poseen complejidades en su geometría, lo cual es difícil de alcanzar con métodos convencionales como lo es el torneado o fresado. La implementación de nuevas técnicas facilita la manipulación y creación de piezas que contengan altos grados de dificultad, sin generar impactos negativos en las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material.

Por ésta razón, se han creado diferentes técnicas de remoción de material sin arranque de viruta conocidos en el ámbito industrial como “procesos de mecanizado no convencionales”, donde la herramienta no entra en contacto directo con la superficie del material [9].

En la tabla 1, se observa la clasificación de los procesos de mecanizado no convencional en base al tipo de energía a ser empleada.

Tabla 1. Procesos de mecanizado no convencionales [9].

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

### 2.2.2 Proceso de mecanizado por electroerosión

El mecanizado por electroerosión se define en base al arranque de material a través de descargas eléctricas producidas entre un electrodo (herramienta de trabajo) y el elemento o material a ser mecanizado, simultáneamente es necesario el uso de un medio dieléctrico que ayude al proceso. De acuerdo al régimen de mecanizado, la chispa puede tener una duración corta o larga, donde la temperatura puede llegar a medir hasta decenas de miles de grados centígrados [10].

La rapidez de la chispa que se genera, no es la más favorable, ya que se presenta una propagación de calor a través de todo el volumen del elemento debido a las características mecánicas que presenta el material, además, se da una concentración del efecto térmico en una pequeña sección del material, dando como resultado la fusión y en ciertas ocasiones la evaporación de un cierto volumen de material [10].

Al producirse la descarga eléctrica a través del medio dieléctrico, se genera un cráter que toma la forma de una semiesfera, donde su volumen es dependiente de ciertos factores como lo es: el tipo de dieléctrico empleado, la cantidad de energía utilizada, el tiempo en el cual se da la descarga, las propiedades que se encuentran en base a la composición química del material del electrodo y del elemento a ser mecanizado [10]. Los efectos que presenta la chispa conjuntamente con el dieléctrico utilizado cuando éste se encuentra en estado líquido, tal es el caso de los aceites. Se presenta mayor descarga cuando el proceso se da en un medio gaseoso. La figura 1, muestra un resultado lógico en cuanto a la descarga producida en un medio gaseoso.



Figura 1. Descarga ramificada en un medio gaseoso [10].

Al efectuar la descarga en un medio líquido, éste impide que se distribuya ya que concentra su efecto sobre la sección en contacto con el elemento [10].

### 2.2.3 Características del mecanizado por electroerosión.

El mecanizado por electroerosión se fundamenta en dos de sus propiedades elementales:

- Mediante el proceso de electroerosión se puede mecanizar aceros y ciertos metales o aleaciones duras, que en ocasiones son difíciles de mecanizar por procesos convencionales como lo es el torneado o fresado, ya que al emplear estos métodos se genera un desprendimiento del material. Por tal motivo, es aplicable la técnica de electroerosión recalando que el elemento a ser mecanizado debe ser lo suficientemente conductor en todo su volumen [8].
- El poder mecanizar piezas con aristas de alto grado de complejidad es otra de sus ventajas principales, debido a que el alambre o electrodo toma directamente la forma deseada. Además, no existe el desprendimiento de material lo que conlleva a una mejora en cuanto a la optimización de materia prima [11], [12].

### 2.2.4 Explicación física del proceso.

El proceso se basa en la generación de saltos producidos por descargas eléctricas entre los puntos más cercanos situados entre el electrodo y el material de trabajo, ambos deben estar actuando a través de un medio dieléctrico. Formando una reacción que ocasionará el desprendimiento del material, reproduciendo en el material la pieza o elemento deseado.

En la figura 2, se observa el proceso en el instante en el cual se da la electroerosión [11].

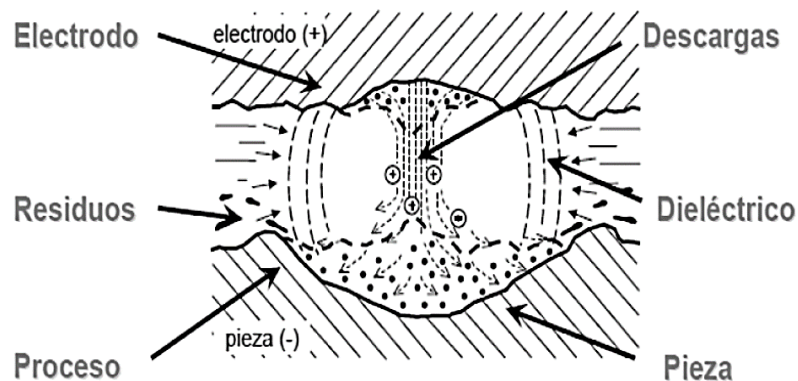


Figura 2. Principio del proceso de electroerosión [12].

El tiempo que tarda en generar la descarga eléctrica se encuentra entre los microsegundos y milisegundos, mientras que la distancia inter-electródica va desde centésimas hasta decimas de milímetro. Tomando en cuenta el espacio reducido entre el electrodo y el material, se da la presencia de ciertas variaciones entre las superficies en contacto debido a la rugosidad natural que presentan [12].

En los puntos máximos de proximidad entre el electrodo y la pieza se encuentra la máxima tensión de disrupción del medio dieléctrico que interactúa en el proceso, ocasionando un canal de elevada conductividad térmica.

#### 2.2.4.1 Proceso de descarga eléctrica.

Al iniciar la descarga eléctrica se observa el efecto de la ionización del fluido dieléctrico y la polarización de ciertas partículas, dando paso a la concentración e intensificación del campo eléctrico. En la figura 3 se puede observar el comportamiento electroquímico que sufre la superficie de corte, al interactuar el elemento de trazo en conjunto con el hilo conductor [12].

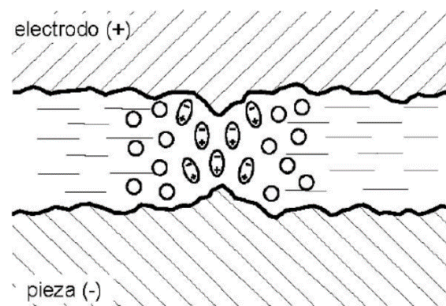


Figura 3. Ionización del fluido dieléctrico [12].

Posterior a la ionización, se observa la presencia o formación del canal de descarga, éste a su vez se encuentra rodeado por iones positivos, comprimiendo la sección se corte, tal como se puede observar en la figura 4.

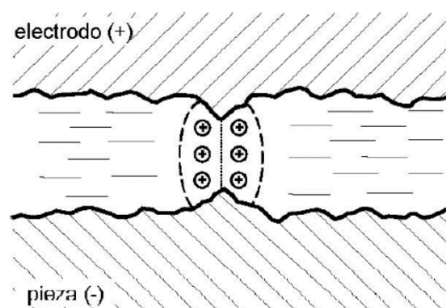


Figura 4. Formación del canal de descarga [12].



Una vez que se haya formado el canal de descarga, se tiene una caída brusca en la resistencia del mismo alcanzando elevados valores de corriente. Además, se origina el aumento en la ionización, esto a su vez, da paso a un elevado campo magnético cerrando aún más el canal de descarga. En la figura 5, se visualiza el comportamiento físico del efecto anteriormente mencionado [12].

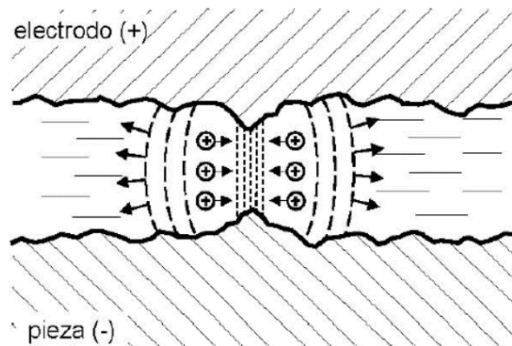


Figura 5. Paso de la corriente a través del canal de descarga [12]

El incremento en cuanto a la velocidad de la corriente, va desde los 10 hasta los 100 millones de amperios por cada segundo; donde se logra alcanzar elevadas temperaturas que llegan hasta decenas de miles de grados en tiempos muy cortos que van en el orden de 2 a 4 microsegundos [12]. En la figura 6, se visualiza la formación de un canal generado por la descomposición del material base.

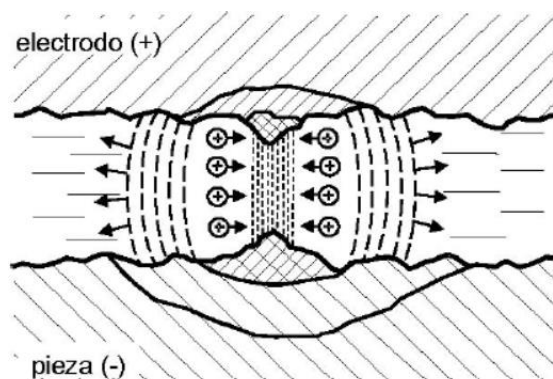


Figura 6. Caída de la resistencia y paso de la corriente por el canal [12].

Como resultado se tiene la fusión del material, y en un cierto porcentaje se presenta la evaporación tanto del material base como del electrodo, inclusive se da la presencia de inclusiones de residuos sobre la superficie, producto de la ruptura del dieléctrico. La

figura 7, presenta una esquematización del resultado final durante el proceso de desbaste [12].

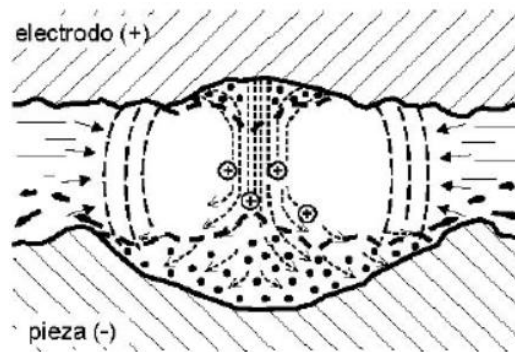


Figura 7. Separación del material producto de la descarga [12].

Finalmente se genera una depresión, donde el dieléctrico obliga a los residuos a salir hacia la superficie del cráter formado. A la vez, impide la transferencia de calor hacia el interior del material base.

Las pausas que se dan entre cada dos descargas es esencial para alcanzar el correcto desarrollo del proceso. En el caso de no existir, se tendría la presencia de una chispa produciendo un arco, algo similar sucedería con la acumulación de residuos en la cavidad de corte [12].

### **2.2.5 Clasificación de los procesos de mecanizado por electroerosión.**

En base a la forma que tiene el electrodo y al tipo de movimiento relativo, se puede subdividir el mecanizado por electroerosión. Dando lugar a la presencia de tres métodos como son:

- Electroerosión por penetración.
- Rectificado por electroerosión.
- Corte por electroerosión.

#### **2.2.5.1 Electroerosión por penetración (EDM).**

Considerado como uno de los métodos más empleados en cuanto a procesos de mecanizado no convencionales; su funcionamiento es a partir del avance continuo y controlado de un electrodo (herramienta), el cual penetra el material en presencia de un medio dieléctrico. En el proceso EDM no se presenta esfuerzos ya que la herramienta no está haciendo contacto con la pieza de trabajo [13].

Dependiendo de la forma del electrodo y de acuerdo a la profundidad que se desee maquinar, se podrá generar secciones pasantes o formas ciegas de difícil disposición por medio de procesos tradicionales. La figura 8, muestra un ejemplo del proceso de mecanizado.

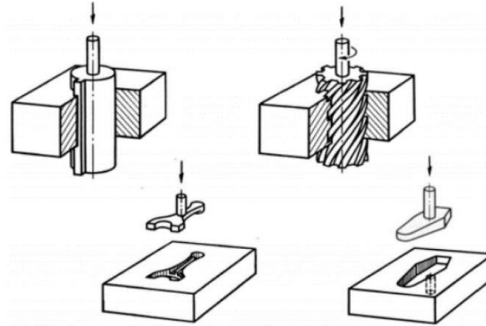


Figura 8. Separación del material producto de la descarga [13].

Puede existir ocasiones en las que la polaridad entre la herramienta y la pieza deseada se invierta. Si la herramienta se desgasta, se debe desplazar a la pieza manteniendo una distancia de tal forma que sea constante, ya que influye en la calidad del acabado superficial de corte.

Con el mecanizado de electroerosión por penetración se puede obtener acabados superficiales dentro de tolerancias que por lo general están entre  $\pm 0,05$  mm.

La herramienta para el mecanizado debe poseer ciertas características esenciales como: una elevada temperatura de fusión alta resistencia al desgaste. Materiales como el grafito cuentan con las propiedades anteriormente mencionadas. Además, presentan alta conductividad eléctrica lo que le convierte en el elemento más óptimo para la fabricación de este tipo de electrodos. En la figura 9 se observa modelos de electrodos empleados en el proceso EDM.



Figura 9. Electrodos de forma. [12]

### 2.2.5.2 Rectificado por electroerosión.

En el caso del rectificado por electroerosión, la herramienta cuenta con un movimiento de rotación. Su proceso es idéntico al de un rectificado convencional, con la diferencia que no se presenta desprendimiento o arranque de material ya que no entra en contacto directo la herramienta con el material a ser procesado. El bajo campo de aplicación limita el desarrollo del rectificado por electroerosión [13].

### 2.2.5.3 Corte por electroerosión por hilo (WEDM).

El proceso WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) se diferencia de los procesos anteriores por el tipo de electrodo empleado, ya que éste no influye en la forma final de la pieza. El diámetro del hilo puede ir desde los 0,025 [mm] hasta los 0,3 [mm], con la gran diferencia que en este proceso es necesario controlar el movimiento relativo entre el hilo y el material.

Éste método tiene dos grandes ventajas al momento de mecanizar, ya que aumenta la rapidez debido al espesor del mismo y el desgaste del electrodo no influye en la precisión del mecanizado. La figura 10 muestra un ejemplo del proceso [13].

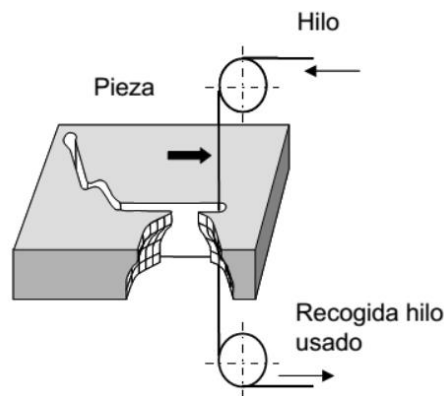


Figura 10. Mecanizado mediante el proceso de electroerosión por hilo. [13]

#### 2.2.5.3.1 Características de los equipos WEDM.

##### - Unidad de filtrado.

Cuenta con una unidad de filtro de papel y filtro automático mineral, con una calidad de filtrado de 3  $\mu\text{m}$ . La deionización se realiza mediante resinas de lecho mixto, puede ser programable en un rango de 2 a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  [14].

##### - Control CNC.

Cuenta con un sistema perfecto de erosión que selecciona automática los parámetros del generador, se alinea automáticamente los ejes de la máquina con los ejes de la pieza con rotación automática del programa según la posición de la pieza en la mesa. La programación se puede realizar en modo asistido o directamente utilizando el editor ASCII. El lenguaje de programación emplea código ISO estándar, el CNC incorpora también un control de sintaxis automático. Además, cuenta con un control multimedia, archivo histórico ciclos automáticos, selección del régimen de trabajo automáticamente a través de la definición del diámetro del hilo, del espesor de la pieza y del material electrodo/pieza, Interpolación lineal/circular XY-UV, función de Corte Cónico con Angulo Constante (ISOCONO) y Función Corte Cónico con Radio Constante (ISORADIO) [14].

- **Generador.**

Uno de los elementos más importantes, se encarga de proporcionar descargas o impulsos para generar una tensión de inicio o encendido. Además, limita la cantidad de corriente, el tiempo de descarga y frecuencia durante el proceso [14].

**2.2.5.3.2 Parámetros de corte.**

- **Potencia.**

Se tiene un rango establecido de acuerdo a los niveles de energía que se vaya a seleccionar, el cual va desde 0 a 15 [W]. Para regímenes de desbaste, los valores se encuentran entre 8 y 15, en cuanto a acabados la potencia decae a valores comprendidos en el rango de 0 a 7.

Según Camprubí Graell, cuando la potencia este directamente asociada a una corriente continua, se podrá determinar mediante la ecuación 1 [15].

$$P = R * I^2 = \frac{V^2}{R} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

V: Tensión aplicada, medida en voltios (v).

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

R: Resistencia del capacitor, medida en ohmios ( $\Omega$ ).

P: Potencia medida en vatios (w).

Al no presentar cambios en la corriente y mantenerse constante durante un lapso de tiempo, se presenta una nueva forma para determinar la potencia, para lo cual se aplica la siguiente ecuación [15].

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

Donde:

W: Energía desarrollada en julios (J).

t: Tiempo (s).

- **Tensión de vacío.**

Muestra el potencial durante el proceso de ionización, su rango de aplicación va desde los 100 a 250 [v]. a mayores niveles de tensión mayor será la energía de descarga aumentando la tasa de arranque alcanzando valores altos en cuanto a la calidad superficial. Además, al incrementar el valor de la tensión en vacío corre el riesgo que se rompa el hilo de corte [15].

- **Servo.**

Muestra la diferencia de tensión teórica entre el hilo y la pieza durante el proceso de corte, controlando su distancia. EL servo mantiene un rango de 1 a 256 voltios, donde a mayor voltaje se incrementará el tamaño del canal de descarga; mientras que el tiempo de ionización y la tasa de arranque disminuyen. Al reducir el valor de voltaje en el servo, se provoca un aumento en la velocidad de corte [15].

- **Tensión del hilo.**

La tensión mecánica del hilo puede ser seleccionada en base a niveles, donde su máximo valor es de 31 kgf. El valor de la tensión mecánica no influye sobre la tasa de arranque del material o rugosidad en el corte [15].

- **Velocidad del hilo.**

Se encuentra en base a la altura a la cual se encuentra el material con respecto a la boquilla. Para piezas con espesores considerables es recomendable aumentar la velocidad con la finalidad de homogeneizar el corte. La velocidad del hilo no influye sobre la separación “gap”, pero si éste es pequeño puede generarse el contacto entre la herramienta y la pieza produciendo un corto circuito, esto ocasionaría un incremento en la temperatura provocando la transferencia de material entre los dos elementos [14], [15].

- **Velocidad de corte.**

Su uso principal es al momento de realizar repasos para el mejorar el acabado superficial limitando y, a la vez, estabilizando el proceso de erosión. Además, se encuentra ligado con los generadores de impulso [16].

**2.2.5.3.3 Parámetros de control de pulso**

El ciclo de funcionamiento durante el proceso de electroerosión se representa en la figura 11, donde se muestra la relación de las siguientes variables:

- $t_p$ : periodo
- $t_d$ : tiempo de ionización
- $t_r$ : tiempo de descarga
- $t_i$ : tiempo de impulso
- $t_o$ : tiempo de pausa
- $U_o$ : tensión de vacío
- $U_f$ : tensión de descarga

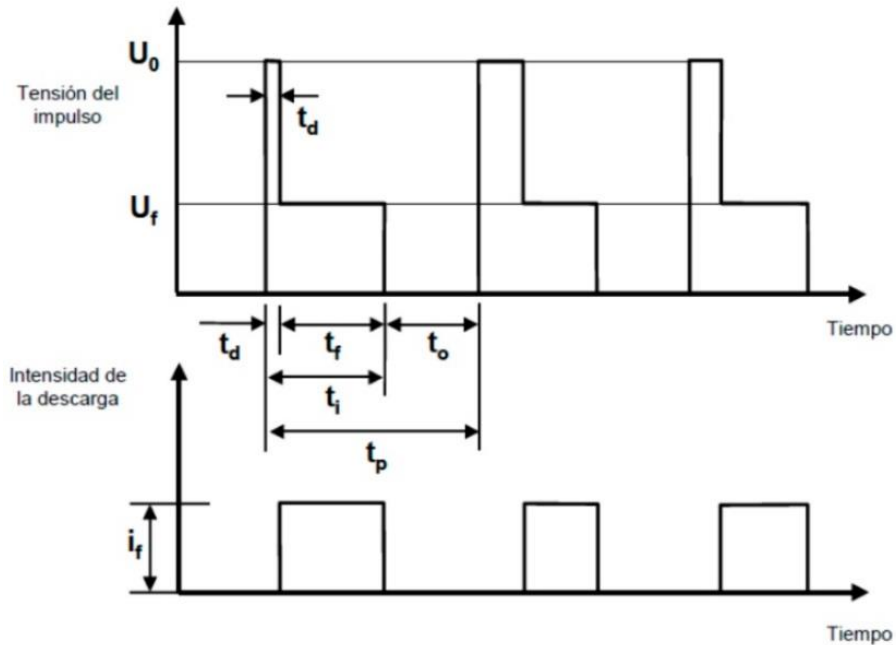


Figura 11. Ciclo de funcionamiento del proceso por electroerosión [16].

El periodo es la duración total de cada ciclo del proceso, se lo puede determinar mediante la suma del tiempo de impulso y el tiempo de pausa. El tiempo de ionización genera un pequeño retraso al aplicar la tensión, dando paso a la formación de picos.

El tiempo de descarga se forma por la acción de la intensidad de descarga en una determinada tensión [16].

El tiempo de impulso se presenta en la erosión entre los dos materiales (electrodo y material base). En el intervalo de tiempo que dura un impulso final y el inicio del siguiente está presente el tiempo de pausa. La tensión en vacío se da entre el electrodo y la pieza en un instante inicial justo antes de incrementar la descarga y dar paso a la tensión de descarga final [16], [17].

### **2.2.6 Características del hilo - electrodo**

Para obtener mayor rendimiento en el proceso de corte por hilo se debe conocer las propiedades que debe cumplir el hilo (electrodo) de corte, tales como:

- **Conductividad térmica.**

Al tener una buena conductividad térmica, el hilo será capaz de difundir con rapidez el calor provocado por las descargas. Se puede medir en términos de IASC, comparando con la conductividad del cobre puro al 100% [17].

- **Resistencia a la tracción.**

El hilo debe tener la capacidad de resistir la tensión generada al momento de realizar el proceso de corte [17].

- **Elongación.**

El material del cual está conformado el hilo debe ser capaz de deformarse hasta antes de romperse [17].

- **Punto de fusión.**

Mientras más alto sea el punto de fusión, menor será el desgaste del electrodo producto de las continuas descargas eléctricas a las que se encuentra expuesto el hilo de corte [17].

#### **2.2.6.1 Tipos de alambres.**

Existen ciertos tipos de alambres, los cuales son elegidos de acuerdo a la aplicación a realizarse. En la tabla 2 se observa los tipos de alambres más comunes dentro del proceso de electroerosión por hilo. La velocidad de avance dependerá de la composición química que posea el hilo de corte, el cual se lo contempla como la herramienta de desbaste.



Tabla 2. Tipos de alambres comúnmente empleados [18].

<b>TIPO DE MATERIAL</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>
Alambre de Cobre	Alta conductividad eléctrica y térmica. Debido a su baja resistencia a la tracción, no se lo emplea con frecuencia.
Alambre de latón (65% Cu 35% Zn)	Uno de los elementos ampliamente utilizados durante el proceso debido a su buena conductividad y alta resistencia a la tracción.
Alambre de Molibdeno	Se lo utiliza en aplicaciones donde es necesario una alta resistencia a la tracción con diámetros pequeños. Tiene baja conductividad, pero posee un alto punto de fusión.
Alambre de Tungsteno	Presenta un alto punto de fusión y alta resistencia a la tracción, es por ello que sus propiedades son mejores que las del molibdeno.
Alambre con recubrimiento de Zinc	Generalmente son de Cobre o Latón con recubrimiento de Zinc, mejorando sus propiedades.

### 2.2.7 Fluido de corte.

El fluido dieléctrico tiene como objetivos lubricar la zona de corte, mejorar la productividad, reducir tiempo de producción, costo y mejorar la calidad final en las piezas trabajadas. Además, es empleado como medio de arrastre del material electro erosionado. La efectividad de un dieléctrico depende de la rapidez con la cual el material es separado, asegurando que se produzca correctamente la descarga total de la energía de pulso creada por la fuente [18].

Un fluido dieléctrico deberá cumplir con tres funciones importantes en el proceso de electroerosión como son:

- Actúa como aislante entre el hilo de corte y la pieza concentrando las descargas eléctricas en la zona de corte. En el instante en el que el dieléctrico se ioniza, permite el paso de una pequeña cantidad de corriente eléctrica generando un aumento en la ionización, por lo cual la resistencia del dieléctrico desciende bruscamente produciendo una descarga. Finalizado el impulso, el fluido se des-ioniza dando paso a la siguiente descarga y formar el canal de corte [18].
- Proporciona un enfriamiento necesario en la superficie de corte, donde el proceso de electroerosión presente incrementos en su temperatura dando paso a la fusión

o a su vez la evaporación del material, es por ello que se requiere enfriar al hilo conductor (electrodo) y a la pieza de trabajo con la finalidad de preservar sus propiedades iniciales evitando cambios en su estructura por efecto del cambio de temperatura [19].

- Finalmente, el fluido dieléctrico deberá arrastrar toda partícula producida durante la electroerosión, ya que por lo general quedan suspendidas en el gap entre la pieza y el hilo. Al extraer la escoria se minimiza la adhesión de éstas sobre la superficie de la pieza y del electrodo. Evitando cambios sobre el acabado superficial de la pieza y tiempo de mecanizado [19].

Hoy en día se realizan investigaciones con la finalidad de sustituir ciertos dieléctricos que son nocivos para la salud. El uso convencional de taladrina como medio dieléctrico de refrigeración genera gran cantidad de contaminantes. En la tabla 3 se presenta varios fluidos recomendados para procesos por electroerosión en base al porcentaje de desgaste de la herramienta [20].

Tabla 3. Clasificación de dieléctricos en función de la tasa de desgaste de la herramienta [20].

Tipo de fluido dieléctrico	Material de la herramienta de corte			
	COBRE		GRAFITO	
	Tasa de desgaste del electrodo (mm <sup>3</sup> /min)	Desgaste volumétrico relativo (%)	Tasa de desgaste del electrodo (mm <sup>3</sup> /min)	Desgaste volumétrico relativo (%)
Maíz	2,3	1,8	2,2	1,7
Algodón	0,9	0,3	0,7	0,7
Canola	0,5	0,3	0,4	0,3
Mamona	1,1	0,3	0,9	0,7
Girasol	1,7	1,3	1,8	1,3
Aceite Mineral	0,9	0,3	0,6	0,7
Kerosene	1	1,3	0,7	0,7

Cabe mencionar que las aplicaciones de aceites de tipo vegetal son propensas a la formación de agentes que permiten la proliferación del fenómeno conocido como oxidación, lo cual hace que estos medios dieléctricos sean investigados a mayor detalle.

### **2.2.7.1 Tipos de dieléctricos.**

#### **- Sub derivados de hidrocarburos**

Aquellos líquidos procedentes de hidrocarburos como el queroseno, hidrocarburo activado, diésel, etc., son empleados en este tipo de proceso. Su principal característica es soportar temperaturas moderadas, las cuales van desde los 75 hasta los 150°C. Además, deben poseer una viscosidad entre los 6 a 20 cSt. Son ampliamente utilizados ya que permiten la obtención de piezas con un buen acabado superficial.

Su principal desventaja está sujeta a la producción de gases por el efecto electroquímico que se presenta por la descarga eléctrica a través del electrodo. Después de su uso, son considerados como elementos altamente contaminantes hacia el medio que lo rodea [21].

#### **- De carácter ecológico**

El agua destilada considerado como un medio dieléctrico ecológico, es uno de los tantos medios dieléctricos que son aplicados e investigados en procesos por descarga eléctrica, ya que aumentan al máximo su resistividad y evita la conductividad de la corriente debido al efecto electrolítico. Una de sus desventajas es permitir la presencia de la oxidación, la cual afecta de forma directa sobre la superficie mecanizada e inclusive al equipo [22]

Medios dieléctricos a base mezclas efectuadas por agua y aditivos ha permitido una mayor aplicación si se trata de mejorar la calidad superficial, varios efectos como el uso de glicerina altamente concentrada ha alterado el estado superficial del elemento mecanizado ya que lo vuelve más duro. Además, se ha visto la aplicabilidad para el proceso de desbaste mas no si se trata de obtener una buena calidad superficial.

Leão F. y Pashby I [23], en su estudio relacionado a la aplicabilidad de medios eléctricos amigables con el medio ambiente en cuanto a su uso en equipos de electroerosión, analizan la posibilidad de aplicar medios gaseosos durante el proceso de mecanizado como lo es la mezcla de aire y O<sub>2</sub> ya puede ser mejor que usar un medio líquido. Además, reconocen que la aplicabilidad se restringe para un número muy limitado de aceros y que sería necesario la implementación de vibraciones ultrasónicas en la pieza de trabajo, ya que ayudaría a eliminar rápidamente el metal fundido.

A nivel nacional no se ha realizado investigación alguna que permita la selección de un medio dieléctrico y más aun de carácter ecológico. Razón por la cual se ve la

necesidad de importa cierto producto con el fin de realizar la experimentación respectiva y así lograr confirmar su uso al menos a nivel local.

Para lo cual, se optó por la revisión de ciertas casas comerciales, quienes ofertaban el producto requerido para la investigación correspondiente. La empresa SKF (colombiana) oferta cierto producto como el “LUV 200”, fluido biodegradable al 98% de carácter sintético adaptado a procesos de corte por electroerosión. Posee un alto nivel de resistencia térmica y no posee componentes tóxicos. Por otra parte, la empresa SENIGRUP, S.L. (española) ofrece un refrigerante de corte ecológico denominado “TL-ECO250-MG” apto para procesos de mecanizado de todo tipo de aleaciones en especial para corte de aceros y aluminios. Es un producto autoemulsionable constituido por una mezcla de cierto aditivos anticorrosivos, emulgentes y conservantes.

Inconvenientes durante el trascurso de adquisición con la empresa SKF debido a que el producto por el momento no se disponía en dicho país, y debido al volumen que solicitaba se haga en el proceso de compra hizo que desistiera de la misma tomando como segunda opción la importación del TL-ECO250-MG el cual se encontraba disponible a la brevedad inmediata y que además el valor de importación por el mismo fue accesible.

### 2.2.8 Parámetros de mecanizado

Dependiendo de las características que posea el equipo, es posible considerar ciertos parámetros de mecanizado. En la tabla 4 se puede visualizar los factores de control, mientras que en la tabla 5 se identifica los parámetros que permanecen fijos durante el proceso de corte [20].

Tabla 4. Configuración de factores de control [20].

<b>Factores de control</b>	<b>Símbolo</b>
Corriente de descarga	A
Duración de pulso	B
Frecuencia del pulso	C
Velocidad del hilo de corte	D
Tipo de dieléctrico	E

Tabla 5. Parámetros fijos en el proceso de corte [20].

<b>Parámetros fijos</b>	
Hilo de corte	Hilo de cobre con recubrimiento de zinc, estratificado, con diámetro de 0.25 mm
Forma	Productos rectangulares o circulares.
Ubicación de la pieza en la mesa de trabajo.	En el centro de la mesa.
Ángulo de corte	Vertical
Dimensión de la pieza de trabajo	Espesor =5 mm Diámetro = 25 mm
Tensión del hilo	Constante
Caudal del fluido de corte	Constante
Estabilidad	Servo control

Por otra parte, en la tabla 6 se observa diferentes configuraciones de la corriente de descarga, frecuencia y tiempo de pulso, velocidad de alimentación del hilo, velocidad del fluido dieléctrico y tensión del hilo de corte [20].

Tabla 6. Factores de control por niveles [20].

<b>FACTOR DE CONTROL</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>NIVEL</b>	
		<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>
Corriente de descarga	<b>A</b>	1.0	3.0
Duración del pulso	<b>µs</b>	3.20	6.40
Frecuencia del pulso	<b>KHz</b>	40.00	50.00
Velocidad del hilo de corte	<b>m/min</b>	76.0	80.0
Volumen total de dieléctrico (ecológico y convencional)	<b>L</b>	2.0	2.5

### 2.2.9 Rugosidad

La rugosidad superficial se cuantifica en términos a base de parámetros relativos, a su vez, varía de acuerdo al método de mecanizado, es así que para mecanizados convencionales la rugosidad es convencional mientras que en los no convencionales la rugosidad es multidireccional.

Cuando se realiza un mecanizado a través de un plano perpendicular a la superficie del material se obtiene un perfil con como muestra la figura 12. Al tomar una longitud (L) como referencia se observa valores de rugosidad media (Ra) y máxima (Rt), medidas en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) [24].

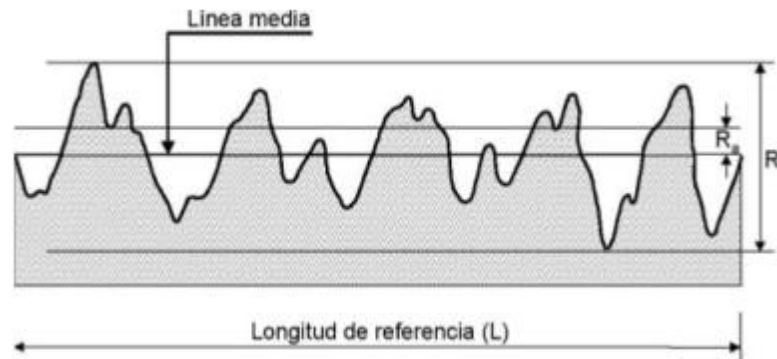


Figura 12. Perfil de un material después del mecanizado [24].

La rugosidad superficial depende de cuatro factores fundamentales al momento de mecanizar el material, estos son:

- Tiempo generado entre pulsos.
- Nivel de intensidad de corriente.
- Propiedades del electrodo y material base.
- Medio dieléctrico aplicado.

### 2.2.9.1 Medidas de la rugosidad

- Rugosidad media (Ra).

Es la media aritmética de las distancias de los puntos del perfil real con relación a la línea central, es decir, representa el valor a lo largo de la línea de referencia preestablecida.

- Rugosidad máxima (Rt).

Corresponde a la distancia que existe entre dos líneas paralelas a una línea central, es decir, es la medida que une los límites tanto superior como inferior con respecto a un valor central [24].

### 2.2.9.2 Grado de rugosidad superficial.

En la tabla 7 se indica el grado de acabado superficial en función de la rugosidad media obtenida en micrómetros y micropulgadas.

Tabla 7. Grados de rugosidad superficial [25].

VALORES DE RUGOSIDAD (RA) EN MICRAS		GRADOS DE CALIDADES DE RUGOSIDAD
$\mu\text{m}$	$\mu\text{ in}$	
50	2000	N12
25	1000	N11
12.5	500	N10
6.3	250	N9
3.2	125	N8
1.6	63	N7
0.8	32	N6
0.4	16	N5
0.2	8	N4
0.1	4	N3
0.05	2	N2
0.025	1	N1

Donde, el valor de la rugosidad media alcanzada en la zona donde se produce el corte, caracteriza la calidad final alcanzada por el proceso de mecanizado.

Por otra parte, en la tabla 8 se observa los valores de rugosidad superficial correspondiente al proceso de electroerosión, dentro de los métodos más representativos de fabricación de piezas mecánicas.

Para el presente caso de estudio, nos enfocaremos en los valores indicados por la norma ISO 1302 en cuanto al mecanizado por electroerosión, donde se identifica el valor máximo y el valor mínimo de rugosidad que se podrían obtener durante el proceso de corte. Cabe mencionar que igualmente dependerá de las condiciones de trabajo y características técnicas de las cuales se identifique el equipo de corte.

Tabla 8. Valores de rugosidad superficial [24].

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

### 2.3 Fundamentación Filosófica

EL presente trabajo investigativo se encuentra ubicado en el paradigma crítico propositivo, ya que parte de una problemática real de nuestro medio, como lo es el mecanizado de pizas con geometrías complejas, con el objetivo de conocer la influencia de un nuevo dieléctrico sobre los parámetros de corte, a la vez establecer un análisis comparativo con el fin de determinar que dieléctrico actúa de mejor manera sobre el acabado superficial del elemento o pieza, ya que será un aporte significativo



para el área de mecanizado no convencional, y así ser más competitivos entregando productos de calidad sin generar subproductos que alteren a la salud y al medio.

#### **2.4 Fundamentación legal.**

El reglamento de posgrado de la Universidad Técnica de Ambato, en el Título I muestra el funcionamiento Académico y Administrativo de los Programas de Posgrado que se oferta, en dicho reglamento se norma, regula y además orienta las distintas actividades académicas de los estudios y programas de posgrado. Según la resolución 0109-CU-P-2019, en una parte del artículo 69 resuelve que el trabajo de titulación deberá ser el resultado investigativo, académico o artístico, además en el mismo el estudiante deberá demostrar el manejo de los conocimientos adquiridos durante sus estudios de cuarto nivel en el trayecto de su formación.

Entre los objetivos del reglamento de posgrado se indica el garantizar la alta calidad que extienda a la excelencia académica, así como el fortalecimiento de la investigación, formación académica como profesional, además se menciona el desarrollo de investigaciones relacionadas al desarrollo humano y a un mejor estilo de vida.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos del estudio se encontraran a libre acceso, por lo cual podrán ser utilizados por quien así lo requiera, con énfasis en la industria del mecanizado a través de procesos no convencionales como lo es el WEDM, que hace uso de los parámetros de corte en relación al acero k100 comúnmente empleado en el sector matricero, además con este estudio se desea mejorar la rugosidad y dureza superficial del corte a través de la aplicación de un medio ecológico y así obtener piezas con características similares o mejores a las obtenidas al emplear como medio dieléctrico la taladrina; todo esto será comprobado bajo normativas que regulen el grado de rugosidad (ISO 1997) al igual que la dureza (ASTM E18-15) adquirida durante la operación del equipo de corte. Por todo lo mencionado, se alcanzará un gran aporte a la industria, ya que la investigación anteriormente propuesta se encuentra alineada a los objetivos planteados por el reglamento, además de ello, es pertinente con lo mencionado, por lo cual la misma se sostiene dentro del marco legal de posgrados en el país.

## 2.5 Categorías fundamentales

En la figura 13 se observa la relación que presenta las variables dependientes e independientes a través de su categorización. Donde, aquella identificada como independiente se encuentra direccionada al proceso de manufactura, mientras que las de salida, se enfocan al control de la calidad.

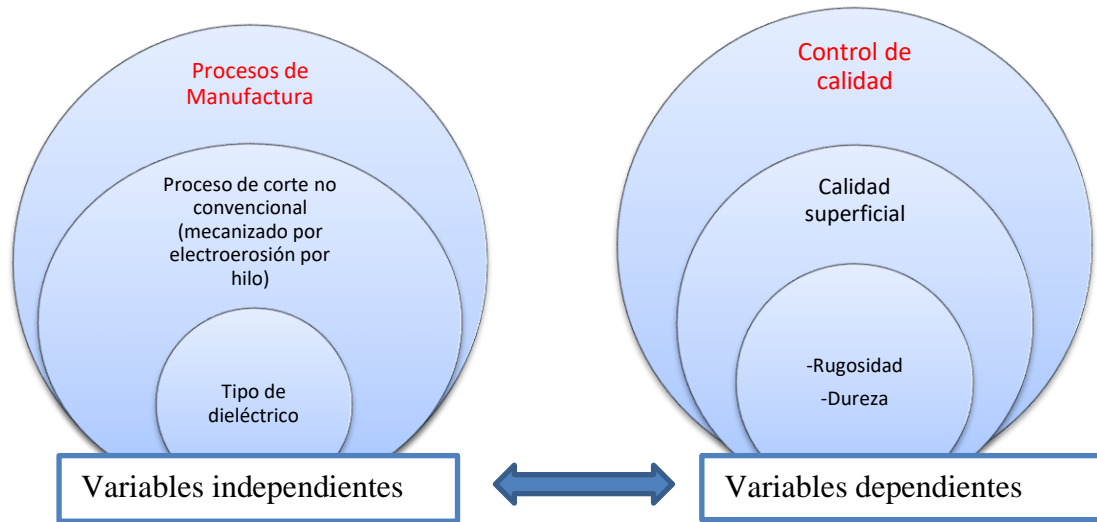


Figura 13. Categorías fundamentales

## 2.6 Hipótesis

La aplicación de un medio dieléctrico ecológico permitirá mejorar tanto la rugosidad como la dureza en la superficie o sección de corte, en el mecanizado del acero K100 mediante el proceso WEDM.

## 2.7 Señalamiento de variables

### 2.7.1 Variable independiente

Análisis de un dieléctrico ecológico en el maquinado del acero K100 mediante el proceso de electroerosión WEDM.

### 2.7.2 Variable dependiente

Rugosidad superficial.

### **2.7.3 Término de relación**

Influencia.

## **CAPÍTULO III**

### **3.1 Enfoque**

La presente investigación tendrá un enfoque mixto, ya que se utilizará métodos cuantitativos y cualitativos tomando como fuentes a libros, tesis, normas, artículos y revistas técnicas relacionadas a procesos de fabricación no convencionales con la finalidad de determinar los parámetros adecuados de mecanizado mediante el proceso de electroerosión por hilo con la aplicación de un dieléctrico ecológico y su influencia en la rugosidad y dureza superficial resultante.

### **3.2 Modalidad Básica de la investigación**

La presente investigación se encuentra dentro de las siguientes modalidades:

#### **3.2.1 Bibliográfica**

Debido al campo de aplicación, es necesario realizar una profunda investigación y contextualización de temas y teorías con la finalidad de conocer y comparar ciertos enfoques o criterios dados por diferentes autores sobre el tema en común.

La investigación que se ha planteado hace referencia a fuentes de carácter documental de altas revistas científicas como Scencedirect, Scopus Springer, etc, uso de diversas bibliografías; permitiendo la capacidad de efectuar un análisis crítico, para llegar a resolver varios problemas como el planteado. El propósito efectuado en esta modalidad fue la recolección de información, la misma que se profundizo a cabalidad de acuerdo a las necesidades de la investigación.

Así pues, se realizó varias comparaciones en cuanto a las metodologías empleadas y enfoques realizados que permitan la obtención de un sustento fundamentado sobre la investigación acerca de la influencia de un medio dieléctrico ecológico sobre la rugosidad y dureza superficial en la zona de corte.

### **3.2.2 De campo**

Se efectuará la extracción de 32 muestras a través del proceso de corte por electroerosión por hilo sobre una barra de acero k100 variando los parámetros de operación y empleando dos medios dieléctricos, uno de carácter convencional como la taladrina y el otro propiamente ecológico, los cuales serán aplicados sobre la sección en contacto entre el hilo y la pieza para que se dé el efecto electro-erosivo; para posteriormente analizar y visualizar su estado superficial como lo es a través de la rugosidad, dureza en la superficie donde se presenta el corte. Además, se complementará el estudio mediante un análisis topográfico que permita establecer la presencia de imperfecciones o alteraciones en la zona mecanizada.

Cabe recalcar que se ejecutarán ensayos pre-experimentales relacionados con el funcionamiento del equipo de electroerosión, al igual que un primer experimento con el fin de identificar cómo influyen las variables durante el proceso de mecanizado; y finalmente obtener aquellos elementos experimentales que permitan realizar el sustento de la investigación de campo a ser ejecutada.

### **3.3 Nivel o tipo de investigación**

Para el presente proyecto se empleará los siguientes tipos de investigaciones:

#### **3.3.1 Investigación experimental**

Se realizarán ensayos de mecanizado mediante electroerosión por hilo en el acero K100 variando los parámetros de operación como lo es la intensidad de corriente, velocidad de avance, rapidez del hilo, y aplicando un dieléctrico ecológico, con la finalidad de obtener valores bajos en cuanto a la rugosidad superficial.

#### **3.3.2 Investigación prospectiva**

El tipo de investigación es de carácter prospectiva, de acuerdo a la planificación de la toma de datos, ya que se manipulará los parámetros que intervienen en el experimento en función a los propósitos que se presenta en la investigación.

### 3.4 Población y muestra

#### 3.4.1 Población

La población de estudio que se hace referencia en este proyecto, son probetas de acero K100 mecanizadas mediante el proceso de electroerosión por hilo aplicando un dieléctrico convencional y un ecológico; con la finalidad de evaluar y comparar la rugosidad y dureza superficial en el corte.

#### 3.4.2 Muestra

A partir de los factores (intensidad de corriente, velocidad de avance, rapidez del hilo de corte y tipo de dieléctrico) a ser controlados durante el proceso, se establece los niveles de operación, tomando en cuenta las características que ofrece el equipo empleado para la obtención de las muestras y bajo el criterio de estadísticos, quienes sugieren la cantidad de tratamientos a ser aplicados en el proceso [27].

En la tabla 9 se observa la cantidad total de muestras a obtenerse en función al número de parámetros de los cuales dependerá el proceso de operación. De acuerdo al tratamiento a realizarse, se espera un diseño factorial  $2^4$ , es decir, a dos niveles.

Tabla 9. Réplicas o corridas en función al diseño factorial [27].

Diseño	Réplicas recomendadas	Número de corridas
$2^2$	3 o 4	12, 16
$2^3$	2	16
$2^4$	1 o 2	16, 32
$2^5$	fracción $2^{5-1}$ 0 1	16, 32
$2^6$	fracción $2^{6-2}$ o fracción $2^{6-1}$	16, 32
$2^7$	Fracción $2^{7-3}$ o fracción $2^{7-2}$	16, 32

Por lo tanto, el número total es de 32 probetas, a obtenerse de acuerdo a los niveles indicados con sus respectivas réplicas o repeticiones.

##### 3.4.2.1 Metodología de Taguchi.

Una vez comprendido los parámetros que intervienen en el proceso de corte por electroerosión e identificado cuales son los resultados que se desea obtener, se ve la necesidad de especificar un método de cálculo que permita generar relaciones entre sí.

La metodología de Taguchi tiene como objetivo disminuir considerablemente el número de ensayos a realizar, minimizando tiempo, material y gasto energético. Para lo cual es necesario determinar las causas por las cuales existen variaciones en un proceso, además de ello, conocer la capacidad del mismo sin perder de vista el entorno donde se fabrica.

**- Selección de la matriz ortogonal.**

El equipo empleado para el proceso de obtención de las muestras, corresponde a una máquina electroerosionadora de hilo modelo DK 7735, donde los parámetros a ser manipulados son los siguientes: Cantidad de corriente aplicada en amperios, velocidad de avance en mm/min, rapidez del hilo de corte en m/min y propiamente el tipo de dieléctrico aplicado. Cada uno de ellos establecen valores máximos y mínimos de trabajo.

Una vez determinado los parámetros de corte y asignado el número de niveles, se procede a la selección de la matriz ortogonal, la cual para nuestro caso de estudio es una matriz L32. La tabla 10 muestra el arreglo de factores y niveles para nuestro caso de estudio.

Tabla 10. Matriz ortogonal L<sub>32</sub>.

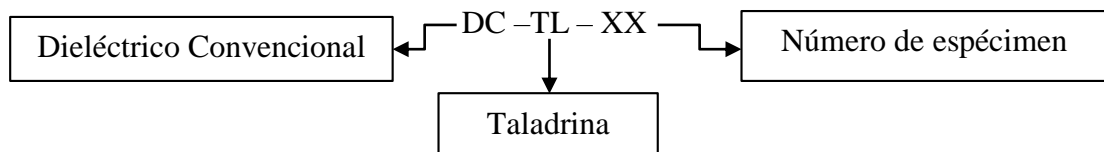
Número de tratamientos	Corriente (A)	V - F (avance mm/min)	Rapidez_hilo (m/min)	Dieléctrico
1	1,5	80	50	1
2	2,5	80	50	1
3	1,5	120	50	1
4	2,5	120	50	1
5	1,5	80	110	1
6	2,5	80	110	1
7	1,5	120	110	1
8	2,5	120	110	1
9	1,5	80	50	2
10	2,5	80	50	2
11	1,5	120	50	2
12	2,5	120	50	2
13	1,5	80	110	2
14	2,5	80	110	2
15	1,5	120	110	2
16	2,5	120	110	2
17	1,5	80	50	1

18	2,5	80	50	1
19	1,5	120	50	1
20	2,5	120	50	1
21	1,5	80	110	1
22	2,5	80	110	1
23	1,5	120	110	1
24	2,5	120	110	1
25	1,5	80	50	2
26	2,5	80	50	2
27	1,5	120	50	2
28	2,5	120	50	2
29	1,5	80	110	2
30	2,5	80	110	2
31	1,5	120	110	2
32	2,5	120	110	2

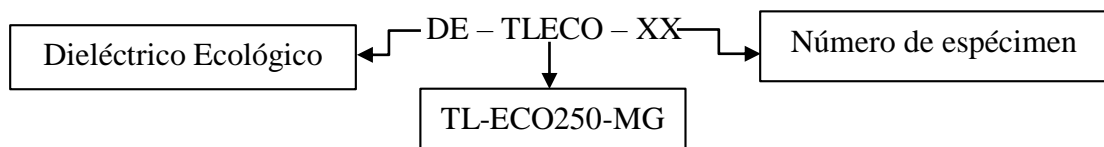
Fuente: Autor

Para el análisis correspondiente, se ha denominado como 1: a aquel dieléctrico de carácter convencional, que comercialmente se lo conoce como taladrina, mientras que se denomina como 2: a aquel que es de carácter degradable, que para el presente caso investigativo se lo contempla como ecológico.

Es necesario diferenciar cada muestra obtenida en el proceso, para ello se presenta una nomenclatura que identifica a aquellas obtenidas bajo la aplicación de la taladrina. La codificación se expresa de la siguiente manera:



De igual manera al emplear aquel dieléctrico ecológico se procede a la codificación de cada espécimen de la siguiente manera:





### 3.5 Operacionalización de variables

#### 3.5.1 Variable Independiente

Tabla 11. Operacionalización de variable independiente.

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>En el proceso de obtención de piezas con geometrías complejas, el corte por electroerosión ha sido el más significativo, donde los diferentes parámetros se determinaron que son: la intensidad de descarga, los tiempos que intervienen en el proceso como el tiempo de impulso, el tiempo de trabajo, entre otros parámetros con el fin de reducir los tiempos de trabajo, el costo que representa y el desgaste de las herramientas a utilizar [1].</p> <p>Fluido de corte no conductor de la electricidad en el cual se hallan inmersos el electrodo y la pieza y en el seno del cual tienen lugar las descargas. Su función principal es el de actuar de aislante, pero también actúa como refrigerante y limpiador de las partículas residuales producidas en el proceso el cual las arrastra consigo [2].</p>	<p>Parámetros de corte - proceso WEDM</p> <p>Medio dieléctrico</p>	<p>- Corriente de descarga</p> <p>-Velocidad de avance</p> <p>-Velocidad del hilo de corte</p> <p>-Convencional y alternativo (ecológico)</p>	<p>Amperios [A] Nivel 1: 1,5 Nivel 2: 2,5</p> <p>Milímetros por minuto [mm/min] Nivel 1: 80 Nivel 2: 120</p> <p>Metros por minuto [m/min] Nivel 1: 50 Nivel 2: 110</p> <p>Volumen: 12 L</p>	<p>-Observación directa - Ficha de control</p> <p>-Observación directa - Ficha de control</p> <p>-Observación directa - Ficha de control</p> <p>-Observación directa - Ficha de control</p>

Fuente: Autor.

#### 3.5.2 Variable Dependiente

Tabla 12. Operacionalización de variable dependiente.

CONCEPTUALIZACIÓN	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>La calidad superficial está definida por la micro geometría y sus características, dependiendo del campo de aplicación de la pieza elaborada, a su vez está conformada por irregularidades en la superficie que corresponde a huellas generadas por el proceso de obtención, e incluso por otras influencias [3].</p> <p>La rugosidad superficial se cuantifica en términos a base de parámetros relativos, a su vez, varía de acuerdo al método de mecanizado, es así que para mecanizados convencionales la rugosidad es convencional mientras que en los no convencionales la rugosidad es multidireccional [3].</p>	<p>Calidad superficial en la sección de corte.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rugosidad media superficial (Ra)</li> <li>Topografía superficial del corte.</li> <li>Dureza superficial (HRC)</li> </ul>	<p>Rango: 1.6-6.3[<math>\mu\text{m}</math>] Grado: N7-N9</p> <p>Presencia de defectos o alteraciones en la superficie de corte (Visualización a aprox.: 10 <math>\mu\text{m}</math>)</p> <p>Máximo: 24 [HRC]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Observación</li> <li>Norma: ISO 1997</li> <li>Palpador - rugosímetro Mitutoyo SJ210.</li> <li>Observación</li> <li>Microscopia electrónica de barrido (SEM)</li> <li>Observación</li> <li>Norma: ASTM E18</li> <li>Indentador-Durómetro Phase II+.</li> </ul>

Fuente: Autor.

## **3.6 Recolección de la información**

### **3.6.1 Observación**

La recolección de datos se realizó mediante la observación directa, predominando el estudio de campo ya que se requiere evaluar y analizar los valores obtenidos del proceso. Además, se controló los parámetros de trabajo en relación a los observados en estudios anteriores.

Se utilizó un rugosímetro Mitutoyo SJ210 para la toma de 5 mediciones, de acuerdo a la norma ISO 1997, en cada sección mecanizada; con la finalidad de obtener un promedio en cuanto a la rugosidad y dureza superficial de corte en la pieza. Se hará uso de fichas de control y recolección de información para la toma de dichos valores. Finalmente se realizará una comparación en cuanto a los resultados obtenidos al aplicar un dieléctrico convencional frente a un ecológico, y así concluir el efecto de los mismos sobre la rugosidad superficial de la pieza en el proceso de mecanizado por electroerosión por hilo WEDM en aceros K100 empleados en conformación de matrices.

### **3.7 Plan de Procesamiento.**

Para la recolección y procesamiento de la información obtenida se debe tomar en cuenta los siguientes lineamientos:

- Revisión detallada de la información más importante en cuanto a contenido bibliográfico que aporte en el análisis de aquellos parámetros que intervienen sobre la rugosidad superficial resultante.
- Corroboración del material base (acero k100)
- Tabulación de variables o parámetros que intervienen en el proceso de corte.
- Calibración del equipo a ser empleado para la extracción de probetas.
- Toma de datos experimentales enfocados al objetivo planteado, y procesamiento de los mismos.
- Medición de valores de rugosidad y dureza obtenidos al variar los diferentes parámetros de corte.
- Toma de imágenes a través de microscopía electrónica, de aquellos especímenes con mayor relevancia.

### **3.8 Plan de Análisis e interpretación de resultados.**

Para el análisis e interpretación se procederá a su realización como se detalla de la siguiente manera:

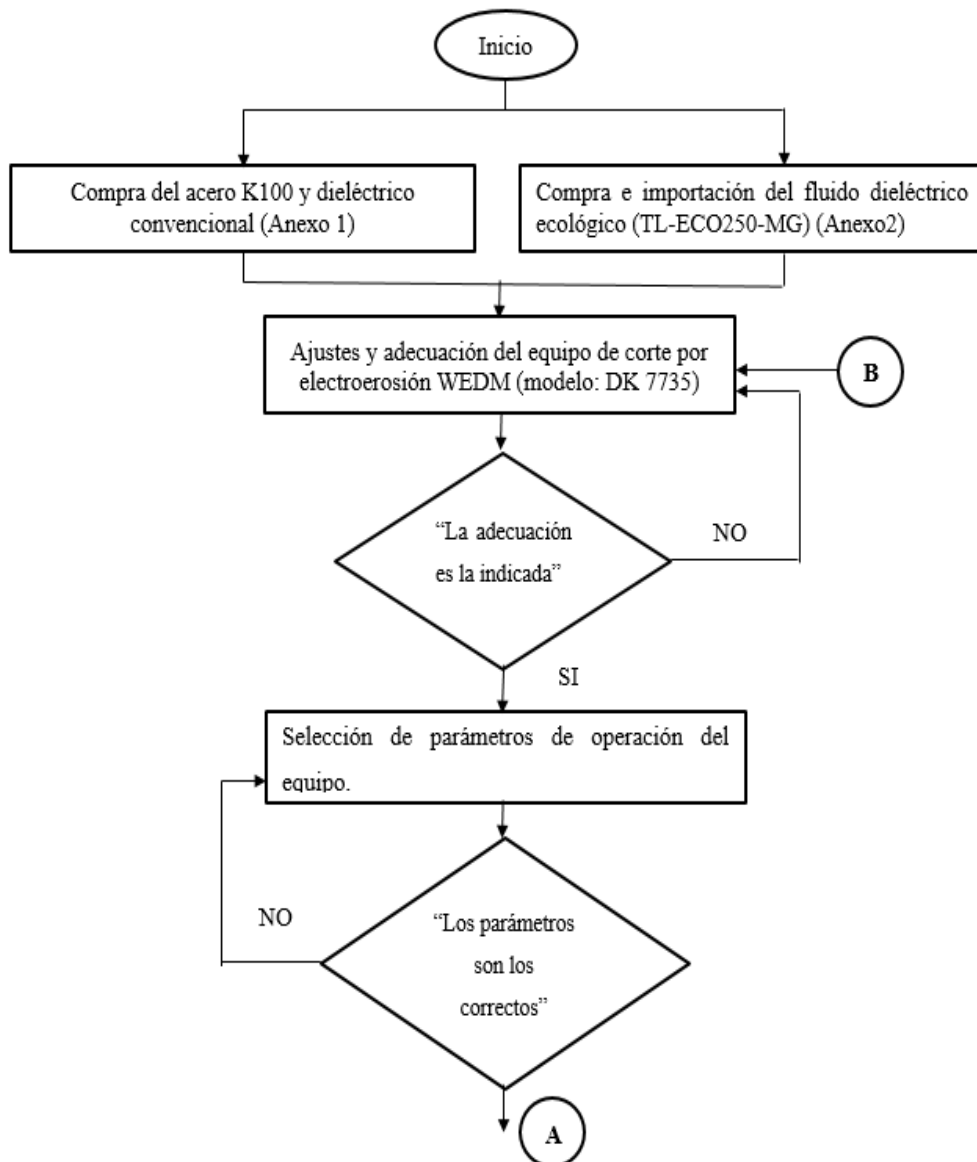
1. Tabulación de datos obtenidos en cada ensayo en función a la necesidad manteniendo una mutua relación con lo establecido por la hipótesis. Para ello se considerará lo siguiente:
  - Obtención de la composición química del material base mediante ensayo de espectrometría.
  - Tiempo de duración de corte de las probetas a ensayar.
  - Reporte de medición de valores de rugosidad en la superficie de corte, en función a la norma ISO 1997 [25].
  - Reporte de medición de valores de dureza en la zona afectada por el efecto electroquímico, en función a la norma ASTM E18 [26].
  - Reporte del análisis topográfico en la sección de corte.
2. Representación gráfica de los ensayos de rugosidad y dureza frente al tiempo obtenido en cada proceso de corte, tomando en cuenta el medio dieléctrico aplicado.
  - Gráfica de la rugosidad vs tiempo de corte.
  - Gráfica de dureza vs tiempo de corte.
  - Gráfica comparativa de rugosidad con relación a los dos medios dieléctricos.
  - Gráfica comparativa de dureza con relación a los dos medios dieléctricos.
3. Análisis de acuerdo a los resultados adquiridos durante la investigación, con el fin de conocer el grado de aceptación del medio dieléctrico ecológico sobre el acabado superficial.

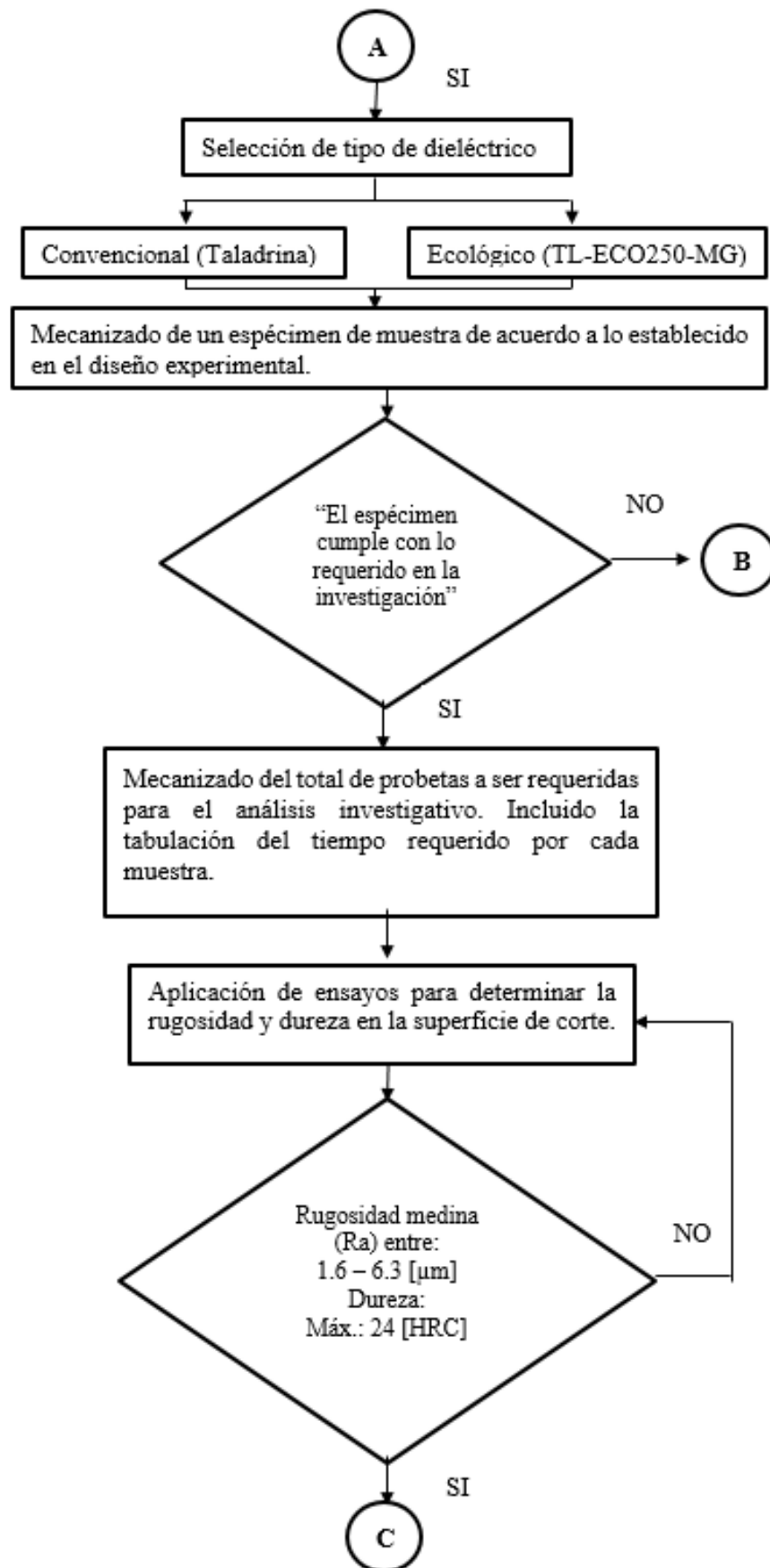
## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Análisis de resultados.

Para el cumplimiento de lo planificado, se debe dar seguimiento a las actividades que se definen en el diagrama de flujo expuesto en la figura 14, el cual permitirá comprender los cambios producidos en la rugosidad, dureza y topografía de la sección de corte frente al uso de un medio dieléctrico ecológico.





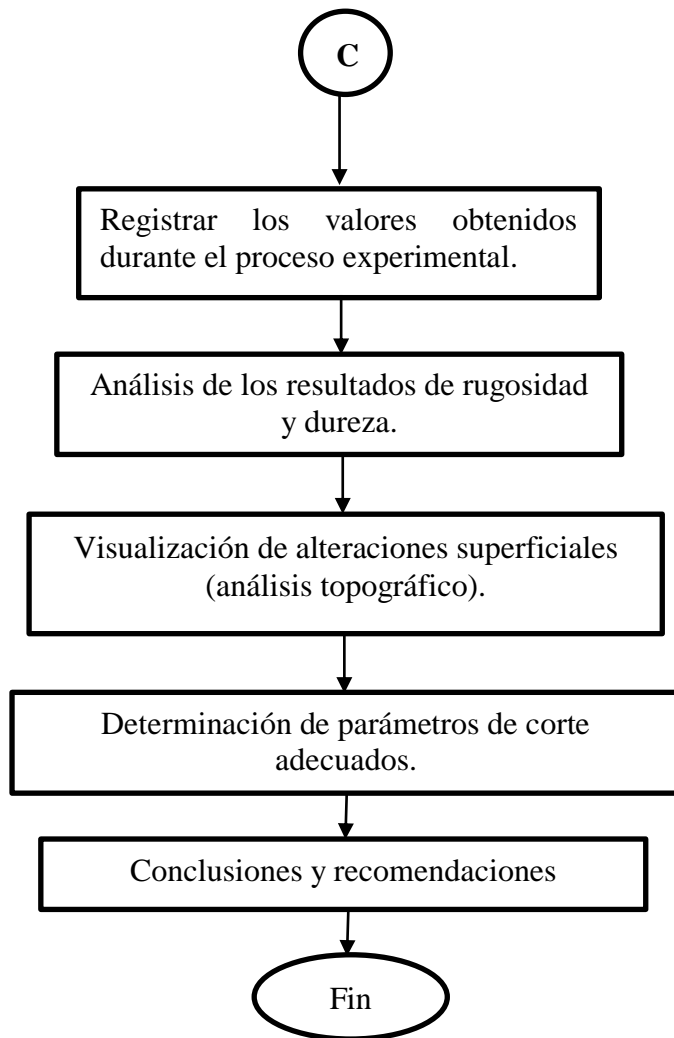


Figura 14. Diagrama de flujo- procesamiento de datos y análisis.

Fuente: Autor.

#### 4.1.1 Características técnicas del material base

##### 4.1.1.1 Determinación de la composición química del material base

De acuerdo a las características expuestas en función a la sección del tipo de material como lo es el acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) comercialmente conocido como K100, elemento empleando en mayor porcentaje por las empresas dedicadas a la fabricación de matrices dentro de la ciudad de Ambato como es el caso de la empresa “Ingeniería del Acero y Matricería”.

Debido a que el estudio investigativo es de carácter experimental, se ve la necesidad de corroborar su composición química, para lo cual en la tabla 13 se expone los

elementos químicos que detalla la casa comercial “BÖULER” donde se adquirió el material base.

Tabla 13. Valor porcentual de la composición química del material base. (Anexo 1)

Material	%C	%Si	%Mn	%Cr
Acero K100	2,00	0,25	0,35	11,5

Fuente: Autor

#### 4.1.1.2 Ensayo de espectrofotometría.

Previo al análisis, hay que tomar en consideración ciertas características que debe cumplir el espécimen a ser analizado, donde la superficie de aplicación deberá ser lo más plana posible y no debe presentar agentes externos como recubrimientos o a su vez oxidaciones que impida la experimentación. La figura 15 muestra el proceso de quema y la forma ideal que debe tener el elemento a ser ensayado.



Figura 15. Preparación del espécimen y ejecución del ensayo químico.

Fuente: Autor

El ensayo de espectrofotometría (Anexo 3) se llevó a cabo en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana; obteniendo los siguientes resultados como muestra la tabla 14.

Tabla 14. Análisis químico – acero K100.

<b>Composición Química porcentual- Ensayo de Espectrofotometría</b>								
<b>Tipo de aleación: Acero ledeburítico al 12% de Cr</b>								
		<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>
<b>Quemas</b>	1	84,9	2,14	0,249	0,376	0,0210	0,0092	11,6
	2	84,7	2,17	0,249	0,375	0,0221	0,0091	11,7
	3	84,9	2,10	0,250	0,374	0,0217	0,0082	11,6
<b>Promedio</b>		<b>84,8</b>	<b>2,14</b>	<b>0,249</b>	<b>0,375</b>	<b>0,0216</b>	<b>0,0088</b>	<b>11,6</b>
		<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>
<b>Quemas</b>	1	0,133	0,211	0,0184	0,0248	0,0878	<0,0010	0,0034
	2	0,137	0,209	0,0187	0,0251	0,0888	<0,0010	0,0037
	3	0,133	0,212	0,0186	0,0247	0,0873	<0,0010	0,0035
<b>Promedio</b>		<b>0,134</b>	<b>0,211</b>	<b>0,0186</b>	<b>0,0249</b>	<b>0,0880</b>	<b>&lt;0,0010</b>	<b>0,0035</b>
		<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>B</b>	<b>N</b>	<b>Se</b>
<b>Quemas</b>	1	0,107	0,0780	0,0022	0,0013	0,0004	0,0811	0,0079
	2	0,110	0,0745	0,0030	0,0011	0,0002	0,0910	0,0075
	3	0,108	0,0778	<0,0020	0,0013	<0,0002	0,0817	0,0081
<b>Promedio</b>		<b>0,108</b>	<b>0,0768</b>	<b>0,0021</b>	<b>0,0012</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,0846</b>	<b>0,0078</b>

Fuente: Autor

A partir de los valores expuestos en la tabla 10, podemos establecer que la composición promedio en carbono, silicio, manganeso y cromo se encuentran en relación a lo expuesto por la casa comercial donde se adquirió la barra de acero (Anexo 1). En la tabla 15 se muestra los valores obtenidos presentando un error del 3,85 % como promedio, el cual es considerado como aceptable.

Tabla 15. Error porcentual en el análisis químico – acero K100

<b>Composición Química</b>	<b>%C</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Cr</b>
Valor teórico	2,00	0,250	0,350	11,50
Valor experimental	2,14	0,249	0,375	11,60
<b>% Error</b>	7,00	0,40	7,14	0,87
<b>Promedio</b>				<b>3,85</b>

Fuente: Autor.



#### 4.1.2 Determinación de la dureza del material base

Bajo las propiedades expuestas en la ficha técnica del material base, expresa que el mismo tiene una dureza como un valor máximo e igual a 248 HB (24HRC) en estado de suministro, el cual se caracteriza por encontrarse tratado térmicamente mediante un revenido de alivio de tensiones. Con la finalidad de confirmar lo expuesto por la casa comercial, se procede a realizar un ensayo de dureza a dos muestras.

##### 4.1.2.1 Ensayo de dureza

Para el análisis correspondiente, se toma en cuenta la extracción de dos muestras de 50 mm de longitud del material en estado de suministro, con los cuales se procede al ensayo correspondiente de dureza que permitirá conocer la veracidad o no de lo expuesto en la ficha técnica. El procedimiento a seguir se encuentra sustentado bajo la norma ASTM E18, y sus resultados se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Ensayo de dureza del material base en estado de suministro.

<b>Calibración - Dureza HRC</b>						
	<b>Medida 1</b>	<b>Medida 2</b>	<b>Medida 3</b>	<b>Medida 4</b>	<b>Medida 5</b>	<b>Promedio</b>
<b>Patrón 1</b>	18,1	19	15,9	20,6	20,9	18,9
<b>Patrón 2</b>	20,2	21,3	21,5	21,9	21,3	21,24
<b>Promedio final</b>						<b>20,07</b>

Fuente: Autor.

Como se puede observar, los valores alcanzados de forma experimentalmente, se encuentran en un promedio de 20 HRC, lo cual permite establecer que el material adquirido corresponde a un acero ledeburítico al 12% Cr, pero se lo podría catalogar como un acero de mediana calidad, ya que no se logró obtener el valor máximo establecido como referencia a través de la casa comercial en donde se adquirió.

#### 4.1.3 Mecanizado de especímenes o probetas

##### 4.1.3.1 Selección del equipo de mecanizado no convencional

Como se especifica en el tema de titulación, se requiere emplear una máquina que se caracterice por la obtención de piezas mediante el proceso electro-erosivo, por lo tanto, para el proceso de mecanizado, se hizo uso de un equipo de corte por hilo (WEDM)

de la empresa “Ingeniería del Acero y Matriciería”, la cual cuenta con las siguientes características técnicas, como lo muestra la tabla 17.

Tabla 17. Características del equipo – EDM Wire Cut Machine.

<b>EDM WIRE CUT MACHINE “Jiangsu Fangzheng CNC Machine Tool Co.,LTD.”</b>			
<b>Modelo</b>	DK 7735	<b>Carrera (X*Y)</b>	350x450 mm
<b>Voltaje</b>	220 v/50Hz	<b>Altura del corte</b>	450 mm
<b>Peso de la máquina</b>	1200 Kg	<b>Corte cónico</b>	± 3° / 80 mm

Fuente: Autor.

Donde los parámetros que se puede variar en relación al proceso de operación son los siguientes:

- Espesor del material base (mm)
- Ancho de pulso ( $\mu$ s)
- Frecuencia de pulso (KHz)
- Corriente (A)
- Velocidad de avance (mm/min)
- Rapidez del hilo (m/min)

#### **4.1.4 Especificación de la muestra a obtenerse**

En investigaciones anteriores han considerado el proceso empleando placas rectangulares con espesores de 5 a 10 mm. Para la experimentación mencionada, se hará uso de una barra de 1 metro de longitud y 25 mm de diámetro, de donde se extraerá las 32 probetas considerando que el espesor sea de 5 mm en cada una, es decir, que no se modifique dicho valor en ninguna de ellas, ya que podría alterar las mediciones correspondientes a la rugosidad y dureza debido a la inexistencia de paralelismo [7], [8].

#### **4.1.5 Aplicación del tipo de dieléctrico.**

Como se indicó en el capítulo 2, específicamente en el inciso 2.2.7.1 se procede al uso de dos medios dieléctricos para la extracción de los especímenes de estudio. Tal es el caso que se procede a obtener 16 muestras empleando como medio dieléctrico la

comúnmente conocida “taladrina”; mientras que los 16 restantes se mecanizarán empleando como medio dieléctrico uno de carácter ecológico, el cual se denomina como “TL-ECO250-MG” (Anexo 2), fluido que fue importado ya que no se cuenta con estos tipos en el mercado nacional.

#### 4.1.6 Parámetros de mecanizado de cada espécimen

Debido a que el ancho y frecuencia de pulso son dependientes del espesor del material a ser mecanizado, y el mismo permanece es constante durante todo el proceso, no se considera la modificación de los mismos de tal forma que la matriz ortogonal de experimentación queda establecida como muestra la tabla 18.

Tabla 18. Parámetros de mecanizado.

Nº Muestra	Amperaje [A]	V - F (vel. avance) [mm/min]	Rapidez del hilo [m/min]
1	2,5	80	110
2	2,5	80	110
3	2,5	80	50
4	2,5	80	50
5	2,5	120	110
6	2,5	120	110
7	2,5	120	50
8	2,5	120	50
9	1,5	80	110
10	1,5	80	110
11	1,5	80	50
12	1,5	80	50
13	1,5	120	110
14	1,5	120	110
15	1,5	120	50
16	1,5	120	50

Fuente: Autor

#### 4.1.7 Medición del tiempo de mecanizado de probetas

Una vez calibrada la máquina de electroerosión por hilo y seleccionado los parámetros a ser modificados, se procede a la extracción de las muestras y de igual manera a la medición del tiempo empleado en cada corte. Finalizado el proceso de mecanizado se procede a la tabulación de datos como muestra la tabla 19.

Tabla 19. Parámetros de corte y tiempo de mecanizado - aplicando dieléctrico convencional (Taladrina)

Nº Muestras	Amperaje [A]	V - F (vel. avance) [mm/min]	Rapidez del hilo [m/min]	Tiempo de Mecanizado [min]
DC-TL-01	2,5	80	110	5,52
DC-TL-02	2,5	80	110	5,89
DC-TL-03	2,5	80	50	10,25
DC-TL-04	2,5	80	50	10,22
DC-TL-05	2,5	120	110	6,00
DC-TL-06	2,5	120	110	6,20
DC-TL-07	2,5	120	50	10,26
DC-TL-08	2,5	120	50	10,77
DC-TL-09	1,5	80	110	13,28
DC-TL-10	1,5	80	110	16,25
DC-TL-11	1,5	80	50	12,01
DC-TL-12	1,5	80	50	12,01
DC-TL-13	1,5	120	110	10,53
DC-TL-14	1,5	120	110	12,60
DC-TL-15	1,5	120	50	12,14
DC-TL-16	1,5	120	50	12,16

Fuente: Autor

En relación a la configuración aplicada en base a los parámetros que se pueden variar, y bajo lo requerido o expuesto dentro de los objetivos de la investigación, se procedió a una segunda operación de mecanizado empleando como medio dieléctrico aquel de carácter ecológico. Obteniendo valores de tiempo asociado al corte. En la tabla 20 se

detalla los valores alcanzados en cuanto al tiempo empleado para cada configuración de corte.

Tabla 20. Parámetros de corte y tiempo de mecanizado - aplicando dieléctrico ecológico (TL-ECO250-MG).

Nº Muestras	Amperaje [A]	V - F (vel. avance) [mm/min]	Rapidez del hilo [m/min]	Tiempo de Mecanizado [min]
DE-TLECO-01	2,5	80	110	7,26
DE-TLECO-02	2,5	80	110	7,76
DE-TLECO-03	2,5	80	50	9,35
DE-TLECO-04	2,5	80	50	9,14
DE-TLECO-05	2,5	120	110	8,05
DE-TLECO-06	2,5	120	110	7,38
DE-TLECO-07	2,5	120	50	10,54
DE-TLECO-08	2,5	120	50	10,05
DE-TLECO-09	1,5	80	110	14,30
DE-TLECO-10	1,5	80	110	14,30
DE-TLECO-11	1,5	80	50	15,54
DE-TLECO-12	1,5	80	50	15,83
DE-TLECO-13	1,5	120	110	15,11
DE-TLECO-14	1,5	120	110	14,94
DE-TLECO-15	1,5	120	50	16,12
DE-TLECO-16	1,5	120	50	16,00

Fuente: Autor

#### 4.1.8 Ensayo de rugosidad media (Ra) en la superficie de corte

El ensayo de rugosidad fue efectuado en la zona donde se produjo el corte, bajo las consideraciones expuestas como parámetros de mecanizado. Además, la medición respectiva está sujeta a la normativa ISO 1997 (Anexo 4) que regula el procedimiento a seguir en cuanto se refiere a la calibración del equipo empleado y la determinación correcta en cuanto a la rugosidad.

#### 4.1.8.1 Características del equipo de medición de Rugosidad

Para la medición correspondiente, se empleó un rugosímetro de la marca MITUTOYO SJ210, el cual presenta las siguientes características como lo expone la siguiente tabla 21.

Tabla 21. Especificaciones técnicas del equipo de medición de rugosidad.

<b>RUGOSÍMETRO MITUTOYO SJ210</b>			
Rango de medición	0 - 360 $\mu\text{m}$	Precisión	$\pm 15\%$
Unidad de Detección	Palpador de Diamante	Resolución:	0.01 $\mu\text{m}$ (con una repetitividad menor al 12%)

Fuente: Autor

El equipo se encuentra certificado bajo los siguientes estándares: JIS (JIS-B0601-2001, JIS-B0601-1994, JIS BO601-1982), VDA, ISO-1997 y DIN. Su calibración promedio se encuentra a través de múltiples mediciones (Máx. 5 veces). Como lo establece el “Laboratorio de calificación bajo la Acreditación SAE-LCA-17-003”. En la figura 16 se puede observar las características físicas del equipo.





Figura 16. Rugosímetro Mitutoyo SJ210.

#### 4.1.8.2 Reporte de rugosidad superficial



En las fichas técnicas expuestas en los incisos 4.5.2.1 y 4.5.2.2 se presenta en detalle el número de repeticiones que se estableció para cada ensayo bajo la norma ISO 1997 con la finalidad de obtener mediciones de carácter confiable. De igual manera se expone aquellos parámetros que se deberá cumplir durante el proceso de medición, tal es el caso de la temperatura ambiente ya que juega un papel muy importante. En el

Anexo 5 se expone el informe técnico de donde se tomó los valores referentes a la rugosidad.

- **Rugosidad superficial bajo la aplicación de Taladrina como medio dieléctrico convencional.**

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO - COHORTE 2017						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL Datos informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ensayo N°	1-16			
Solicitado por	Ing. Diego Molina	Fecha	21/07/2019			
Centro de estudio y análisis	Laboratorio de Ingeniería Mecánica - UTA					
Realizado por	Ing. Sebastián Villegas	Supervisado por	Ing. Christian Pérez			
Código del espécimen	DC-TL	Código laboratorio	17216850-ETM 01-1			
Parámetros - proceso de mecanizado						
Material Base	Acero ledeburítico al 12% Cr / AISI: D3 Especificación comercial: K100					
Proceso	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)					
Tipo de Dieléctrico	Convencional (Aceite soluble en agua – Taladrina)					
Geometría del espécimen	Plana	Intensidad de corriente (A)	1,5 - 2,5			
Diámetro (mm)	25	V - F (avance mm/min)	80 - 120			
Espesor (mm)	5	Rapidez_hilo (m/min)	50 - 110			
Parámetros - medición de rugosidad MITUTOYO SJ210						
$\lambda_c$	0,8 $\mu\text{m}$	Norma	ISO 1997			
$\lambda_s$	2,5 $\mu\text{m}$	Mediciones	x5			
Temperatura Ambiente	20° C					
Registro de mediciones - Ra ( $\mu\text{m}$ )						
Probeta	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio ( $\mu\text{m}$ )
DC-TL-01	6.951	7.854	7.589	6.243	6.158	6.959
DC-TL-02	7.322	6.388	8.367	6.301	7.183	7.112
DC-TL-03	5.515	6.574	7.061	6.486	6.134	6.354
DC-TL-04	7.652	5.329	4.871	4.576	4.066	5.299
DC-TL-05	6.859	6.794	8.609	8.959	10.673	8.379
DC-TL-06	7.945	6.823	7.495	7.495	9.692	7.890
DC-TL-07	6.691	7.603	5.711	7.216	6.416	6.727
DC-TL-08	5.706	6.945	5.090	5.648	7.753	6.228
DC-TL-09	2.572	3.412	3.902	3.707	3.516	3.422
DC-TL-10	3.190	2.657	2.429	2.434	3.372	2.816
DC-TL-11	2.657	2.641	2.650	2.550	3.345	2.769
DC-TL-12	3.030	3.583	4.446	3.395	3.725	3.636
DC-TL-13	3.408	2.479	3.186	3.336	3.161	3.114
DC-TL-14	3.107	2.732	4.685	3.211	3.839	3.515
DC-TL-15	4.170	4.613	4.175	4.813	4.410	4.436
DC-TL-16	5.319	5.100	5.618	4.543	6.405	5.397
Promedio total						5.253
Observaciones						
El tipo de trabajo muestra un acabado fino, correspondiente a un grado de rugosidad N9. Las probetas desde la 01 hasta la 08 son obtenidas a partir de los valores mínimos expuestos por cada parámetro de corte, mientras que el resto se maquina con los valores máximos.						

- **Rugosidad superficial bajo la aplicación del TL-ECO250-MG como medio dieléctrico ecológico.**

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO - COHORTE 2017</b> 						
<b>REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL</b>						
<b>Datos informativos</b>						
Tipo de estudio	Experimental			Ensayo N°	1-16	
Solicitado por	Ing. Diego Molina			Fecha	21/07/2019	
Centro de estudio y análisis	Laboratorio de Ingeniería Mecánica - UTA					
Realizado por	Ing. Sebastián Vilegas			Supervisado por	Ing. Christian Pérez	
Código del espécimen	DE-TLECO	Código laboratorio	17216850-ETM 01-1			
<b>Parámetros - proceso de mecanizado</b>						
Material Base	Acero ledeburítico al 12% Cr / AISI: D3 Especificación comercial: K100					
Proceso	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)					
Tipo de Dieléctrico	Ecológico (TL-ECO250-MG)					
Geometría del espécimen	Plana	Intensidad de corriente (A)	1,5 - 2,5			
Diámetro (mm)	25	V - F (avance mm/min)	80 - 120			
Espesor (mm)	5	Rapidez_hilo (m/min)	50 - 110			
<b>Parámetros - medición de rugosidad MITUTOYO SJ210</b>						
$\lambda_c$	0,8 $\mu\text{m}$	Norma	ISO 1997			
$\lambda_s$	2,5 $\mu\text{m}$	Mediciones	x5			
Temperatura Ambiente	20° C					
<b>Registro de mediciones - Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>						
Probeta	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio ( $\mu\text{m}$ )
DE-TLECO-01	5.289	4.173	4.998	4.537	5.92	4.749
DE-TLECO-02	4.582	5.084	4.581	3.616	4.895	4.552
DE-TLECO-03	4.876	4.688	4.913	5.314	5.686	5.095
DE-TLECO-04	5.338	5.314	5.295	5.538	5.649	5.427
DE-TLECO-05	5.178	5.469	6.275	6.009	5.172	5.621
DE-TLECO-06	5.796	4.171	4.807	6.122	4.911	5.161
DE-TLECO-07	4.784	5.273	6.333	6.086	5.585	5.612
DE-TLECO-08	4.359	4.585	4.803	4.640	4.877	4.653
DE-TLECO-09	4.277	3.778	3.376	4.421	3.690	3.908
DE-TLECO-10	4.017	3.783	3.996	3.699	3.650	3.829
DE-TLECO-11	4.120	3.690	4.513	3.799	4.261	4.077
DE-TLECO-12	3.301	4.450	4.419	4.028	4.241	4.088
DE-TLECO-13	4.257	4.986	4.695	4.270	3.962	4.434
DE-TLECO-14	3.835	4.772	4.359	4.084	4.412	4.292
DE-TLECO-15	4.610	4.175	4.297	4.057	4.809	4.390
DE-TLECO-16	4.407	4.716	4.855	4.648	4.584	4.642
<b>Promedio total</b>						<b>4.658</b>
<b>Observaciones</b>						
El tipo de trabajo muestra un acabado fino, correspondiente a un grado de rugosidad <b>N9</b> .						
Las probetas desde la 01 hasta la 08 son obtenidas a partir de los valores mínimos expuestos por cada parámetro de corte, mientras que el resto se maquina con los valores máximos.						



#### 4.1.8.3 Análisis de normalidad de los valores de rugosidad

En el análisis de la normalidad de los valores obtenidos en cuanto a la rugosidad media, es necesario conocer el valor del estadístico de Anderson-Darling (AD), quien establece el área entre la línea ajustada y la función de distribución empírica, donde, mientras menor sea su valor, más afianzados se encuentran los valores con relación a la normalidad. El valor probabilístico “p” establece cuan evidente es de encontrar a la hipótesis nula, por lo tanto, si el valor de p es mayor al valor de significancia (por lo general 5%) se puede asegurar que los valores de análisis tienden a formar parte de una distribución normal; mientras que, para un valor de p menor o igual al valor de significancia, se establece que la distribución de datos no es propia de una normalidad [27].

En la figura 17, se observa que el valor de AD (0,457) el cual es menor a lo expuesto, por otra parte, el valor probabilístico de p (0,23) es mayor que el valor de significancia, por lo tanto, se puede afirmar que los valores de rugosidad alcanzados mediante la aplicación de la taladrina en el proceso de corte, presentan una distribución normalizada.

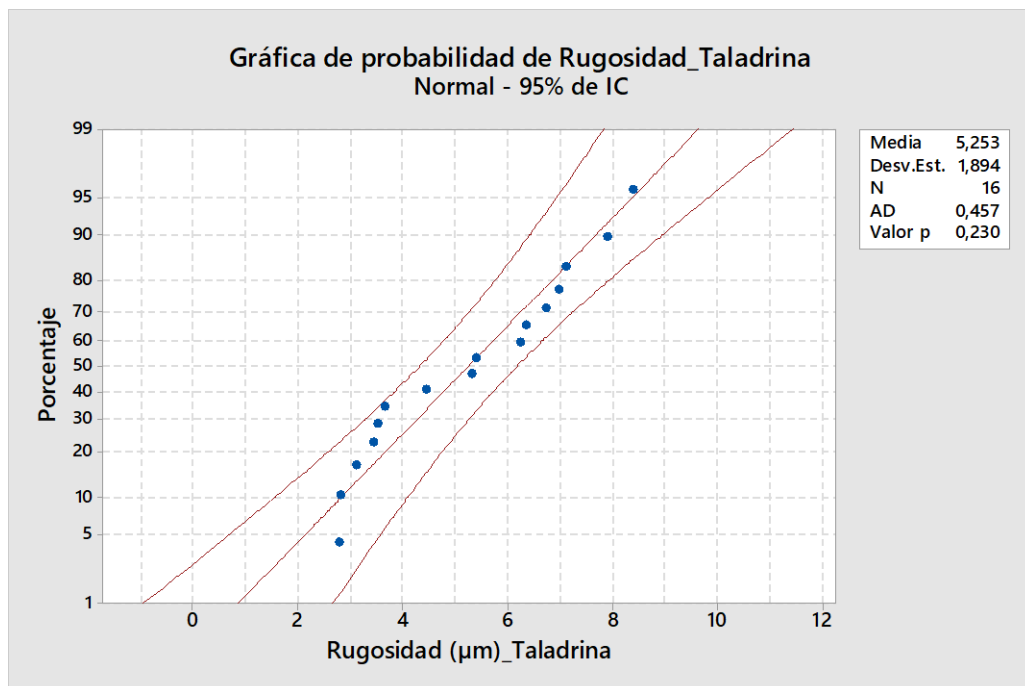


Figura 17. Normalidad de la Rugosidad media - Taladrina.

Fuente: Autor.

En la figura 18, con respecto al uso del medio ecológico TL-ECO250-MG, se visualiza que el valor de AD (0,318) es menor y el valor probabilístico de p (0,507) mayor al valor de significancia, por lo cual se asegura que los datos obtenidos en cuanto a la rugosidad forman parte de una distribución normalizada.

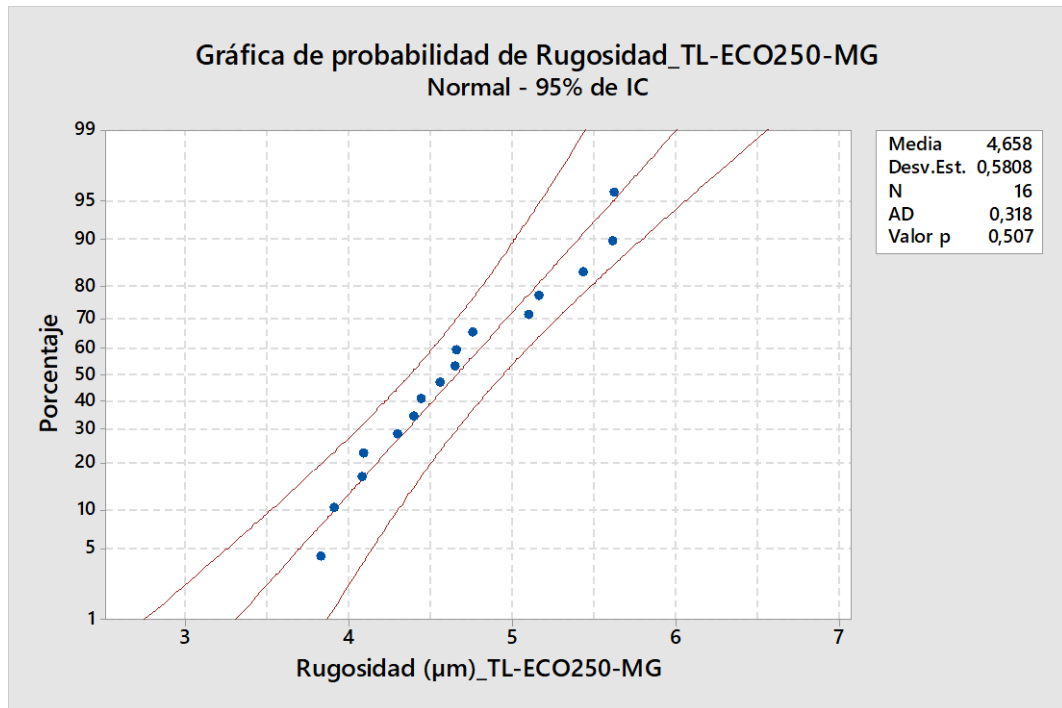


Figura 18. Normalidad de la Rugosidad media – TL-ECO250-MG.

Fuente: Autor.

#### 4.1.9 Ensayo de dureza en la zona afectada por el efecto electroquímico.

El ensayo de dureza fue realizado en la sección donde se produjo el corte, bajo las condiciones y especificaciones analizadas al inicio de la investigación; al igual que los parámetros de mecanizado. Las mediciones correspondientes están sujetas a la norma ASTM E18 (Anexo 6) que regula el procedimiento a seguir.

##### 4.1.9.1 Características del equipo de medición de Dureza

Para la medición correspondiente, se empleó un durómetro de la marca PHASE II PLUS, el cual cuenta con las siguientes características como lo expone la siguiente tabla 22.

Tabla 22. Especificaciones técnicas – Durómetro Phase II Plus.

<b>DURÓMETRO PHASE II PLUS</b>			
Modelo	900-365	Precisión	± 15%
Serie	20JA14202015	Resolución:	0.01 μm (con una repetitividad menor al 12%)
Carga menor	10 kgf	Pantalla de resultados	Digital
Carga mayor	60 kgf, 100 kgf, 150 kgf	Capacidad vertical	6,7 pulgadas

Fuente: Autor

Un durómetro es un equipo diseñado para obtener lecturas altamente sensibles y precisas, cumpliendo con los estándares bajo la normativa ASTM E-18. En la figura 19 se observa un ejemplar bajo las características indicadas.



Figura 19. Durómetro Phase II Plus.


#### **4.1.9.2 Reporte de dureza**

Se diferencia de acuerdo al medio dieléctrico aplicado, como se especificó al inicio del estudio. La finalidad es de conocer el grado de influencia sobre la dureza superficial en la sección donde se efectuó el corte.



En las fichas técnicas expuestas en los incisos 4.6.2.1 y 4.6.2.2 se expone en detalle el número de repeticiones que se estableció para cada ensayo bajo la normativa en específico. Con la finalidad de obtener medios de carácter confiable, de igual manera se expone aquellos parámetros que se deberá cumplir durante el proceso de medición.

En el Anexo 7 se expone el informe técnico de donde se tomó los valores referentes a la rugosidad.

- **Dureza bajo la aplicación de Taladrina como medio dieléctrico convencional.**

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO - COHORTE 2017		
<b>REPORTE DE DUREZA SUPERFICIAL</b>						
<b>Datos informativos</b>						
<b>Tipo de estudio</b>	Experimental		<b>Ensayo N°</b>	1-16		
<b>Solicitado por</b>	Ing. Diego Molina		<b>Fecha</b>	21/07/2019		
<b>Centro de estudio y análisis</b>	Laboratorio de Resistencia de Materiales - UPS Quito					
<b>Realizado por</b>	Ing. Leonidas Ramirez		<b>Supervisado por</b>	Ing. Christian Pérez		
<b>Código del espécimen</b>	DC-TL	<b>Código laboratorio</b>	17216850-ETM 01-1			
<b>Parámetros - proceso de mecanizado</b>						
<b>Material Base</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr / AISI: D3 Especificación comercial: K100					
<b>Proceso</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)					
<b>Tipo de Dieléctrico</b>	Convencional (Aceite soluble en agua – Taladrina)					
<b>Geometría del espécimen</b>	Plana	<b>Intensidad de corriente (A)</b>	1,5 - 2,5			
<b>Diámetro (mm)</b>	25	<b>V - F (avance mm/min)</b>	80 - 120			
<b>Espesor (mm)</b>	5	<b>Rapidez_hilo (m/min)</b>	50 - 110			
<b>Parámetros - medición de Dureza (Durómetro Phase II Plus)</b>						
<b>Modelo</b>	900-365	<b>Temperatura</b>	21 °C	<b>Norma</b>	ASTM E18	
<b>Serie</b>	20JA142015	<b>Humedad</b>	30%	<b>Mediciones</b>	x5	
<b>Muestra fotográfica de un Espécimen</b>						
						
<b>Registro de mediciones -Dureza (HRC)</b>						
Probeta	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio (HRC)
DC-TL-01	12,2	14,6	14,1	18,0	15,1	14,8
DC-TL-02	12,5	12,2	12,2	15,8	16,5	13,8
DC-TL-03	15,5	13,2	12,5	16,2	20,7	15,6
DC-TL-04	16,1	14,2	15,1	13,1	19,0	15,5
DC-TL-05	18,3	11,9	17,8	18,8	15,7	16,5
DC-TL-06	12,7	16,1	15,9	20,5	20,3	17,1
DC-TL-07	14,4	15,5	19,7	16,9	20,7	17,4
DC-TL-08	12,4	18,5	14,6	14,0	19,5	15,8
DC-TL-09	12,6	15,7	18,1	14,8	16,5	15,5
DC-TL-10	16,4	16,3	19,2	18,4	20,3	18,1
DC-TL-11	15,7	15,1	18,9	16,5	19,6	17,2
DC-TL-12	16,0	18,3	13,9	14,4	18,1	16,1
DC-TL-13	14,1	15,8	14,4	14,7	16,0	15,0
DC-TL-14	15,6	16,1	12,5	14,1	15,9	14,8
DC-TL-15	16,2	13,6	16,7	17,2	14,8	15,7
DC-TL-16	14,3	19,9	16,3	18,0	19,0	17,5
<b>Promedio total</b>						<b>16,04</b>
<b>Observaciones</b>						
Las probetas desde la 01 hasta la 08 son obtenidas a partir de los valores mínimos expuestos por cada parámetro de corte, mientras que el resto se maquina con los valores máximos.						
La fabricación de las probetas y su configuración están de acuerdo según especificaciones declaradas por el cliente.						

- Dureza bajo la aplicación del TL-ECO250-MG como medio dieléctrico ecológico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO - COHORTE 2017		
<b>REPORTE DE DUREZA SUPERFICIAL</b>						
<b>Datos informativos</b>						
Tipo de estudio	Experimental		Ensayo N°	1-16		
Solicitado por	Ing. Diego Molina		Fecha	21/07/2019		
Centro de estudio y análisis	Laboratorio de Resistencia de Materiales - UPS Quito					
Realizado por	Ing. Leonidas Ramirez		Supervisado por	Ing. Christian Pérez		
Código del espécimen	DE-TLECO	Código laboratorio	17216850-ETM 01-1			
<b>Parámetros - proceso de mecanizado</b>						
Material Base	Acero ledeburítico al 12% Cr / AISI: D3 Especificación comercial: K100					
Proceso	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)					
Tipo de Dieléctrico	Ecológico (TL-ECO250-MG)					
Geometría del espécimen	Plana	Intensidad de corriente (A)	1,5 - 2,5			
Diámetro (mm)	25	V - F (avance mm/min)	80 - 120			
Espesor (mm)	5	Rapidez_hilo (m/min)	50 - 110			
<b>Parámetros - medición de Dureza (Durómetro Phase II Plus)</b>						
Modelo	900-365	Temperatura	21 °C	Norma	ASTM E18	
Serie	20JA142015	Humedad	30%	Mediciones	x5	
<b>Muestra fotográfica de un Espécimen</b>						
 						
<b>Registro de mediciones -Dureza (HRC)</b>						
Probeta	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio (HRC)
DE-TLECO-01	13,6	16,8	16,9	18,8	16,6	16,5
DE-TLECO-02	14,0	14,4	18,1	16,5	19,6	16,5
DE-TLECO-03	15,3	16,7	18,4	18,7	21,6	18,1
DE-TLECO-04	18,3	16,9	17,8	15,7	18,5	17,4
DE-TLECO-05	15,4	16,8	13,9	20,3	16,5	16,6
DE-TLECO-06	16,6	14,8	17,9	16,2	15,5	16,2
DE-TLECO-07	17,3	14,2	17,6	14,7	18,4	16,4
DE-TLECO-08	16,2	15,7	18,2	17,0	18,3	17,1
DE-TLECO-09	15,2	17,7	18,7	16,0	15,3	16,6
DE-TLECO-10	18,6	16,9	19,2	17,2	18,8	18,1
DE-TLECO-11	20,6	17,6	20,2	18,5	18,8	19,1
DE-TLECO-12	17,0	16,8	18,5	18,3	16,0	17,3
DE-TLECO-13	18,5	18,3	20,9	19,3	17,2	18,8
DE-TLECO-14	18,6	16,7	20,8	14,7	19,9	18,1
DE-TLECO-15	19,2	19,5	20,5	18,4	20,7	19,7
DE-TLECO-16	18,4	18,4	20,0	17,3	18,3	18,5
<b>Promedio total</b>						<b>17,58</b>
<b>Observaciones</b>						
<p>Las probetas desde la 01 hasta la 08 son obtenidas a partir de los valores mínimos expuestos por cada parámetro de corte, mientras que el resto se maquina con los valores máximos.</p> <p>La fabricación de las probetas y su configuración están de acuerdo según especificaciones declaradas por el cliente.</p>						

### 4.1.9.3 Análisis de normalidad de los valores de dureza

En la figura 20 se observa la gráfica de normalidad de los valores de dureza que corresponde al proceso de mecanizado con taladrina, donde el valor de AD (0,282) corresponde a un valor menor al indicado, y el valor probabilístico de p (0,589) es mayor al valor de significancia, entonces, permite corroborar que la distribución es propiamente normal.

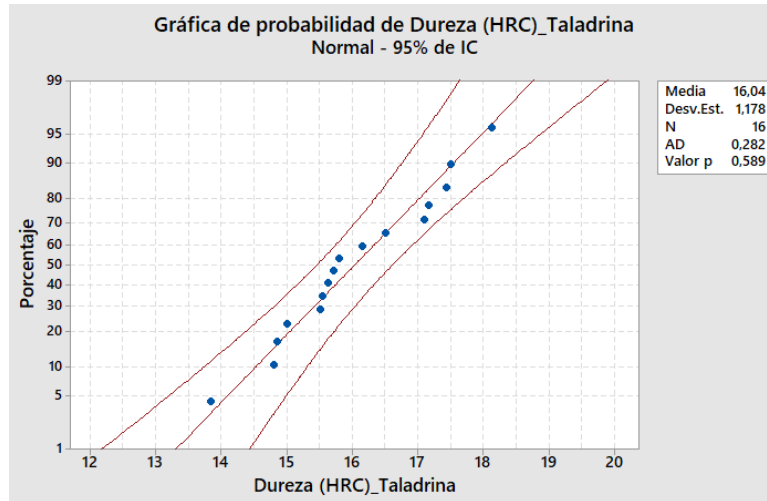


Figura 20. Normalidad de la Dureza – Taladrina.

Fuente: Autor.

En la figura 21, se puede identificar que el valor AD (0,529) es menor, mientras que el valor p (0,15) es mayor al valor de significancia; por lo tanto, es posible concluir que la distribución es normalizada.

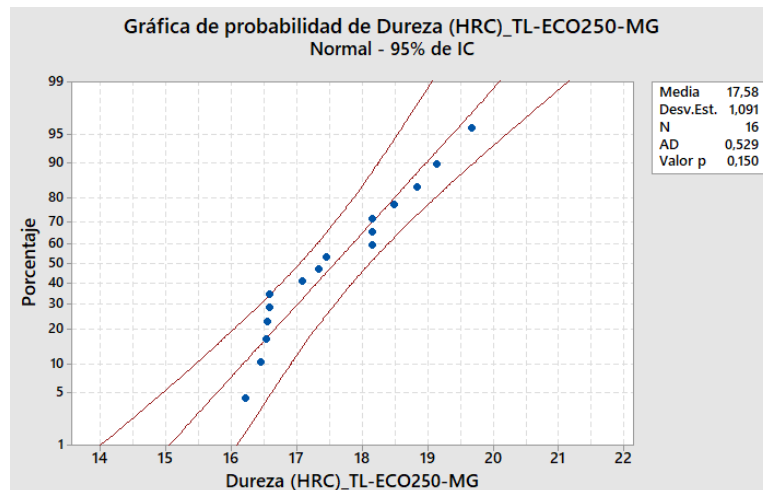


Figura 21. Normalidad de la Dureza – TL-ECO250-MG.

Fuente: Autor.

#### 4.1.10 Ensayo de microscopía electrónica (SEM)

El correspondiente ensayo de microscopía electrónica (SEM) fue realizado en la sección donde se produjo el corte, enfatizado en la calidad superficial, es decir, contemplando los valores máximos y mínimos de rugosidad, en cuanto al uso de aceite soluble en agua como lo es la taladrina, al igual que al usar un medio dieléctrico ecológico. El proceso se realizó bajo las especificaciones propuestas al inicio de la investigación, por otra parte, las observaciones obtenidas se exponen en el Anexo 8.

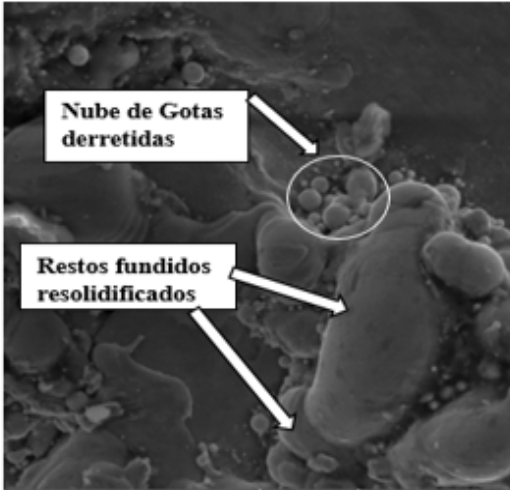
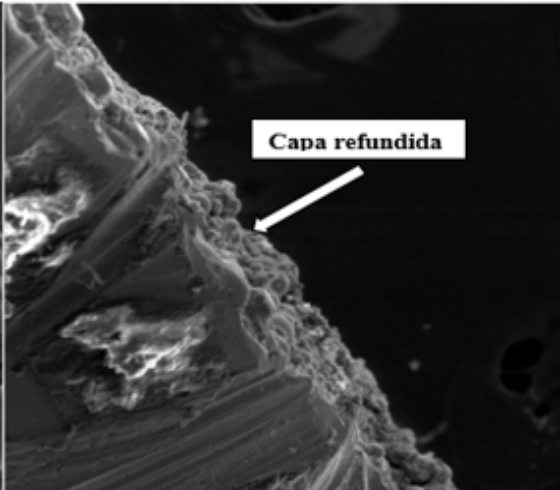
##### 4.1.10.1 Ensayo topográfico bajo la aplicación de la Taladrina como medio dieléctrico convencional

###### - Rugosidad Mínima.

<b>LABORATORIO DE MATERIALES FICM-UTA REPORTE DE EVALUACIÓN DE RUGOSIDAD</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS</b>			
Usuario: Ing. Diego Molina RUC/CI: 0503064065 Teléfono: 0995297941		Dirección: Latacunga	
Tipo de estudio: Experimental Lugar de Ejecución: Universidad Técnica de Ambato Fecha de Ejecución: 2019-09-20 Fecha de Finalización: 2019-09-20 Tipo de ensayo: Cualitativo			
<b>Realizado por:</b>	Ing. Gustavo Pomaquero.	<b>Revisado por:</b>	Ing. Sebastián Villegas.
<b>Parámetros del Experimento</b>			
<b>Material:</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) Comercialmente: K100	<b>Tipo de Mecanizado:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)
		<b>Medio Dieléctrico:</b>	Convencional (Aceite soluble en agua – Taladrina)
<b>Tipo de Muestra:</b>	Valor mínimo de rugosidad (DC-TL-11)	<b>Orden:</b>	310
<b>Análisis Superficial - Topográfico</b>			
Experimento 3			
Vista frontal 2kX		Vista Lateral 400X	
<b>Observaciones:</b> Se observa uniformidad en el corte desde una vista lateral, en tanto en la parte frontal se muestra una superficie uniforme, sin microvacíos.			



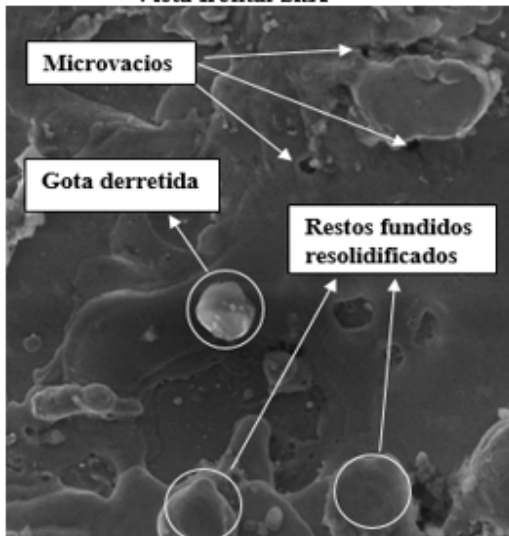
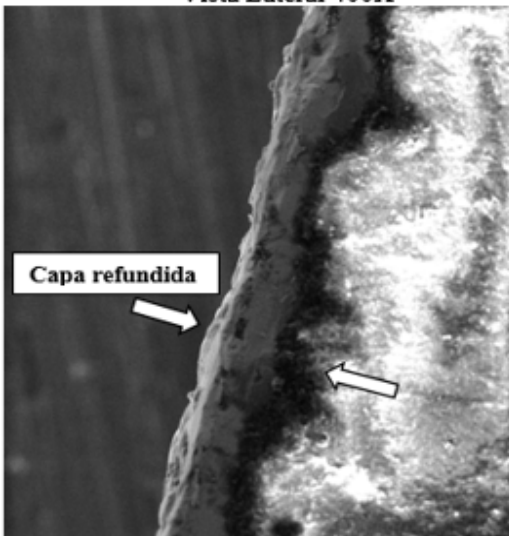
- **Rugosidad Máxima.**

<b>LABORATORIO DE MATERIALES FICM-UTA</b>			
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE RUGOSIDAD</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS</b>			
Usuario: Ing. Diego Molina		Dirección: Latacunga	
RUC/CI: 0503064065		Teléfono: 0995297941	
Tipo de estudio: Experimental			
Lugar de Ejecución: Universidad Técnica de Ambato			
Fecha de Ejecución: 2019-09-20			
Fecha de Finalización: 2019-09-20			
Tipo de ensayo: Cualitativo			
<b>Realizado por:</b>	Ing. Gustavo Pomaquero.	<b>Revisado por:</b>	Ing. Sebastián Villegas.
<b>Parámetros del Experimento</b>			
<b>Material:</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) Comercialmente: K100	<b>Tipo de Mecanizado:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)
		<b>Medio Dieléctrico:</b>	Convencional (Aceite soluble en agua – Taladrina)
<b>Tipo de Muestra:</b>	Valor máximo de rugosidad (DC-TL-05)	<b>Orden:</b>	310
<b>Análisis Superficial - Topográfico</b>			
<b>Experimento 4</b>			
Vista frontal 2kX		Vista Lateral 400X	
			
<p><b>Observaciones:</b> La superficie presenta zonas con gotas derretidas y ciertos restos fundidos en las zonas señaladas, la muestra presenta una rugosidad aparentemente mayor en comparación a la muestra de corte de taladrina mínima.</p>			

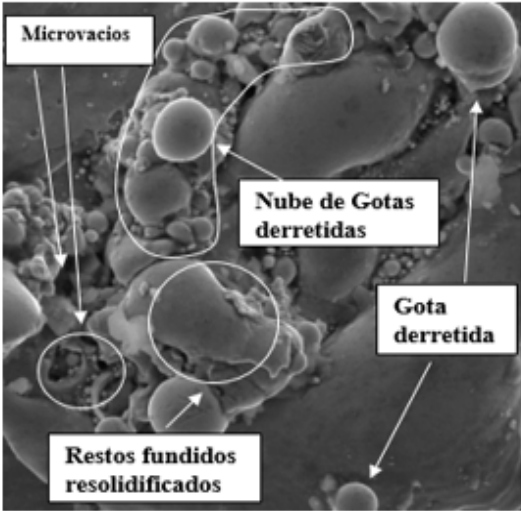
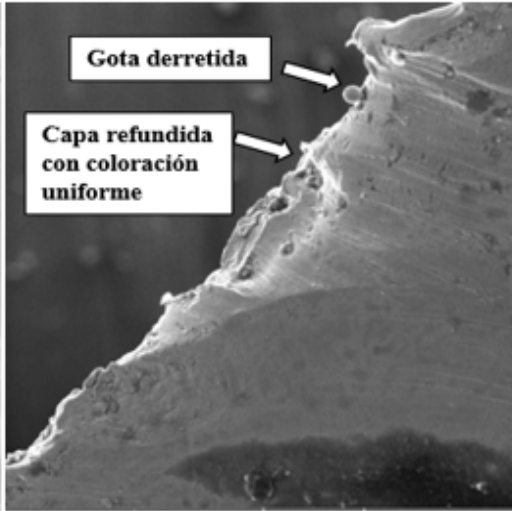


4.1.10.2 Ensayo topográfico bajo la aplicación del TL-ECO250-MG como medio dieléctrico ecológico.

- Rugosidad Mínima.

<b>LABORATORIO DE MATERIALES FICM-UTA REPORTE DE EVALUACIÓN DE RUGOSIDAD</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS</b>			
Usuario: Ing. Diego Molina		Dirección: Latacunga	
RUC/CI: 0503064065			
Teléfono: 0995297941			
Tipo de estudio: Experimental			
Lugar de Ejecución: Universidad Técnica de Ambato			
Fecha de Ejecución: 2019-09-20			
Fecha de Finalización: 2019-09-20			
Tipo de ensayo: Cualitativo			
<b>Realizado por:</b>	Ing. Gustavo Pomaquero.	<b>Revisado por:</b>	Ing. Sebastián Villegas.
<b>Parámetros del Experimento</b>			
<b>Material:</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) Comercialmente: K100	<b>Tipo de Mecanizado:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)
		<b>Medio Dieléctrico:</b>	Ecológico (TL-ECO250-MG)
<b>Tipo de Muestra:</b>	Valor mínimo de rugosidad (DE-TLECO-10)	<b>Orden:</b>	310
<b>Análisis Superficial - Topográfico</b>			
Experimento 1			
Vista frontal 2kX		Vista Lateral 400X	
 <p>Microvacíos</p> <p>Gota derretida</p> <p>Restos fundidos resolidificados</p>		 <p>Capa refundida</p>	
<b>Observaciones:</b> Se presenta ciertas áreas con vacíos en la superficie, además se puede evidenciar ciertas zonas con material resolidificado posterior al corte por electroerosión.			

- **Rugosidad Máxima.**

<b>LABORATORIO DE MATERIALES FICM-UTA</b>			
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE RUGOSIDAD</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS</b>			
Usuario: Ing. Diego Molina		Dirección: Latacunga	
RUC/CI: 0503064065			
Teléfono: 0995297941			
Tipo de estudio: Experimental			
Lugar de Ejecución: Universidad Técnica de Ambato			
Fecha de Ejecución: 2019-09-20			
Fecha de Finalización: 2019-09-20			
Tipo de ensayo: Cualitativo			
<b>Realizado por:</b>	Ing. Gustavo Pomaquero.	<b>Revisado por:</b>	Ing. Sebastián Villegas.
<b>Parámetros del Experimento</b>			
<b>Material:</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) Comercialmente: K100	<b>Tipo de Mecanizado:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)
		<b>Medio Dieléctrico:</b>	Ecológico (TL-ECO250-MG)
<b>Tipo de Muestra:</b>	Valor máximo de rugosidad (DE-TLECO-05)	<b>Orden:</b>	310
<b>Análisis Superficial - Topográfico</b>			
Experimento 2			
Vista frontal 2kX		Vista Lateral 400X	
			
<p><b>Observaciones:</b> Se evidencia una superficie con múltiples gotas derretidas debido al corte en las áreas señaladas, además se puede observar una afectación mínima en la zona de corte por afectación térmica.</p>			

## 4.2 Interpretación de Resultados

Una vez recolectada la información pertinente, se ve la necesidad de conocer cómo se encuentran relacionadas entre cada una de ellas; para lo cual se procede a las representaciones gráficas con la finalidad de identificar cual es el grado de afectación si es que lo existiera en cada caso.

### 4.2.1.1 Tiempo de mecanizado.

A través del registro de datos se desea conocer como está influenciando el medio dieléctrico aplicado, para lo cual se efectuará la gráfica de acuerdo a los valores que se presentan en la tabla 23. Donde se pretende analizar el comportamiento del tipo de dieléctrico en relación al tiempo de mecanizado.

Para el análisis correspondiente se ha enfocado principalmente en la cantidad de corriente aplicada durante el proceso.

Tabla 23. Tiempo de mecanizado mediante WEDM.

<b>MECANIZADO MEDIANTE PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)</b>			
Nº Probeta	V - F [avance mm/min]	Tiempo de mecanizado con "Taladrina" [s]	Tiempo de mecanizado con "TL-ECO250-GM" [s]
Amperaje constante: 2,5 [A]			
01-02	80	342,30	450,60
03-04		614,10	554,70
05-06	120	366,00	462,90
07-08		630,90	617,70
Amperaje constante: 1,5 [A]			
09-10	80	885,90	858,00
11-12		720,60	941,10
13-14	120	693,90	901,50
15-16		729,00	963,60

Fuente: Autor.

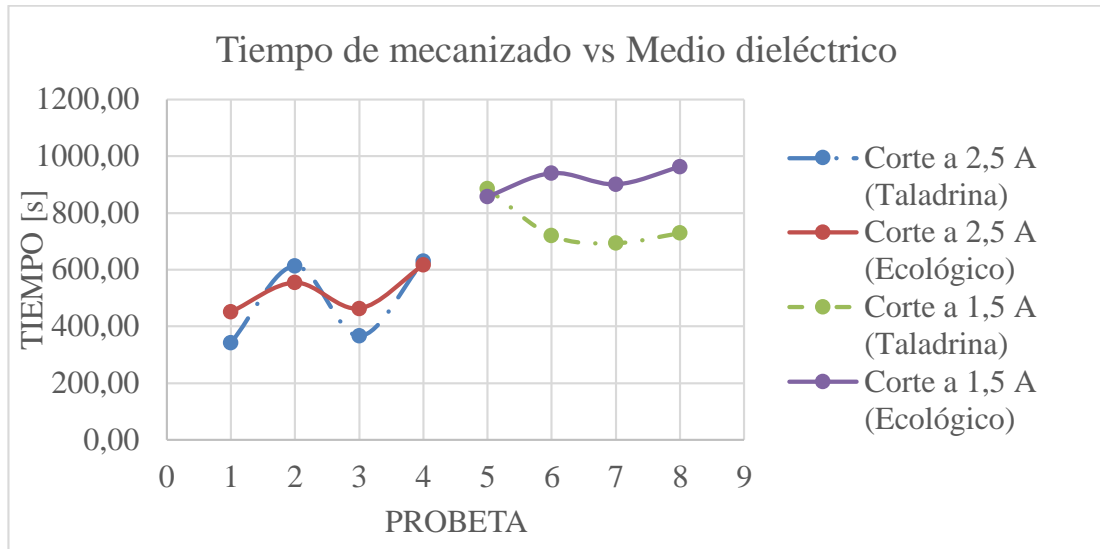


Figura 22. Relación del tiempo de mecanizado vs tipo de medio dieléctrico.

Fuente: Autor.

En la figura 22 se observa el comportamiento del medio dieléctrico frente a tiempo de mecanizado. Cuando se aplica una corriente equivalente a 2,5 amperios, la taladrina presenta una elevada variación en el tiempo de mecanizado; mientras que, al emplear el medio ecológico se visualiza una variación en tiempo con cierta tendencia a ser constante. Al variar el valor de corriente a 1,5 amperios, se observa claramente que la taladrina tiende a descender en el tiempo de mecanizado; por otra parte, al usar el medio ecológico sucede una cierta variación constante, pero con un tiempo de mecanizado bastante elevado. Por lo tanto, se puede concluir que, al aplicar valores excesivos de corriente, el tiempo disminuye notablemente. Mientras que, al reducir la cantidad de corriente, el tiempo se prolonga y tiende a ser constante. Lo cual permitirá relacionar con la rugosidad adquirida en la zona de corte, y así establecer la calidad que presenta cada experimentación.

#### 4.2.1.2 Rugosidad superficial en la sección de corte

En la tabla 24, se exponen aquellos valores obtenidos en cuanto a la rugosidad superficial que presenta la zona donde se efectuó el corte electroerosivo. Al igual que el tiempo de mecanizado, se consideró la variación de la cantidad de corriente aplicada en la operación.

Tabla 24. Rugosidad media (Ra) alcanzada en el mecanizado WEDM.

<b>MECANIZADO MEDIANTE PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)</b>			
Nº Probeta	V - F [avance mm/min]	Ra - mecanizado con "Taladrina" [ $\mu\text{m}$ ]	Ra - mecanizado con "TL-ECO250-GM" [ $\mu\text{m}$ ]
Amperaje constante: 2,5 [A]			
01-02	80	7,036	4,651
03-04		5,827	5,261
05-06	120	8,135	5,391
07-08		6,478	5,133
Amperaje constante: 1,5 [A]			
09-10	80	3,119	3,869
11-12		3,203	4,083
13-14	120	3,315	4,363
15-16		4,917	4,516

Fuente: Autor.

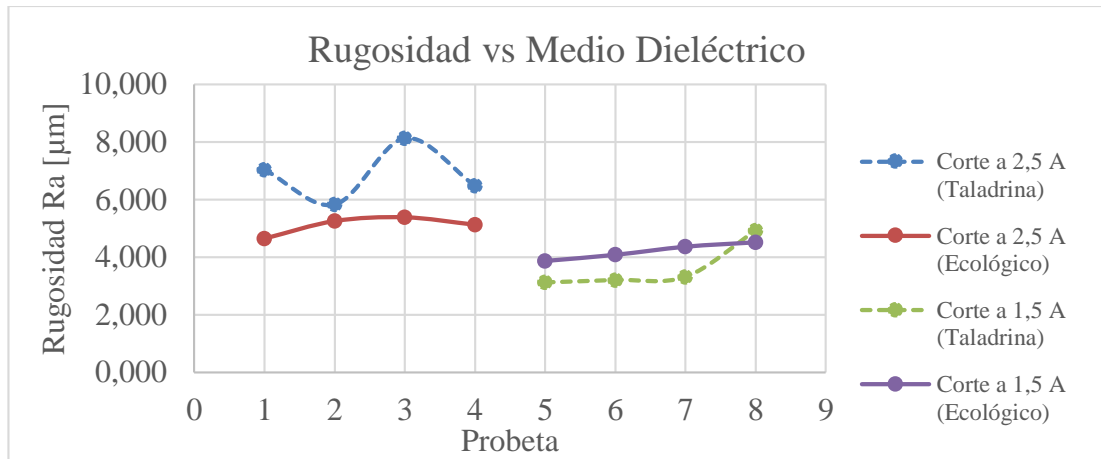


Figura 23. Relación de la rugosidad superficial vs tipo de medio dieléctrico.

Fuente: Autor.

En la figura 23 se identifica el grado de afectación que presenta el uso de un medio dieléctrico, tal es el caso de la taladrina que presenta una alteración muy notable cuando la corriente aplicada es de 2,5 amperios, lo cual no sucede por igual con el uso de aquel medio ecológico, ya que su variación en cuanto al cambio de la rugosidad es de aproximadamente  $1 \mu\text{m}$ . Al variar la corriente a 1,5 amperios, la taladrina presenta menor valor en cuanto se refiere a rugosidad, aunque a cierto nivel se presenta un cambio notorio; por otra parte, el emplear un medio ecológico hace que a dicha intensidad de corriente la variación de rugosidad no sea tan considerable.

### 4.2.1.3 Dureza en la sección de corte

En la tabla 25 se observa los valores alcanzados en cuanto a la dureza obtenida sobre la sección donde se realizó el corte mediante electroerosión por hilo.

Tabla 25. Valores de dureza en la sección de corte mediante WEDM

<b>MECANIZADO MEDIANTE PROCESO DE ELECTROEROSIÓN POR HILO (WEDM)</b>			
N° Probeta	V - F [avance mm/min]	Dureza - mecanizado con "Taladrina" [HRC]	Dureza - mecanizado con "TL-ECO250- GM" [HRC]
Amperaje constante: 2,5 [A]			
01-02	80	14,300	16,800
03-04		15,550	16,650
05-06	120	16,800	14,900
07-08		16,600	16,600
Amperaje constante: 1,5 [A]			
09-10	80	16,500	17,350
11-12		17,750	18,200
13-14	120	16,400	18,450
15-16		16,750	19,100

Fuente: Autor

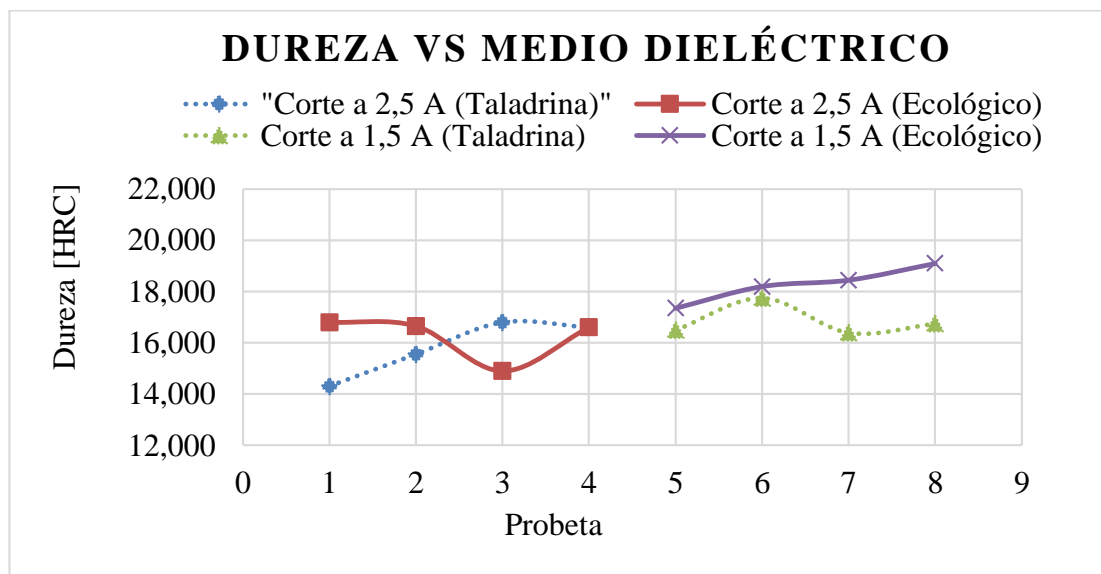


Figura 24. Relación de la dureza vs tipo de medio dieléctrico.

Fuente: Autor.

Al analizar lo expuesto en la figura 24, se puede observar que tanto para una corriente de 2,5 y 1,5 amperios; la dureza presenta una ligera variación. Con el dieléctrico convencional (taladrina) existe un ligero decrecimiento, mientras que con el uso del dieléctrico ecológico (TL-ECO250-MG) la dureza tiende a aumentar. En los dos casos la dureza estaría casi dentro del valor obtenido en el apartado 4.2.3 donde se analizó el valor correspondiente a la dureza del material en su estado de suministro.

#### 4.2.1.4 Rugosidad superficial en relación al tiempo de mecanizado

De acuerdo a las propiedades que presenta cada medio dieléctrico, se puede conocer como estos influyen tanto en la rugosidad superficial como en el tiempo de mecanizado. La tabla 26 hace relación a los valores anteriormente mencionados.

Tabla 26. Relación entre la rugosidad superficial y tiempo durante el proceso de mecanizado mediante electroerosión por hilo (WEDM)

<b>MECANIZADO MEDIANTE WEDM</b>				
<b>Nº Probeta</b>	<b>Tiempo de mecanizado con "Taladrina" [s]</b>	<b>Tiempo de mecanizado con "TL-ECO250-GM" [s]</b>	<b>Ra - mecanizado con "Taladrina" [µm]</b>	<b>Ra - mecanizado con "TL-ECO250-GM" [µm]</b>
1	331,2	435,6	6,959	4,749
2	353,4	465,6	7,112	4,552
3	615	561	6,354	5,095
4	613,2	548,4	5,299	5,427
5	360	483	8,379	5,621
6	372	442,8	7,890	5,161
7	615,6	632,4	6,727	5,612
8	646,2	603	6,228	4,653
9	796,8	858	3,422	3,908
10	975	858	2,816	3,829
11	720,6	932,4	2,769	4,077
12	720,6	949,8	3,636	4,088
13	631,8	906,6	3,114	4,434
14	756	896,4	3,515	4,292
15	728,4	967,2	4,436	4,390
16	729,6	960	5,397	4,642

Fuente: Autor

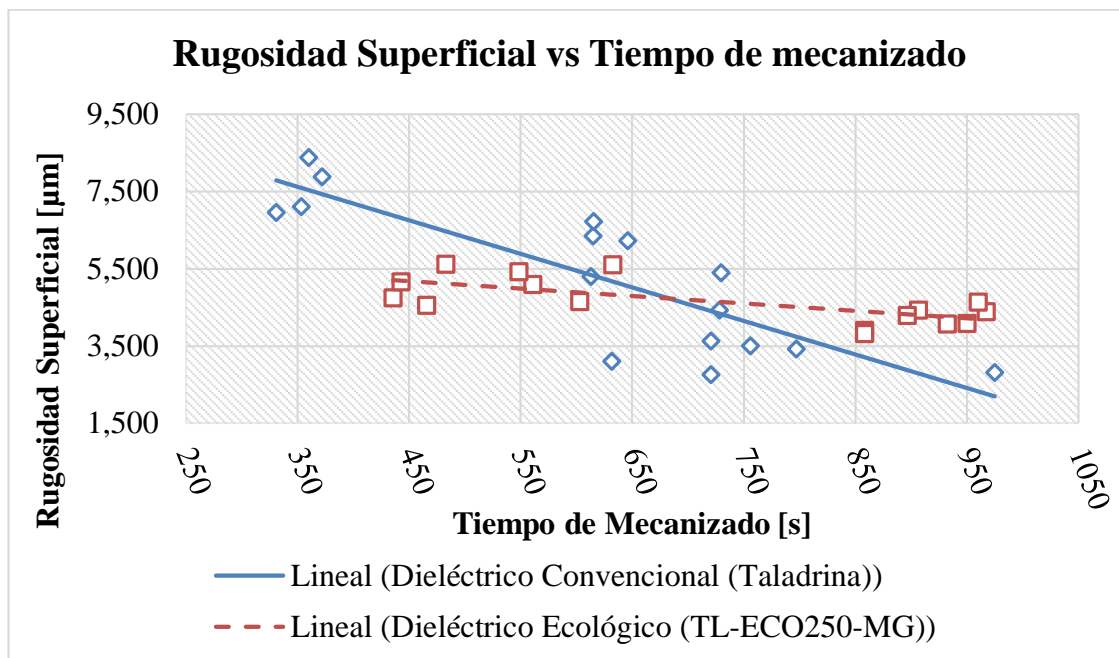


Figura 25. Relación de la dureza vs tipo de medio dieléctrico.

Fuente: Autor.

En la gráfica de dispersión (figura 25) se analiza el comportamiento de la rugosidad frente a la aplicación de dos medios dieléctricos; donde el uso de la taladrina hace que la rugosidad tienda a decaer al aumentar el tiempo de mecanizado. Al emplear el dieléctrico ecológico hace que la rugosidad tenga un comportamiento ideal con tendencia a ser contante durante el proceso de mecanizado.

#### 4.2.2 Rugosidad superficial frente a la dureza

Se desea conocer cuan influente es el uso de un medio ecológico. Para ello se parte de los valores obtenidos durante la experimentación, tal como muestra la tabla 27.

Tabla 27. Relación entre la rugosidad y dureza superficial en el proceso de mecanizado mediante electroerosión por hilo (WEDM)

MECANIZADO MEDIANTE WEDM				
Nº Prob.	Ra - mecanizado con "Taladrina" [µm]	Ra - mecanizado con "TL-ECO250-GM" [µm]	Dureza - mecanizado con "Taladrina" [HRC]	Dureza - mecanizado con "TL-ECO250-GM" [HRC]
1	6,959	4,749	14,800	16,500
2	7,112	4,552	13,800	16,500
3	6,354	5,095	15,600	18,100
4	5,299	5,427	15,500	17,400



5	8,379	5,621	16,500	16,600
6	7,890	5,161	17,100	16,200
7	6,727	5,612	17,400	16,400
8	6,228	4,653	15,800	17,100
9	3,422	3,908	15,500	16,600
10	2,816	3,829	18,100	18,100
11	2,769	4,077	17,200	19,100
12	3,636	4,088	16,100	17,300
13	3,114	4,434	15,000	18,800
14	3,515	4,292	14,800	18,100
15	4,436	4,390	15,700	19,700
16	5,397	4,642	17,500	18,500

Fuente: Autor

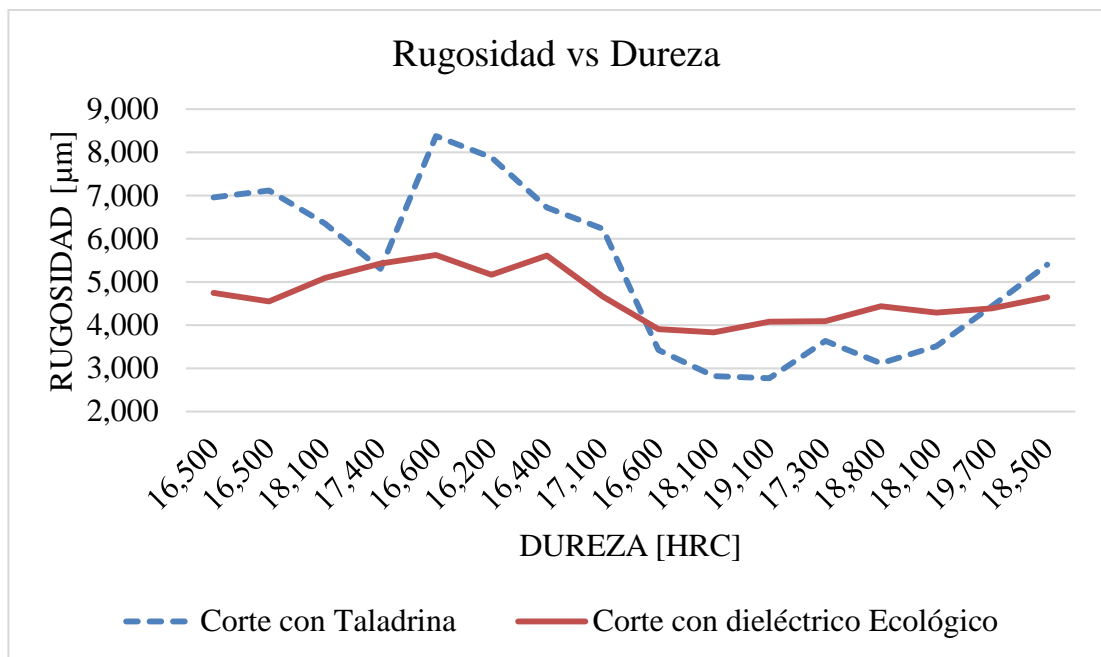


Figura 26. Relación de la rugosidad vs dureza superficial.

Fuente: Autor.

A través de la figura 26, se puede corroborar la influencia del medio ecológico frente al uso del dieléctrico convencional. Como se puede observar la taladrina presenta cambios notorios al relacionar la rugosidad superficial frente a la dureza después del corte; lo cual no sucede con el uso del TL-ECO250-MG, ya que su comportamiento es menor. Además de ello, se observa que bajo la acción de ciertos parámetros de mecanizado se obtiene buenos resultados en cuanto a rugosidad y dureza.

Por lo cual se puede decir previamente que el aplicar un dieléctrico alternativo que ayude con el medio ambiente, hace que el proceso de mecanizado mediante metodologías no convencionales como es el caso del proceso de corte pro electroerosión por hilo (WEDM) permita obtener resultados significativos, preservando la salud de quien este al mando del equipo y conservando el estado de uso de la máquina.

### 4.2.3 Análisis Topográfico

#### 4.2.3.1 Mecanizado aplicando taladrina como fluido dieléctrico de corte.

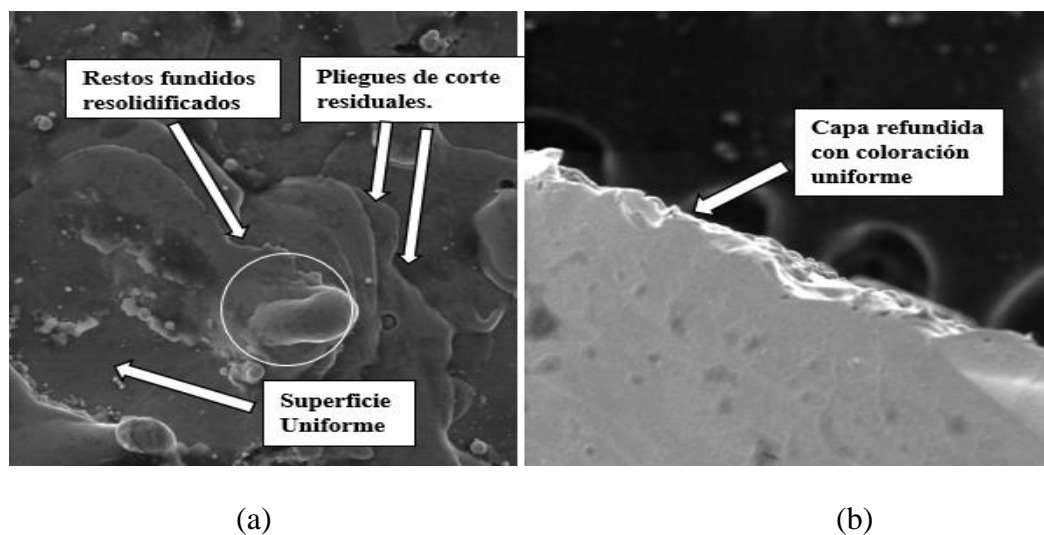


Figura 27. Topografía de la muestra con un valor mínimo de rugosidad al emplear a la taladrina como medio dieléctrico de corte (DC-TL-11: Experimento 11).

(a) Vista frontal con un aumento de 2kX. (b) Vista lateral a 400X.

Como se puede observar en la figura 27, donde la rugosidad presente es la mínima alcanzada durante el proceso. Al hacer incidir el haz luminoso sobre la superficie de corte, se puede observar una zona de carácter uniforme con presencia de restos fundidos y solidificados, con pliegues de cortes residuales y sin presencia de microvacíos que afecten el acabado final (figura 27.a); mientras que, por otra parte, desde un posicionamiento lateral, se aprecia una superficie donde su capa superficial se encuentra refundida con una coloración un tanto uniforme (figura 27.b).

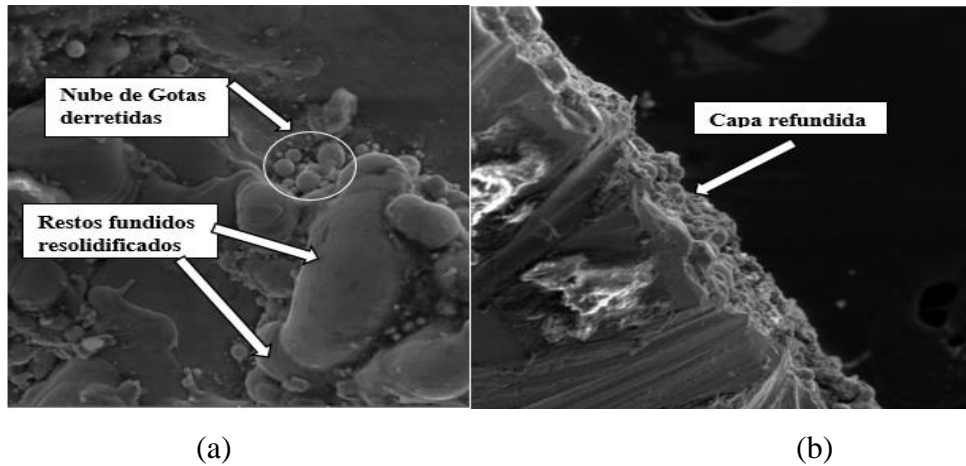


Figura 28. Topografía de la muestra con un valor máximo de rugosidad al emplear la taladrina como medio dieléctrico de corte (DC-TL-05: Experimento 05).

(a) Vista frontal con un aumento de 2kX. (b) Vista lateral a 400X.

En la figura 28.a, se observa sobre la superficie de corte, ciertas zonas en las cuales se encuentra presente nubes de gotas derretidas y ciertos restos fundidos resolidificados. Por otra parte, la figura 28.b, hace énfasis en la morfología de la zona mecanizada, donde claramente se puede visualizar el estado que tiene en forma de una capa refundida. Estas características hacen que la muestra analizada presente una rugosidad aparentemente mayor en comparación a la muestra analizada en la figura 27.

#### 4.2.3.2 Mecanizado aplicando TL-ECO250-MG como fluido dieléctrico de corte de carácter ecológico.

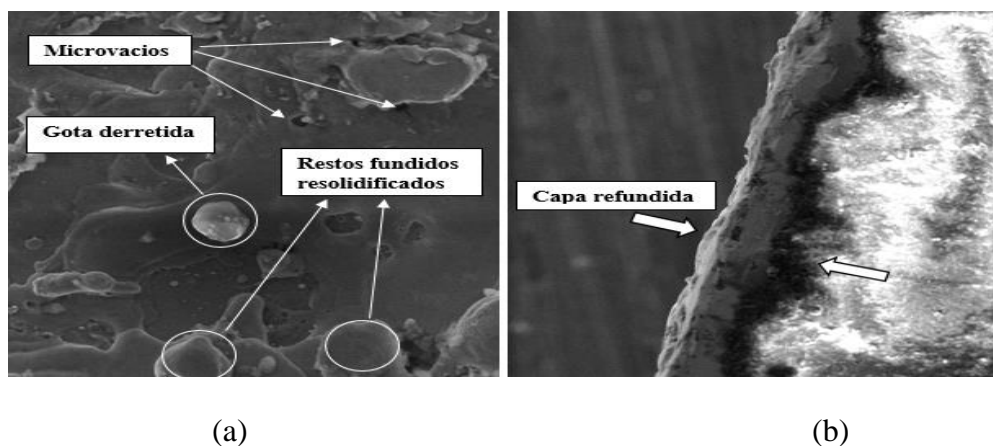


Figura 29. Topografía de la muestra con un valor mínimo de rugosidad al emplear TL-ECO250-MG como medio dieléctrico ecológico de corte (DE-TLECO-10: Experimento 10).

(a) Vista frontal con un aumento de 2kX. (b) Vista lateral a 400X.

La figura 29 hace referencia al uso de un medio dielectrico de carácter ecológico, donde en la figura 29.a. se observa la presencia de microvacios en ciertas partes de la zona de corte, al igual que restos fundidos y resolidificados con varias presencias de gotas derretidas. Mientras que al realizar un acercamiento lateral (figura 29.b), se visualiza la afectación térmica sobre la superficie de corte, presentando una capa refundida, presentando un ligero incremento en cuanto se refiere a la dureza superficial.

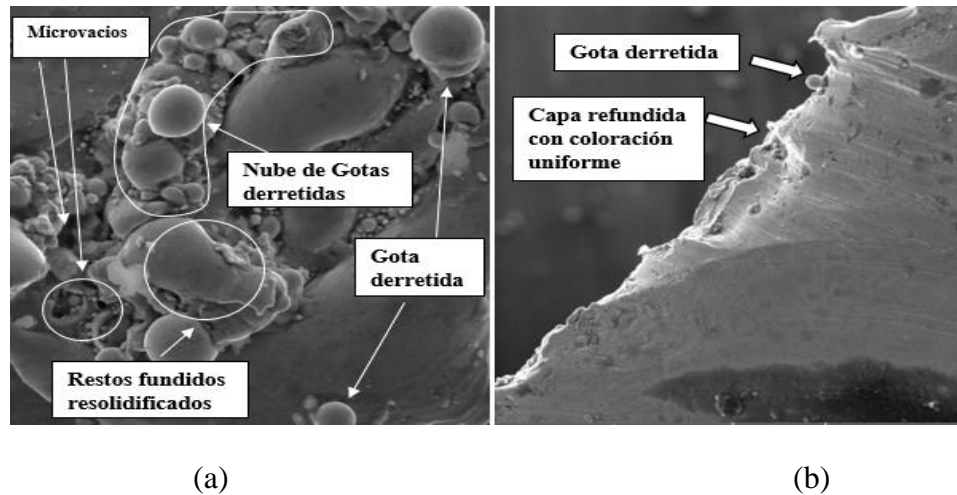


Figura 30. Topografía de la muestra con un valor máximo de rugosidad al emplear TL-ECO250-MG como medio dieléctrico ecológico de corte (DE-TLECO-05: Experimento 05).

Como se observa en la figura 30.a, existe la presencia de ciertas superficies con múltiples gotas derretidas debido al corte en las áreas señaladas, al igual que pequeños microvacios en ciertas partes de la superficie de corte. Mientras que en la figura 30.b, se puede observar una afectación térmica mínima en la zona, ya que se puede visualizar una ligera capa refundida con coloración uniforme, lo cual permite que en la zona donde se efectuó el corte se presente un leve incremento en cuanto a dureza.

Al comparar las texturas superficiales entre los valores mínimos de rugosidad entre las figuras 27 y 29, es notable la presencia de restos fundidos resolidificados presentando mayor uniformidad de corte, ya que se aplicó una cantidad de corriente moderada (1,5 A) durante el proceso de corte.

Por otra parte, es evidente que para aquellos experimentos que presentan una superficie especialmente rugosa, se observa la presencia de mayor cantidad de gotas derretidas, resolidificaciones y microvacios, debido a la cantidad de corriente (2,5 A) aplicada durante el proceso de mecanizado.

En conclusión, al aplicar el dieléctrico ecológico se logra disminuir ciertos defectos presentes en la superficie, lo cual podría estar relacionado a la composición química que caracteriza al fluido de corte, ya que es perceptible la formación de una pequeña capa refundida en la superficie donde se originó el corte.

### 4.3 Verificación de la Hipótesis

A partir de la metodología estadística por ANOVA, se requiere conocer la influencia de los factores empleados en el proceso de corte, y específicamente identificar cual índice con mayor porcentaje.

#### 4.3.1 Análisis de Varianza ANOVA de la Rugosidad superficial

##### 4.3.1.1 Hipótesis estadística para el análisis ANOVA de la Rugosidad.

Para el estudio respectivo, se plantea nuevamente las hipótesis para cada variable de salida de acuerdo al procedimiento estadístico a realizarse, tomando en cuenta aquella que se estableció en el capítulo 2.

Hipótesis Inicial (H0): No hay variación en la rugosidad superficial al usar un medio dieléctrico alternativo con respecto a lo convencional.

Hipótesis alternativa (HA): Si hay variación en la rugosidad superficial al usar un dieléctrico alternativo con respecto a lo convencional.

##### 4.3.1.2 Análisis experimental

Se desea investigar el efecto de la intensidad de corriente (A), velocidad de avance (B), rapidez del hilo de corte (C) y medio dieléctrico (D) sobre la rugosidad superficial en la zona de corte. Para lo cual, se establece los niveles de cada factor que involucra en el análisis correspondiente, como se observa en la tabla 28.

Tabla 28. Niveles de cada factor.

<b>NIVELES DE CADA FACTOR</b>			
<b>Denominación</b>	<b>Factor</b>	<b>Nivel 1 (-)</b>	<b>Nivel 2 (+)</b>
<b>A</b>	Corriente (A)	1,5	2,5
<b>B</b>	V - F (avance mm/min)	80	120

<b>C</b>	Rapidez hilo (m/min)	50	110
<b>D</b>	Dieléctrico	1	2

Fuente: Autor

Al medio dieléctrico se lo identifico como: (1) aquel que es de tipo convencional, es decir, a la Taladrina; mientras que (2) corresponde a aquel que es de carácter ecológico, denominado como: TL-ECO250-MG.

Una vez identificado tanto los factores como sus niveles correspondientes, se procede a la estructuración de la matriz de experimentación, donde se establece el diseño factorial  $2^4$ , el cual indica todas las relaciones posibles con cada uno de los factores. En la tabla 29 se observa el diseño matricial para las cuatro variables de estudio, recalcando que se efectuó dos replicas para cada efecto.

Tabla 29. Matriz de estudio del diseño factorial con 4 factores.

Número de corrida	A	B	C	D	Etiqueta de corrida	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )	
						Replica I	Replica II
1	-	-	-	-	(1).	2,769	3,636
2	+	-	-	-	a	6,354	5,299
3	-	+	-	-	b	4,436	5,397
4	+	+	-	-	ab	6,727	6,228
5	-	-	+	-	c	3,422	2,816
6	+	-	+	-	ac	6,959	7,112
7	-	+	+	-	bc	3,114	3,515
8	+	+	+	-	abc	8,379	7,890
9	-	-	-	+	d	4,077	4,088
10	+	-	-	+	ad	5,095	5,427
11	-	+	-	+	bd	4,390	4,642
12	+	+	-	+	abd	5,612	4,653
13	-	-	+	+	cd	3,908	3,829
14	+	-	+	+	acd	4,749	4,552
15	-	+	+	+	bcd	4,434	4,292
16	+	+	+	+	abcd	5,621	5,161

Nota: Para cada factor se estableció la relación correspondiente:

A= a, B= b, C= c y D= d.

Fuente: Autor

Contemplada la matriz del diseño factorial  $2^4$ , se ve la necesidad de conocer las distintas formas de combinación posible para cada factor. Debido al número de variables, claramente se observa que se desarrollaran combinaciones pares, triples y por ende de los cuatro efectos. En la tabla 30 se expone las combinaciones aplicadas para el análisis ANOVA, donde para cada variable o factor, se dispone de un nivel máximo y mínimo.

Esto permitirá establecer cuál de todos los factores es el más influyente en el proceso de mecanizado y al mismo tiempo conocer aquella variable de la cual no habría relación o importancia en la operación del equipo.

Tabla 30. Diseño factorial  $2^4$ .

Número de corrida	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD
1	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+
2	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-
3	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-
4	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
5	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-
6	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+
7	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
8	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-
10	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+
11	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+
12	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
13	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+
14	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
15	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Fuente: Autor

Una vez especificado el diseño factorial, se procede a la determinación de las estimaciones de los efectos de los factores y la suma de cuadrados del diseño factorial.

En la tabla 31 se observa aquellos factores y combinaciones que tienen una contribución en el efecto del maquinado. Donde claramente se identifica al factor A (corriente) con una contribución del 28,89 % en la rugosidad superficial. Mientras que los factores B (velocidad de avance) presenta una contribución del 2,86 % y el factor D (tipo de dieléctrico) a través de un 2,40%. Cabe mencionar que el factor C (rapidez del hilo) no presenta un valor porcentual representativo en el efecto de corte.

Tabla 31. Estimación de los efectos que influyen en la Rugosidad.

<b>Término de modelado</b>	<b>Contrastes</b>	<b>Estimación del efecto</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Contribución porcentual</b>
A	16,53	1,033	8,535	28,89
B	5,20	0,325	0,845	2,86
C	0,46	0,029	0,007	0,02
D	-4,76	-0,298	0,708	2,40
AB	-0,48	-0,030	0,007	0,02
AC	4,57	0,285	0,652	2,21
AD	-9,32	-0,582	2,712	9,18
BC	-0,14	-0,009	0,001	0,00
BD	-2,12	-0,132	0,140	0,48
CD	-1,90	-0,119	0,113	0,38
ABC	2,77	0,173	0,241	0,81
ABD	-0,16	-0,010	0,001	0,00
ACD	-4,54	-0,284	0,643	2,18
BCD	2,00	0,125	0,125	0,42
ABCD	-1,16	-0,072	0,042	0,14
<b>Total</b>			<b>29,543</b>	

Fuente: Autor

En la figura 31 se corrobora a aquellas variables que tienen efecto significativo sobre la rugosidad superficial durante el mecanizado por electroerosión por hilo. Donde a partir de un valor estandarizado de 2,12, claramente se observa que la cantidad de corriente suministrada al proceso, velocidad de avance y tipo de dieléctrico son aquellos factores que predominan en la calidad final del corte. De igual manera, los efectos de combinación: AC, AD y ACD, donde aquel que es mayormente significativo está dado por la combinación entre la corriente y el tipo de dieléctrico.



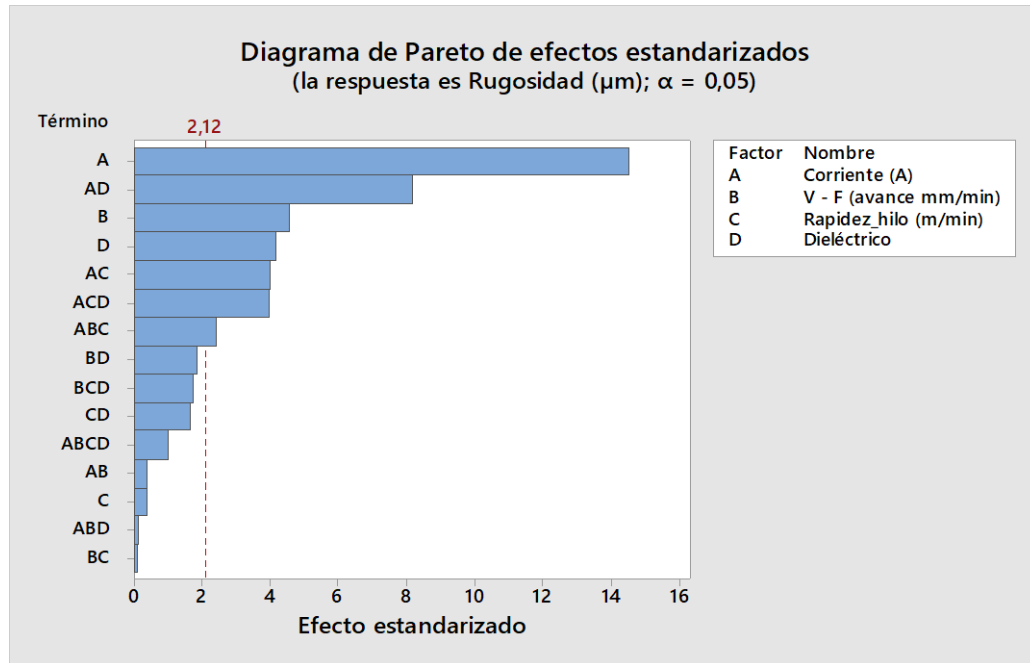


Figura 31. Diagrama de Pareto en función de la Rugosidad.

Fuente: Autor.

Una vez identificado a aquellos factores que influyen en la calidad superficial, es necesario realizar un análisis gráfico que permita verificar lo obtenido anteriormente. En la figura 32, se observa el comportamiento de los 4 factores principales frente al valor de la media.

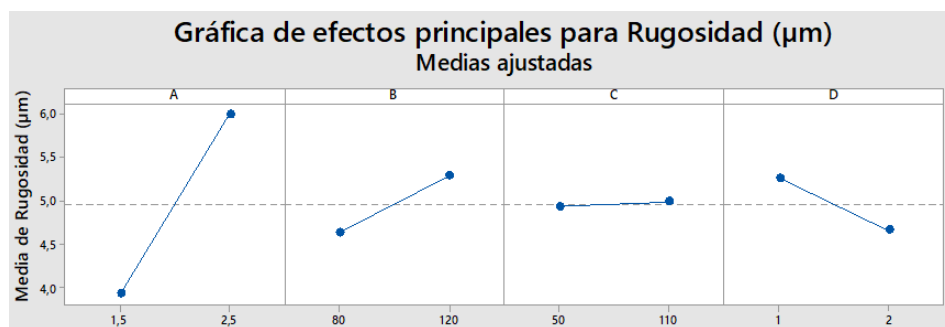


Figura 32. Relación de los 4 factores bajo la media de ajuste.

Fuente: Autor.

Donde se observa con mayor certeza la importancia que posee el factor correspondiente a la cantidad de corriente, ya que influye directamente en la rugosidad alcanzada.

De igual forma, se analiza la interacción debido a las combinaciones entre cada uno de los factores. Esto se puede observar en la figura 33.

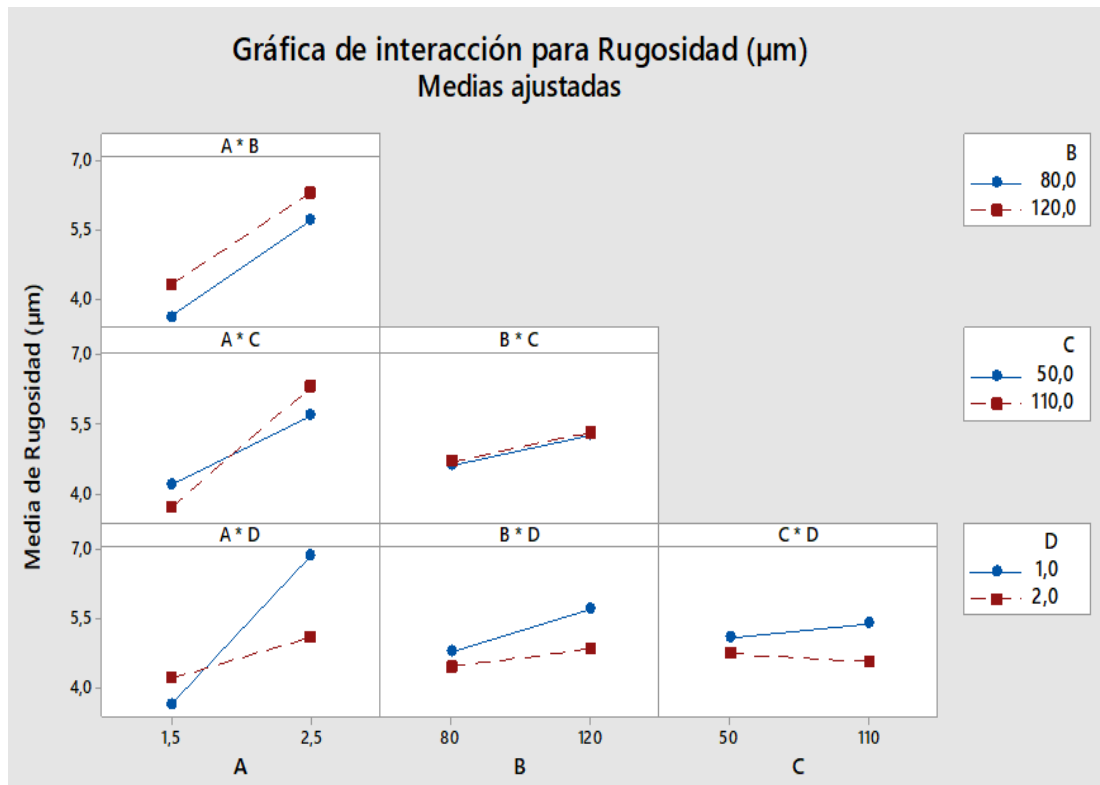


Figura 33. Relación de las combinaciones entre los 4 factores.

Fuente: Autor.

Por lo tanto, se comprueba que las combinaciones AC, AD, ACD, son aquellos que realmente tienen un efecto significativo, con relación a la rugosidad superficial. Resaltando de ellas, a la combinación AD, de la cual se explicó a través de la gráfica de Pareto.

#### 4.3.1.3 Resultado del Análisis ANOVA

En la tabla 32 se garantiza la intervención de aquellos factores y combinaciones que tienen un valor de significancia en cuanto se refiere a la calidad superficial en la zona de corte.

Tabla 32. Análisis ANOVA de la Rugosidad.

<b>Factor</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>	<b>Significancia</b>
<b>A</b>	1	34,141	34,141	210,170	0,000	SI
<b>B</b>	1	3,379	3,379	20,800	0,000	SI
<b>C</b>	1	0,027	0,027	0,160	0,691	NO
<b>D</b>	1	2,834	2,834	17,450	0,001	SI

<b>A*B</b>	1	0,028	0,028	0,170	0,682	NO
<b>A*C</b>	1	2,607	2,607	16,050	0,001	SI
<b>A*D</b>	1	10,850	10,850	66,790	0,000	SI
<b>B*C</b>	1	0,003	0,003	0,020	0,903	NO
<b>B*D</b>	1	0,562	0,562	3,460	0,081	NO
<b>C*D</b>	1	0,451	0,451	2,780	0,115	NO
<b>A*B*C</b>	1	0,962	0,962	5,920	0,027	SI
<b>A*B*D</b>	1	0,003	0,003	0,020	0,893	NO
<b>A*C*D</b>	1	2,573	2,573	15,840	0,001	SI
<b>B*C*D</b>	1	0,500	0,500	3,080	0,098	NO
<b>A*B*C*D</b>	1	0,168	0,168	1,030	0,325	NO
<b>Error</b>	16	<b>2,599</b>	<b>0,162</b>	-	-	-
<b>Total</b>	31	<b>61,685</b>	-	-	-	-

Fuente: Autor

Al analizar los valores obtenidos, se puede establecer que aquellos factores que intervienen directamente sobre la rugosidad son: la intensidad de corriente (A), velocidad de avance (B) y el tipo de dieléctrico (D) ya que los valores correspondientes de “p” son menores al valor establecido de significancia ( $\alpha= 5\%$ ) tal como se puede observar en la tabla 28. Con lo cual se puede decir que si existe una variación significativa en la rugosidad superficial al hacer uso de un medio dieléctrico de carácter ecológico.

#### 4.3.1.4 Optimización de los parámetros de corte con relación a la rugosidad.

Para establecer los valores óptimos en relación a aquellos parámetros que se varió durante el proceso de corte, se ve la necesidad de emplear un software especializado en el campo estadístico, con el cual se determinará el efecto de los datos expuestos anteriormente. En este caso se desea minimizar el valor de la rugosidad a un aproximado de  $3,83 \mu\text{m}$  contemplado como un promedio al emplear la taladrina como medio dieléctrico, al igual que al ecológico correspondiente. En la figura 34 se observa los valores obtenidos a través de la optimización.

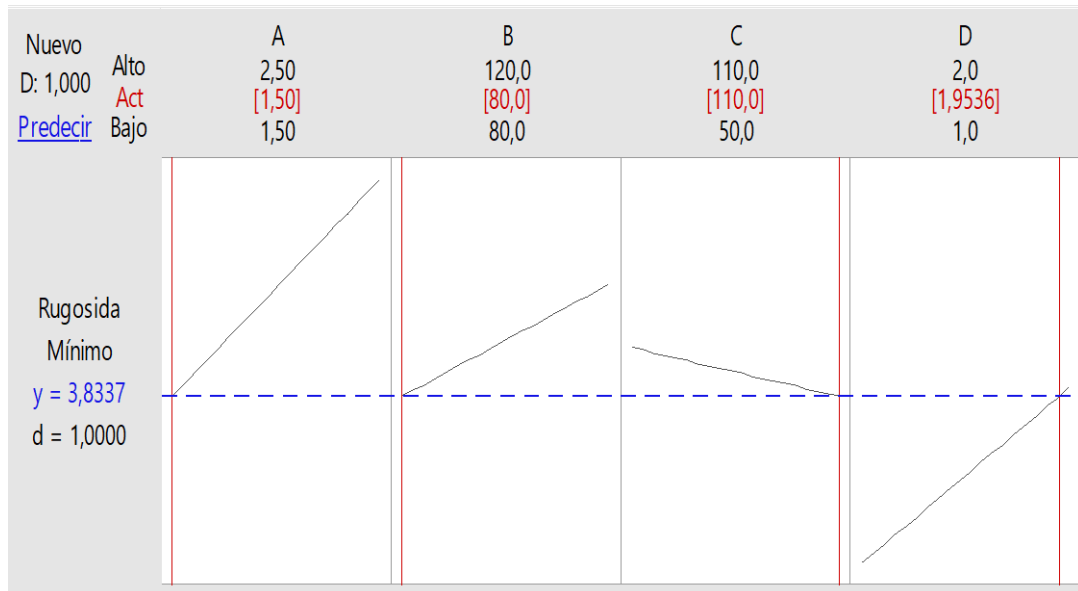


Figura 34. Optimización de los parámetros que influyen en la obtención del mínimo valor de rugosidad.

Fuente: Autor.

Realizada la optimización, claramente se observa que para obtener el valor objetivo de rugosidad se requiere aplicar una corriente de 1,5 A, una velocidad de avance de 80 mm/ min, con una rapidez del hilo de 110 m/ min y aplicando como medio refrigerante aquel que es de tipo ecológico.

Por lo cual se concluye con la aceptación de la hipótesis alternativa, la cual especifica que al aplicar un medio dieléctrico ecológico si existe variación en cuanto a la rugosidad superficial en la sección de desbaste, esta a su vez es menor en comparación a la obtenida bajo la acción de la taladrina.

### 4.3.2 Análisis de Varianza ANOVA de la Dureza superficial

#### 4.3.2.1 Hipótesis estadística para el análisis ANOVA de la Dureza

Hipótesis Inicial ( $H_0$ ): No hay variación en la dureza superficial del corte al usar un medio dieléctrico alternativo con respecto a lo convencional.

Hipótesis alternativa ( $H_A$ ): Si hay variación en la dureza superficial del corte al usar un dieléctrico alternativo con respecto a lo convencional.

#### 4.3.2.2 Análisis experimental

Al igual que en el caso de la rugosidad, se establece los factores con los cuales se obtuvo los especímenes para el análisis correspondiente. Por lo cual, cumple con lo expuesto en la tabla 33.

Tabla 33. Matriz de estudio del diseño factorial con 4 factores con respecto a la dureza en la zona de corte.

Número de corrida	A	B	C	D	Etiqueta de corrida	Dureza (HRC)	
						Replica I	Replica II
1	-	-	-	-	(1).	17,20	16,10
2	+	-	-	-	a	15,60	15,50
3	-	+	-	-	b	15,70	17,50
4	+	+	-	-	ab	17,40	15,80
5	-	-	+	-	c	15,50	18,10
6	+	-	+	-	ac	14,80	13,80
7	-	+	+	-	bc	15,00	14,80
8	+	+	+	-	abc	16,50	17,10
9	-	-	-	+	d	19,10	17,30
10	+	-	-	+	ad	18,10	17,40
11	-	+	-	+	bd	19,70	18,50
12	+	+	-	+	abd	16,40	17,10
13	-	-	+	+	cd	16,60	18,10
14	+	-	+	+	acd	16,50	16,50
15	-	+	+	+	bcd	18,80	18,10
16	+	+	+	+	abcd	16,60	16,20

Fuente: Autor

Se establece el mismo diseño factorial  $2^4$  ya que se contempló la aplicación de los mismos factores. En la tabla 34 se observa el comportamiento de los factores y combinaciones que tienen efecto sobre la dureza superficial de la zona de corte.

Tabla 34. Estimación de los efectos que influyen en la Dureza.

Término de modelado	Contrastes	Estimación del efecto	Suma de cuadrados	Contribución porcentual
A	-7,40	-0,463	1,711	7,46
B	2,50	0,156	0,195	0,85
C	-5,70	-0,356	1,015	4,42
D	12,30	0,769	4,728	20,60

<b>AB</b>	2,40	0,150	0,180	0,78
<b>AC</b>	0,40	0,025	0,005	0,02
<b>AD</b>	-4,00	-0,250	0,500	2,18
<b>BC</b>	0,70	0,044	0,015	0,07
<b>BD</b>	-0,70	-0,044	0,015	0,07
<b>CD</b>	-0,50	-0,031	0,008	0,03
<b>ABC</b>	4,00	0,250	0,500	2,18
<b>ABD</b>	-8,60	-0,538	2,311	10,07
<b>ACD</b>	-0,60	-0,037	0,011	0,05
<b>BCD</b>	1,50	0,094	0,070	0,31
<b>ABCD</b>	-2,60	-0,163	0,211	0,92
<b>Total</b>			<b>22,954</b>	

Fuente: Autor

Claramente se puede observar que el factor A (intensidad de corriente) contribuye con el 7,46% sobre el efecto de la dureza en la superficie donde se produjo el corte, al igual que el factor C (rapidez del hilo) con una aportación del 4,42 %, y el factor D (tipo de dieléctrico) con un valor de 20,60% de aportación es quien predomina en el efecto. Por otra parte, el factor B (velocidad de avance) no representa un valor de influencia considerable.

En el diagrama de Pareto para efectos estandarizados (figura 35), se observa el comportamiento de los factores con relación a la dureza. Donde el valor estandarizado es de 2,12 lo cual permite examinar que el factor D, A y C, son quienes establecen propiamente el estado superficial; de igual manera con el resto de combinaciones presentes. Además de ello, se puede concluir que el tipo de dieléctrico es quien faculta la cantidad de dureza en la zona de corte debido a la relación que presenta frente al valor estandarizado.

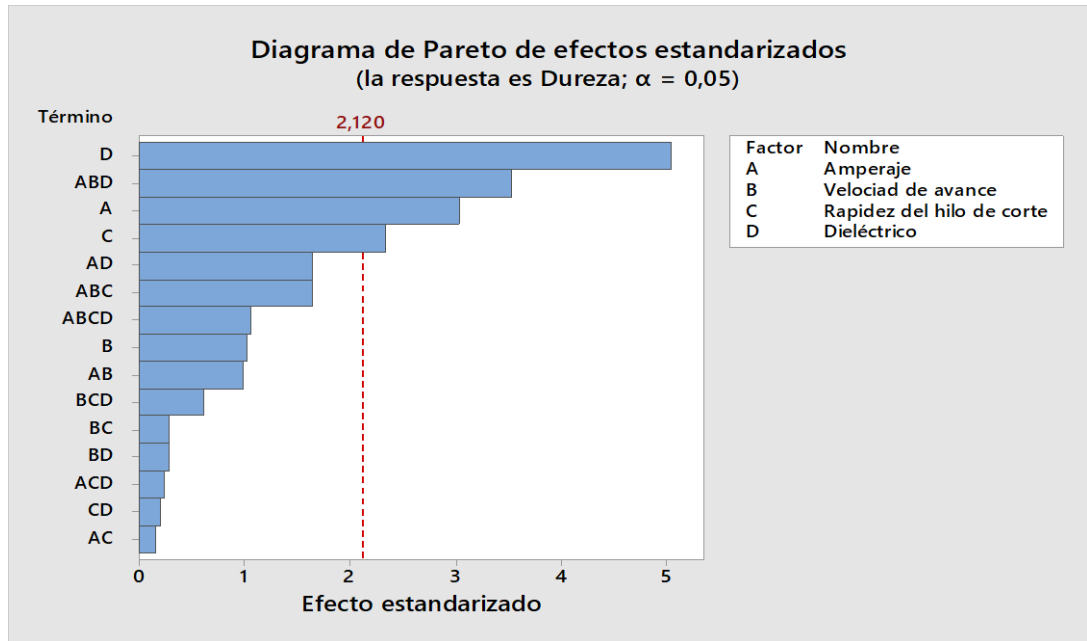


Figura 35. Diagrama de Pareto en función de la Dureza superficial.

Fuente: Autor.

#### 4.3.2.3 Resultado del Análisis ANOVA

En la tabla 35 se observa aquellos factores y sus respectivas combinaciones que tienen un alto énfasis sobre la dureza en la zona de corte, el cual se encuentra establecido en función al valor probabilístico “p”, con relación al valor de significancia propuesto para el nivel investigativo.

Tabla 35. Análisis ANOVA de la Dureza.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	Significancia
<b>A</b>	1	6,845	6,845	9,23	0,008	SI
<b>B</b>	1	0,7813	0,7813	1,05	0,32	NO
<b>C</b>	1	4,0613	4,0613	5,47	0,033	SI
<b>D</b>	1	18,9113	18,9113	25,49	0	SI
<b>A*B</b>	1	0,72	0,72	0,97	0,339	NO
<b>A*C</b>	1	0,02	0,02	0,03	0,872	NO
<b>A*D</b>	1	2	2	2,7	0,12	NO
<b>B*C</b>	1	0,0613	0,0613	0,08	0,778	NO
<b>B*D</b>	1	0,0612	0,0612	0,08	0,778	NO

<b>C*D</b>	1	0,0313	0,0313	0,04	0,84	NO
<b>A*B*C</b>	1	2	2	2,7	0,12	NO
<b>A*B*D</b>	1	9,245	9,245	12,46	0,003	SI
<b>A*C*D</b>	1	0,045	0,045	0,06	0,809	NO
<b>B*C*D</b>	1	0,2813	0,2813	0,38	0,547	NO
<b>A*B*C*D</b>	1	0,845	0,845	1,14	0,302	NO
<b>Error</b>	16	<b>11,87</b>	<b>0,7419</b>	-	-	-
<b>Total</b>	31	<b>57,7787</b>	-	-	-	-

Fuente: Autor

Claramente se observa que aquellos factores que intervienen directamente sobre la dureza son: la intensidad de corriente (A), Rapidez del hilo (C) y el tipo de dieléctrico (D) ya que los valores correspondientes de “p” son menores al valor establecido de significancia ( $\alpha= 5\%$ ).

Además, se puede tomar en cuenta al valor estadístico de Fisher, ya que, para los factores anteriormente mencionados, sus valores son altamente significativos. Tomando como mayor significancia a la intensidad de corriente y al medio dieléctrico aplicado en el estudio mencionado, ya que son los factores con un valor significativo de aportación durante el proceso de mecanizado.

#### **4.3.2.4 Optimización de los parámetros de corte con relación a la dureza.**

De igual manera se desea conocer los valores óptimos, que se encuentran involucrados en la cantidad de dureza máxima que alcanza la superficie donde se efectuó el corte. En la figura 36 se observa los valores de la cantidad de corriente, velocidad de avance, rapidez de corte por parte del hilo conductor y el tipo de fluido de corte, en función a sus máximas y mínimas cantidades para así obtener aquel valor que define propiamente a la cantidad más representativa.



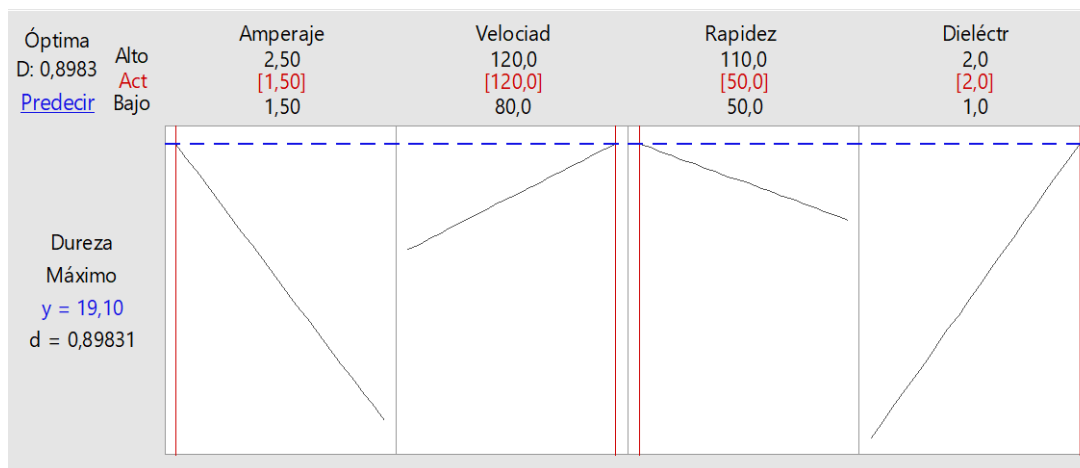


Figura 36. Optimización de parámetros que influyen en la obtención de la máxima dureza en zona de corte.

Fuente: Autor.

En función a lo obtenido a través del software estadístico, se establece que para alcanzar el valor objetivo de la dureza superficial (19,10 HRC), se requiere aplicar una intensidad de corriente igual a 1,5 A, con una velocidad de avance equivalente a los 120 mm/ min, con una rapidez de desplazamiento del hilo igual a 50 m/min; recalando la aplicación del medio dieléctrico ecológico, como aquel fluido ideal de corte.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa, en la cual se indica que al aplicar un medio dieléctrico de carácter ecológico existe variación en cuanto a la dureza alcanzada en la zona de corte. Cabe indicar que se obtienen valores mayores en comparación a aquellos obtenidos bajo la acción de la tradicional taladrina.

#### 4.4 Análisis químico del fluido dieléctrico posterior al mecanizado.

Una vez efectuado el proceso de corte, es necesario conocer las características físico químicas adquiridas por el fluido, ya que bajo el principio electro erosivo, el material particulado se integra al dieléctrico, variando sus propiedades iniciales.

En la tabla 36 se observa las características que posee la taladrina posteriormente al corte de las probetas., donde la proliferación de las bacterias es importante tomarlo en cuenta. Ya que, bajo normativas legales se regulariza la cantidad de contaminantes que podrían ser liberados sin un tratamiento previo. A la taladrina después de su uso respectivo, se lo considera como un fluido altamente edificador de efectos negativos que aceleran la degradación del medio que lo rodea.

Con la aplicación del medio dieléctrico ecológico (TL-ECO250-MG) se reduce notablemente la producción de bacterias, tal como se puede observar en la tabla 37, permitiéndole ser más amigable con el medio ambiente, respetando los lineamientos establecidos por las entidades reguladores, en cuanto a la deposición directa del fluido hacia el medio que lo rodee.

Tabla 36. Análisis microbiológico de la Taladrina posterior al corte.

<b>REPORTE DE RESULTADOS IR-LSW-0116</b>		
<b>ANALISIS FISICO QUIMICOS y MICROBIOLÓGICOS</b>		
<b>Cliente:</b> Diego Molina	<b>CI:</b> 0503064065	
<b>Muestra:</b> Dieléctrico convencional - (Taladrina)	<b>Hora:</b> 11:00 am	
<b>Fecha recepción muestra:</b> 23/6/2019		
<b>PARAMETROS BASICOS</b>		
	<b>RESULTADOS</b>	<b>UNIDAD</b>
Potencial de hidrogeno (pH)	8,12	
Color ( Pt-Co) 420nm	6810	UC
Olor	mineral	0 a 4
Turbiedad	3880	FAU
Conductividad	0,70	mS/cm
Solidos totales disueltos	350	ppm
Solidos totales suspendidos	3380	ppm
Temperatura	18,1	° C
<b>ANALISIS MICROBIOLÓGICOS</b>		
Total bacterias	Mayor a 100.000	ufc/ml

Fuente: Autor.

Tabla 37. Análisis microbiológico del dieléctrico ecológico (TL-ECO250-MG) posterior al corte.

<b>REPORTE DE RESULTADOS IR-LSW-0117</b>		
<b>ANALISIS FISICO QUIMICOS y MICROBIOLÓGICOS</b>		
<b>Cliente:</b> Diego Molina	<b>CI:</b> 0503064065	
<b>Nombre:</b> Dieléctrico ecológico (TL-ECO 250-MG)	<b>Hora:</b> 11:00 am	
<b>Fecha recepción muestra:</b> 23/6/2019		
<b>PARAMETROS BASICOS</b>		
	<b>RESULTADOS</b>	<b>UNIDAD</b>
Potencial de hidrogeno (pH)	9,45	
Color ( Pt-Co) 420nm	2720	UC
Olor	No especifico	0 a 4
Turbiedad	1040	FAU
Conductividad	1,14	mS/cm
Solidos totales disueltos	570	ppm
Solidos totales suspendidos	649	ppm
Temperatura	18,1	° C
<b>ANALISIS MICROBIOLÓGICOS</b>		
Total bacterias	25.000	ufc/ml

Fuente: Autor

En la figura 37 se observa la producción de bacterias durante 6 días de reposo de las muestras. Cabe recalcar que, debido a la turbidez de los fluidos, se imposibilita la determinación de elementos físicos – químicos expuestos en cada uno de ellos.

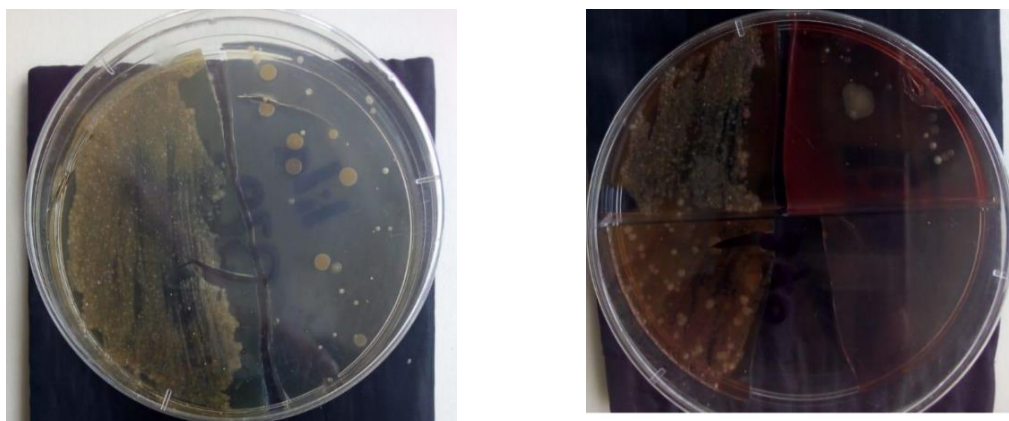


Figura 37. Producción de bacterias.

Fuente: Autor.

(a) Producción de bacterias: Taladrina (b) Producción de bacterias: TL-ECO250-MG

En función a los valores obtenidos de mayor relevancia en cuanto al análisis físico-químico realizado tanto al fluido convencional como a aquel que es de carácter ecológico, se concluye que la taladrina es un medio que permite el incremento excesivo de bacterias, lo cual se atribuye a la descomposición química que sufren sus componentes debido al proceso electroerosivo, caracterizándole así, como un fluido de alto grado de contaminación. Mientras que el TL-ECO250-MG denominado como ecológico, presentar un valor menor en cuanto a la producción de bacterias, lo cual le convertiría en el fluido de mayor aceptación, permitiendo así, relacionarlo directamente con el medio ambiente.

Cabe mencionar que el análisis fue efectuado por “LSW Chemical Control Engineer” ubicada en la ciudad de Latacunga, donde la empresa presta sus servicios para el análisis de fluidos residuales.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- De acuerdo al diagrama de Pareto obtenido en el análisis estadístico, se concluye que aquellos parámetros que se encuentran directamente ligados a la variación del estado superficial en la zona donde se produjo el corte, son: la cantidad de corriente aplicada, la velocidad de avance y el tipo de dieléctrico aplicado, dejando de lado la rapidez de desplazamiento del hilo ya que este factor no afecta en lo absoluto a la calidad superficial.
- Mediante la optimización de las variables que involucran en el mecanizado, se puede concluir que, tanto la intensidad de corriente, la velocidad de avance y el tipo de dieléctrico, son aquellos que establecen tanto a la rugosidad como a la dureza en la superficie de corte. Además, permite conocer los valores óptimos que me garantizan menor rugosidad y a su vez mayor dureza.
- Al efectuar el uso de un medio dieléctrico, donde sus propiedades establecen que es de carácter ecológico; se observa en primer lugar que el tiempo de mecanizado es ligeramente mayor, que al emplear como fluido de corte a la taladrina. Además, al realizar un análisis comparativo, claramente se observa que, con el uso de aquel alternativo, tanto el tiempo, como la rugosidad y dureza no fluctúan demasiado, manteniendo una tendencia a ser casi constantes.
- Bajo la acción de una misma cantidad de corriente (2,5 A), claramente se observa que la rugosidad máxima alcanzada con el uso de la taladrina es de 7,036  $\mu\text{m}$ , mientras que bajo la aplicación del TL-ECO250-MG (dieléctrico ecológico) la rugosidad máxima obtenida en la zona de corte es de 5,391  $\mu\text{m}$ . Al variar la cantidad de corriente a 1,5 A, observamos de igual manera que al aplicar el dieléctrico de uso común, la rugosidad presente es de 4,917  $\mu\text{m}$ , lo cual sigue siendo un valor elevado ya que al usar aquel denominado como

ecológico, el valor alcanzado fue de 4,516  $\mu\text{m}$ . En los dos casos se aprecia que, al emplear el dieléctrico de carácter ecológico, los valores obtenidos de rugosidad son menores. Esto permite garantizar el uso del mismo.

- La dureza sobre la superficie de corte, es otro de los efectos donde se han presentado cambios; contemplado los valores anteriormente mencionados en cuanto a la intensidad de corriente, se tiene que: al realizar el corte bajo la acción de los 2,5 A, la dureza del material no presenta mayor variación tanto para la aplicación de la taladrina al igual que para el ecológico. Pero si se aplica una intensidad de corriente de 1,5 A, la dureza superficial del corte tiene un incremento considerable mediante la acción del dieléctrico alternativo, alcanzando valores de hasta 19,1 HRC.
- Al relacionar a la rugosidad y dureza, se puede establecer que, para el uso de la taladrina se obtienen valores que fluctúan demasiado, mientras que con el ecológico se presenta una incertidumbre mínima, casi con una tendencia a ser constante a través del tiempo.
- Es importante recalcar que, si se considera un incremento en cuanto al tiempo de mecanizado, se alcanza valores menores en cuanto a la rugosidad, reduciendo el tiempo de uso del medio dieléctrico. Donde, debido al efecto electroquímico, el fluido adquiere una gran cantidad de agentes externos los cuales pueden no solo afectar a la integridad del equipo, sino que puede desatar alteraciones a la salud de quien este en constante manipulación del mismo.
- Mediante el análisis superficial-topográfico realizado a través del microscopio electrónico de barrido (SEM) sobre las muestras que presentaron valores máximos y mínimos en cuanto a la rugosidad. Frente a la aplicación del dieléctrico ecológico, se pudo visualizar la presencia de microvacíos y cierta cantidad de material resolidificado, donde debido al efecto erosivo, se visualiza una afectación térmica en la zona de corte. Mientras que, al emplear la taladrina como medio dieléctrico, se identificó ciertos pliegues de corte residuales con mayor número de restos fundidos resolidificados y la presencia de nubes de gotas derretidas.

## 5.2 Recomendaciones

- Establecer una correcta planificación de las actividades a ejecutarse durante el proceso de experimentación, con la finalidad de evitar la interrupción o postergamiento del análisis debido a inconvenientes que se presenten en los equipos a ser utilizados.
- Comprobar que el material base sea el indicado a través de un análisis por espectrofotometría, el cual permite conocer a ciencia cierta la composición química del elemento.
- Prever de que la máquina donde se va a ejecutar la extracción de las muestras se encuentre en óptimas condiciones de uso.
- Verificar que los equipos como es el caso del rugosímetro, durómetro y microscopio electrónico, se encuentren correctamente calibrados, lo cual permitirá una medición correcta y confiable de los valores a ser analizados.
- La aplicación de una normalidad de datos hace que los cálculos efectuados cumplan con las hipótesis establecidas.
- Cumplir con el procedimiento establecido por las normas, en cuanto se refiere a la toma de datos de rugosidad (ISO 1997) y dureza (ASTM E18).
- Realizar un análisis químico-residual de los fluidos empleados en el proceso de corte con la finalidad de conocer la cantidad de material particulado que se adhiere posteriormente al efecto electroquímico. Lo cual se deja propuesto para un posible estudio a futuro.

## **CAPÍTULO VI**

### **6.1 Datos informativos**

#### **6.1.1 Título**

Elaboración de un procedimiento de operación de mecanizado para el equipo de corte por electroerosión por hilo (WEDM) modelo DK7735 utilizando como dieléctrico ecológico el TL-ECO250-MG.

#### **6.1.2 Beneficiario**

El beneficiario directo del desarrollo del presente trabajo investigativo será la empresa “Ingeniería del Acero y Matricería”, al contar con documentación técnicamente argumentada que permita realizar una correcta operación de la máquina de corte, y a su vez alargar el tiempo de funcionamiento operativo de la misma, bajo estándares que aseguren la calidad del producto obtenido, introduciéndose al mercado bajo en el concepto de ecología.

#### **6.1.3 Equipo Técnico Responsable**

- Investigador: Ing. Diego Molina
- Tutor FICM – UTA: Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza, Mg.

### **6.2 Antecedentes de la propuesta**

Bajo nuevos procedimientos de fabricación que se deben cumplir al momento de efectuar un proceso de mecanizado, se han ido desarrollando varias investigaciones en cuanto a la forma de lubricación durante el proceso. Uno de ellos es la aplicación de ciertos medios líquidos como aceites orgánicos los cuales han permitido un amplio desarrollo investigativo, aunque su aplicación se ve algo restringida debido a la presencia de agentes oxidantes posteriormente al corte.

Por otro lado, se ha visto la necesidad de sustituir los medios líquidos por aquellos de carácter gaseoso. Lo cual ha permitido identificar ciertas limitaciones en su uso debido al desgaste excesivo que soporta la herramienta de desbaste. Cabe mencionar que de esta forma, el acabado superficial no es el deseado, lo que hace que modelos como estos, no se intensifiquen en su estudio.

Con el presente estudio se da un mayor soporte a la aplicabilidad de medios ecológicos como lo es el TL-ECO250-MG, donde bajo las mismas condiciones de mecanizado que al usar uno de carácter convencional, se alcanzan valores aceptables en cuanto a rugosidad o acabado superficial. Impulsando así el uso de dichos medios, con el fin de preservar el ecosistema que les rodea, a su vez, respetando los parámetros establecidos por la ley en cuanto al almacenamiento y manejo de desechos líquidos.

### **6.3 Justificación**

Proyectos investigativos en cuanto a desarrollar estrategias alternativas al uso de medios dieléctricos a base de hidrocarburos, los cuales por años han presentado afecciones respiratorias y alteraciones en la piel debido a su contacto directo, resaltando que la taladrina como tal presenta una Demanda Química Residual (DBQ) elevada; razón por la cual su tratamiento requiere de un proceso exigente previo a su almacenamiento o ingreso hacia el medio ambiente, lo cual presenta un elevado costo.

Por otra parte, al emplear un dieléctrico ecológico (TL-ECO250-MG) se lo puede integrar de forma directa hacia el medio que lo rodee, tomando en cuenta la calidad de las piezas mecanizadas al igual que la integridad de la máquina, no se vean afectas por la acción del fluido. De esta manera, se espera promover el uso del mismo en el interior de la urbe donde reside la empresa.

Al desarrollar un proceso de operación que permita manipular la máquina electroerosionadora, bajo el conocimiento de los parámetros adecuados de corte, permitirá conocer con anterioridad las características a obtenerse en las piezas una vez finalizado el mecanizado, cumpliendo con los requerimientos dados por el cliente, en el mejor tiempo posible para cumplir con el proceso, y a la vez prolongando la vida útil del mecanismo. Convirtiendo a la máquina, en una herramienta eficaz y eficiente, dando cumplimiento a estándares que certifiquen la calidad del producto, respetando aquellas normativas en cuanto al uso de aceites de carácter industrial.



De una u otra manera se espera la aceptación de estos medios ecológicos para garantizar un equilibrio con la sociedad y el medio que nos rodea, respaldando el cuidado hacia la naturaleza.

## **6.4 Objetivos**

### **6.4.1 General**

Elaborar de un procedimiento de operación de mecanizado para el equipo de corte por electroerosión por hilo (WEDM) modelo DK 7735 de la empresa “Ingeniería del Acero y Matricería” utilizando como dieléctrico ecológico TL-ECO250-MG.

### **6.4.2 Específicos**

- Suministrar criterios o instrucciones de una forma sistemática, explícita y ordenada, acerca del correcto uso del equipo mecánico.
- Estructurar correctamente los valores límites de las variables de las cuales depende el equipo.
- Identificar los valores otorgados a cada parámetro, y su influencia sobre la rugosidad y dureza de la pieza obtenida.

## **6.5 Análisis de factibilidad**

El crear un procedimiento de operación de mecanizado para el equipo de corte por electroerosión por hilo (WEDM) modelo DK 7735 basado en los parámetros previamente conocidos y analizados, enfatizando en la aplicación del medio dieléctrico alternativo. Cuyos valores técnicamente argumentados, son el punto de partida para identificar una correcta estructura de uso, proponiendo alternativas que se ajusten a la necesidad del cliente en cuanto a calidad se refiere.

## **6.6 Fundamentación**

### **6.6.1 Descripción de un manual operativo**

Un manual operativo representa una guía técnica especializada, en la cual se especifica las instrucciones necesarias para un correcto funcionamiento del equipo. Además, forma parte de una referencia para resolver inconvenientes que se susciten durante la

operación de la máquina. En fin, un manual técnico es la respuesta a cualquier necesidad que se presente durante el proceso de mecanizado.

### 6.6.2 Características de la máquina

Un equipo de electroerosión por hilo debe estar conformado por un conjunto de varios sistemas que permitan el correcto funcionamiento de la misma. Como se puede observar en la figura 38, la maquina debe estar compuesta por:

- Sistema de control CNC, conformado por subsistemas como lo es el cabezal de desplazamiento vertical (eje z), mesa de trabajo móvil (comprendida por el plano xy).
- Hilo conductor de energía, cuya función consiste en la remoción del material base; por lo general está hecho de tungsteno con un bajo porcentaje en cobre.
- Sistema de distribución de dieléctrico a través del equipo.
- Sistema de recirculación y filtrado del dieléctrico.
- Sistema CAD, donde se efectúa el dimensionamiento de la pieza a ser mecanizada.

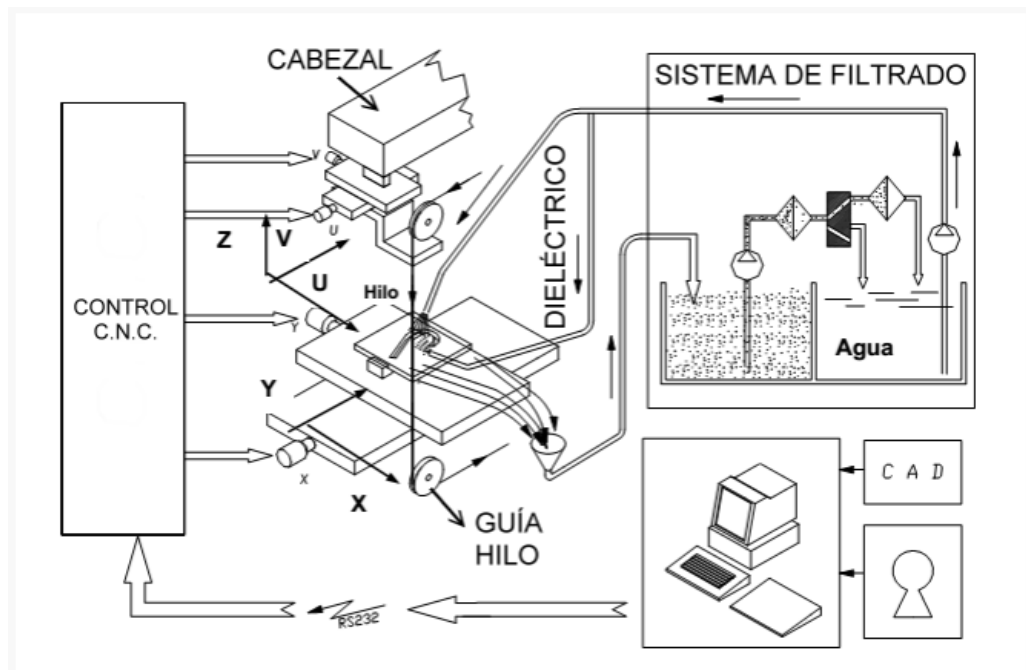


Figura 38. Componentes que integran una máquina electroerosionadora de hilo [17].

Donde se observa todos los sistemas y subsistemas de los cuales se encuentra compuesta la máquina de corte por electroerosión.

Como se especificó durante el capítulo 4, el proceso se llevó a cabo en una máquina electroerosionadora por hilo de la empresa “Ingeniería del Acero y Matricería”, donde la máquina de corte, posee las siguientes características técnicas especificadas por el proveedor:

- Denominación comercial del equipo: EDM WIRE CUT MACHINE “Jiangsu Fangzheng CNC Machine Tool Co.,LTD.”
- Modelo: DK 7735
- Voltaje: 220 V / 50 Hz
- Carrera en el plano xy: 350 x 450 mm
- Altura de corte: 450 mm
- Corte cónico:  $\pm 3^\circ$  / 80 mm
- Peso de la máquina: 1200 Kg

En la figura 39, se observa a breves rasgos la conformación del equipo con todos sus elementos primordiales.



Figura 39. Máquina Electroerosionadora DK 7735.

Fuente: Autor.

De acuerdo a las funciones mecánicas y físicas que presenta el equipo, se enfatizan aquellos parámetros que se puede modificar en función al proceso de operación, son los siguientes:

- Espesor del material base (mm)

- Corriente (A)
- Velocidad de avance (mm/min)
- Rapidez del hilo (m/min)
- Tipo de dieléctrico aplicado (L)

### 6.6.3 Características del fluido dieléctrico.

Se analiza la aplicación de un medio dieléctrico de tipo ecológico, razón por la cual se detalla sus particularidades más relevantes, esto se puede observar en la tabla 38, donde se detalla con mayor precisión las características tanto físicas como técnicas de las cuales forma parte el fluido ecológico. Cabe indicar que su uso y aplicación se encuentra bajo normas legales que regularizan su aplicación en el campo industrial.

Tabla 38. Especificaciones técnicas del dieléctrico TL-ECO250-MG (Anexo 2).

<b>TL-ECO250-MG</b>	
<b>Refrigerante de corte Ecológico</b>	
<b>Características Físicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Posee aditivos anticorrosivos y conservantes.</li> <li>- Tipo de fluido apto para el corte de todo tipo de aleaciones en especial, aceros y aluminios.</li> <li>- Obtención de superficies con baja rugosidad.</li> <li>- Garantiza un mínimo desgaste de la herramienta de corte (hilo conductor).</li> </ul>
<b>Características Técnicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ph al 5 % :(9 – 9,4); norma DIN 51369</li> <li>- Ensayo de corrosión al 5% (200 ppm Cl); norma IP 287</li> <li>- Estabilidad de la emulsión al 5% 30 HF (correcta), norma ASTM D-1479</li> <li>- Ensayo de espuma al 5% 20 HF (300/750/200); norma CNOMO D65-5212</li> </ul>

Fuente: Autor

### 6.6.4 Características del hilo de corte

Para que el efecto electroquímico se realice sin mayor contratiempo, es necesario conocer las características que definen la aplicabilidad del mismo. En la tabla 39 se detallan ciertas características del hilo de corte a base de molibdeno y tungsteno.

Tabla 39. Características del hilo de corte.

<b>Hilo de corte proceso WEDM a base de molibdeno y tungsteno.</b>	
<b>Características</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compuesto formado por el 80 % de Tungsteno, recubiertos por un 20% de Molibdeno.</li> <li>- Diámetro del hilo: desde la 0,08 a 0,14 (mm).</li> <li>- Se lo aplica donde es necesario altas resistencias de tracción.</li> <li>- Baja conductividad.</li> <li>- Elevado punto de fusión.</li> </ul>

Fuente: Autor

## 6.7 Metodología

### 6.7.1 Etapas del proceso de operación del equipo.

En la figura 40 se observa la secuencia a seguir para la correcta operación en cuanto al mecanizado del acero K100 a través del proceso de electroerosión por hilo, bajo la influencia del dieléctrico ecológico denominado TL-ECO250-MG.

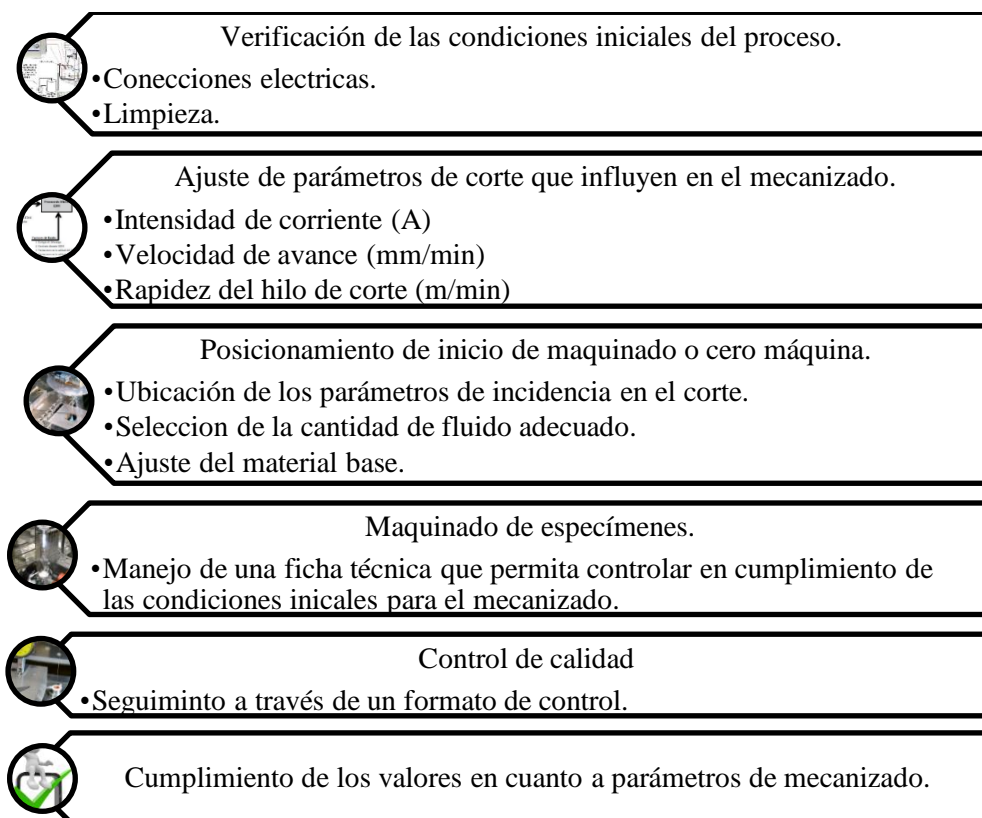


Figura 40. Proceso de operación del equipo.

Fuente: Autor

### 6.7.2 Condiciones iniciales del proceso de maquinado.

Bajo las características de la máquina, se establece valores en cuanto a la cantidad de potencia eléctrica, para lo cual es necesario que la fuente de alimentación del equipo cumpla con los requisitos necesarios, con la finalidad de proteger de posibles descargas eléctricas o de la presencia de posibles corrientes parasitas. En la figura 41, se detalla la forma correcta de poseer un circuito eléctrico que garantice el correcto funcionamiento de la máquina, al igual que del proceso a efectuarse.

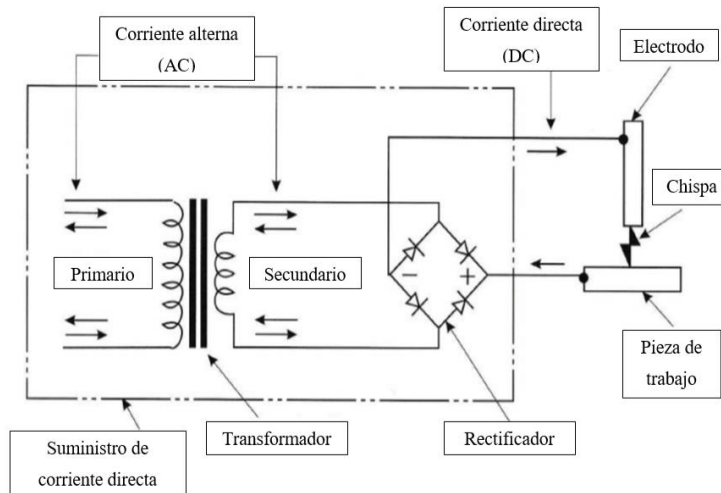


Figura 41. Instalación eléctrica de la máquina electroerosionadora [20]

En la figura 42. Se observa la forma correcta de colocar los controladores de inicio y finalización del arco eléctrico para generar el arco eléctrico de una forma muy eficaz y precisa. Donde el tiempo de acción se encuentra en microsegundos, presentando un desgaste aproximado de 0,025 mm por cada intervalo de tiempo presentado durante el ciclo de operación.

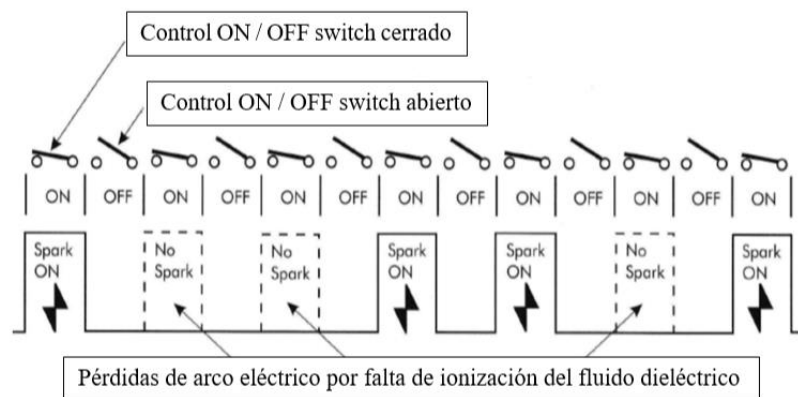


Figura 42. Instalación eléctrica de la máquina electroerosionadora [20].

Por otra parte, la limpieza del equipo cumple un rol muy importante, ya que de ello depende la presencia o no de imperfecciones en la zona de corte o a su vez puede ocasionar accidentes hacia la persona que esté operando el equipo, debido a la presencia de derramamientos del fluido de corte, o por la presencia de objetos en la mesa de trabajo. Por lo cual, el espacio de trabajo deberá estar libre de cualquier objeto que este obstruyendo la operación.

### 6.7.3 Ajuste de parámetros iniciales de corte de la máquina electroerosionadora.

Como ya se explicó anteriormente, se establece los siguientes parámetros de uso, tomando en cuenta que uno de los factores primordiales, es el espesor a ser maquinado. Esto se puede observar en la tabla 40.

Tabla 40. Parámetros iniciales de control, bajo las especificaciones del proveedor del equipo.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor máximo</b>
Para espesores de 50 a 100 (mm)		
Corriente (A)	1	3
Ancho del pulso ( $\mu$ s)	32	32
Velocidad de avance (mm/min)	80	120
Para espesores de 150 a 200 (mm)		
Corriente (A)	1	2,5
Ancho del pulso ( $\mu$ s)	32	32
Velocidad de avance (mm/min)	150	380
Para espesores de 250 a 400 (mm)		
Corriente (A)	1	2

Ancho del pulso ( $\mu\text{s}$ )	64	64
Velocidad de avance (mm/min)	410	460

Fuente. Autor.

Para el caso en relación al estudio, cabe recalcar que el ancho de pulso no fue una variable que tomara influencia ya que su valor es constante y no varía debido al espesor que fue mínimo (5 mm). A través de los valores expuestos en la tabla 36, y en función a los valores comprendidos en cuanto a los parámetros de estudio (tabla 24 del inciso 4.9.1.1), se procede a la aplicación de una ecuación de regresión lineal, la cual permita predecir el valor de rugosidad y dureza comprendida entre los valores límites de cada variable de análisis. Tomando en cuenta aquellos factores que afectan directamente sobre las variables de salida expuestas en los incisos 4.9.1.2 y 4.10.1.2 respectivamente. La ecuación de regresión lineal que relaciona a la rugosidad superficial se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 R(a) = & -23,8 + 9,92(A) + 0,296(B) + 0,186(C) + 10,64(D) - 0,1042(A * B) \\
 & - 0,0545(A * C) - 2,97(A * D) - 0,00324(B * C) - 0,1199 B * D \\
 & - 0,0705 C * D + 0,001302(A * B * C) + 0,0367(A * B * D) \\
 & + 0,0105(A * C * D) + 0,001382(B * C * D) - 0,000483(A * B * C * D)
 \end{aligned}$$

Ecuación 3

Por otra parte, la ecuación de regresión lineal que caracteriza a la dureza en la zona donde se produjo el corte, se presenta de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Dureza} = & 6,8 + 1,9(A) + 0,087(B) + 0,504(C) + 1,7(D) - 0,02(A * B) - 0,237(A * C) \\
 & + 1,48(A * D) - 0,00531(B * C) + 0,012(B * D) - 0,24(C * D) \\
 & + 0,00246(A * B * C) - 0,0208(A * B * D) + 0,103(A * C * D) \\
 & + 0,00248(B * C * D) - 0,00108(A * B * C * D)
 \end{aligned}$$

Ecuación 4

En la tabla 41, se observa los valores obtenidos tomando en cuenta la variabilidad de la cantidad de corriente, velocidad de avance, rapidez del hilo y en este caso bajo la aplicación del dieléctrico ecológico que por efecto de estudio se lo tomó como un valor constante e igual a 2.



Los valores que se adquiere a través de la interpretación de cada ecuación, son similares a los adquiridos mediante el proceso experimental, presentando una mínima variabilidad en sus cantidades.

Tabla 41. Valores de rugosidad y dureza bajo la aplicación de las variables de ajuste de la máquina electroerosionadora.

<b>Amperaje (A)</b>	<b>V - F: avance (mm/min)</b>	<b>Rapidez_hilo (m/min)</b>	<b>Dieléctrico (TL-ECO 250-MG)</b>	<b>Rugosidad (µm)</b>	<b>Dureza (HRC)</b>
1	80	50	2	3,51	18,46
1	90	70	2	3,67	18,70
1	100	90	2	3,78	18,92
1	110	110	2	3,83	19,12
1	120	130	2	3,82	19,30
1,5	80	50	2	4,10	18,25
1,5	90	70	2	4,16	18,22
1,5	100	90	2	4,23	18,23
1,5	110	110	2	4,31	18,27
1,5	120	130	2	4,40	18,36
2	80	50	2	4,69	18,04
2	90	70	2	4,65	17,74
2	100	90	2	4,68	17,53
2	110	110	2	4,80	17,42
2	120	130	2	4,99	17,42
2,5	80	50	2	5,28	17,84
2,5	90	70	2	5,14	17,26
2,5	100	90	2	5,14	16,84
2,5	110	110	2	5,28	16,58
2,5	120	130	2	5,57	16,48
3	80	50	2	5,88	17,63
3	90	70	2	5,63	16,77
3	100	90	2	5,59	16,14
3	110	110	2	5,77	15,73
3	120	130	2	6,16	15,53

Fuente: Autor.

Al variar los parámetros de corte de forma creciente, se observa que la rugosidad superficial también presenta un valor de incremento, lo opuesto sucede con la dureza en la capa superficial donde se genera el corte.

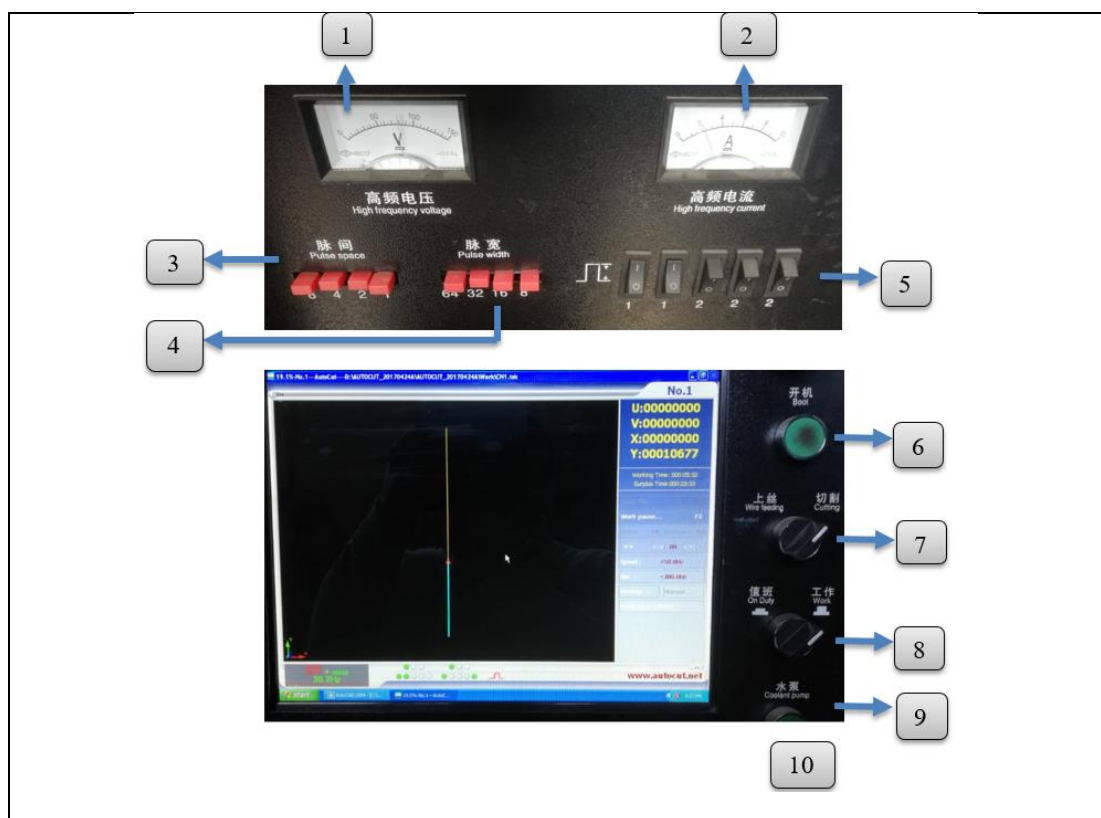
#### 6.7.4 Puesta en marcha del equipo o cero máquina.

Para una mejor comprensión en cuanto al manejo y activación de cada sistema de cual forma parte el equipo de electroerosión por hilo (WEDM), es necesario identificar y conocer aquellos componentes de los cuales depende el proceso de mecanizado.

En la Tabla 42 se detalla a cada elemento que conforman el tablero de control del equipo, indicando la función de mando que implica antes y durante la operación o manipulación de la máquina electroerosionadora, detallando sus valores límites permitidos durante el proceso de mecanizado.

Varios de ellos se encuentran ligeramente relacionados, tal es el caso de la frecuencia de corte, la cual se establece en función de la cantidad de corriente que se aplique durante el proceso de corte.

Tabla 42. Descripción del panel de control.



N°	Descripción
1	<p><b>Voltímetro.</b></p> <p>Permite observar la marcación de la cantidad de voltaje aplicado durante el efecto de corte. Por lo general se espera que la aguja marque aproximadamente la cantidad suministrada por la fuente (110 v)</p>
2	<p><b>Amperímetro.</b></p> <p>Permite visualizar la cantidad de corriente efectuada en el proceso de corte, se encuentra ligada con la amplitud de frecuencia. Dentro del rango de 0 a 4 A, lo ideal es mantener constante dicho valor y que no exceda de los 3 A.</p>
3	<p><b>Espacio entre pulso.</b></p> <p>Representa el distanciamiento entre cada pulso, relacionado con el ciclo de cada frecuencia.</p>
4	<p><b>Ancho de pulso.</b></p> <p>Relacionado con el periodo de la frecuencia de pulso. Su valor oscila desde los 8 hasta los 64 <math>\mu</math>s, en función al espesor de trabajo.</p>
5	<p><b>Amplitud de la frecuencia de corriente.</b></p> <p>Directamente relacionado con la cantidad de corriente aplicada durante el efecto químico. Las configuraciones expuestas están en relación de aproximadamente 0,5 A por cada uno de ellos.</p>
6	<p><b>Botón de arranque.</b></p> <p>Inicia el sistema CAD del equipo, manteniendo en reposo el desplazamiento de la mesa de trabajo, al igual que del suministro de fluido y del husillo del hilo de tungsteno (herramienta que produce el desbaste).</p>
7	<p><b>Perilla de activación o desactivación del hilo de corte.</b></p> <p>Inicia el movimiento del husillo del motor que a su vez permite el desplazamiento del alambre que producirá el corte de la pieza solicitada.</p>
8	<p><b>Perilla de iniciación del equipo</b></p>

	Da inicio al proceso y establece la continuidad del trabajo de desbaste del elemento mecánico.
9	<b>Botón de activación del refrigerante.</b> Activa a la bomba que distribuye el refrigerante hacia donde se va a realizar el proceso, manteniendo constante la cantidad de volumen suministrado en la zona donde se efectuará el efecto electroquímico.
10	<b>Botón de emergencia.</b> Realiza el paro inmediato de todos los sistemas, tanto electrónicos como mecánicos, al presentarse alguna situación de emergencia.

Fuente: Autor.

En el sistema CAD (Software: AutoCut 6.0.170418 y Hardware: WedmHs-20140305-001) del equipo se puede establecer la geometría del objeto, al igual que el monitoreo de las variables que están directamente ligadas al proceso; tal es el caso de la velocidad de avance (V-F) establecido bajo la unidad de mm/min, la frecuencia del ciclo de avance medida en Hz, y la rapidez del husillo que establece el movimiento del hilo conductor medido en m/min. Cabe mencionar que la frecuencia del ciclo de avance se relaciona directamente con la cantidad de corriente aplicada al proceso de corte, por lo cual no es necesario conocer la variabilidad de la misma.

#### **6.7.4.1 Operación de la máquina electroerosionadora modelo DK 7735.**

Una vez comprendido el funcionamiento de cada uno de los elementos que forman parte del control de la máquina, es necesario considerar una correcta operación de la misma bajo el criterio expuesto en la figura 43, donde se expresa una secuencia adecuada de uso.

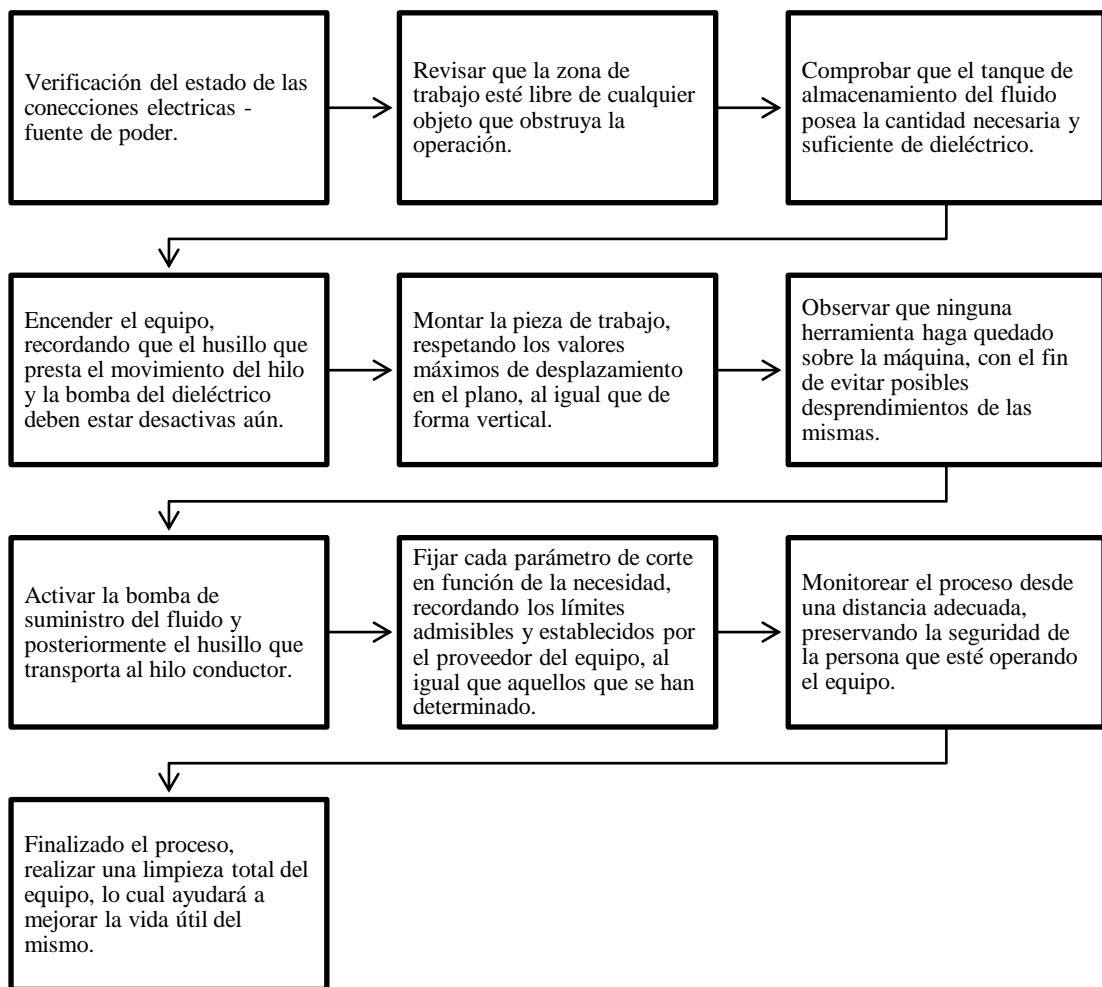


Figura 43. Operación de la máquina electroerosionadora DK 7735.



Fuente: Autor.

Recordar que, el uso de la botonera de paro de emergencia solo se podrá utilizar cuando sea necesario el cese inmediato del movimiento total de la máquina, o a su vez cuando la seguridad del operador se vea amenazada.

### 6.7.5 Control de la operación de corte.

Previo a la operación directa para la obtención de piezas. Es necesario que la maquina cumpla con un número de requisitos. En la tabla 43 se especifica la ficha técnica a llevar durante el proceso, donde se recomienda realizar un primer corte, el cual permita la visualización del correcto funcionamiento del equipo, y de igual forma, que no presente variación en la fijación de los parámetros.

Tabla 43. Ficha técnica para la calibración y puesta en marcha del equipo.

 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b> <b>MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO - COHORTE 2017</b> 		
<b>FICHA TÉCNICA DE CALIBRACIÓN Y PUESTA EN MARCHA</b>		
Datos informativos		
<b>ACTIVIDAD A REALIZARCE</b>	Calibración y puesta en marcha	
<b>Fecha</b>	.....	
<b>Supervisado por</b>	.....	
Especificaciones Técnicas		
Máquina Electroerosionadora de hilo (WEDM)		
Denominación comercial de la máquina	EDM WIRE CUT MACHINE “Jiangsu Fangzheng CNC Machine Tool Co.,LTD.”	
Modelo	DK 7735	
Voltaje	220V/50hZ	
Carrera en el plano	350 x 450 mm	
Altura de corte	450 mm	
Corte cónico	±3°/80 mm	
Peso de la máquina	1200 Kg	
Fluido Dieléctrico		
TL-ECO250-MG (Grado ecológico)		
Alambre de corte		
Composición química	Tungsteno 80 % y Molibdeno 20%	
Diámetro	0,14 (mm)	
Indicaciones		
Seleccionar mediante una X el cumplimiento o no del correcto procedimiento a efectuarse para la operación de mecanizado		
DETALLE DEL PROCEDIMIENTO A SEGUIR	CUMPLIMIENTO	
	SI	NO
El operador hace uso de su equipo de protección personal.		
Las instalaciones eléctricas son las adecuadas para el proceso, garantizando la suministración correcta de energía hacia el equipo.		
Presencia de objetos sobre el contorno del equipo, al igual que sobre el mismo.		
La cantidad de fluido dieléctrico en el tanque es la correcta.		
Antes de encender el equipo, todas las botoneras deben estar desactivadas		
Existe la presencia de herramientas que obstaculicen la fijación de la mesa de trabajo		
El encendido del equipo debe ser normal, es decir sin la presencia de vibraciones o ruidos desconocidos.		
El material base debe ser sujetado manteniendo paralelismo con los ejes del plano de la mesa de trabajo.		
La activación del husillo portador del hilo debe ser sin presencia de atascamientos.		
La activación de la bomba de distribución del dieléctrico debe permitir que el caudal del fluido sea constante		
Se realiza un acercamiento entre el material base y la herramienta de trabajo para efectuar el cero máquina.		
La fijación de parámetros se la realiza respetando los valores máximos y mínimos establecidos		
Se da inicio al efecto de corte, una vez cumplido las indicaciones anteriores		
Se monitorea el proceso de corte manteniendo una distancia adecuada preservando la seguridad.		
<b>Nota: Se establece que el manejo del equipo de electroerosión es correcto y a su vez se asegura que la forma de la pieza a ser obtenida es la correcta siempre y cuando se cumpla en la totalidad con el procedimiento en detalle</b>		
Observaciones:		
<b>Aprobación por el supervisor:</b>		
Nombre: .....		
C.I.: .....		
Firma: .....		

Fuente: Autor.

### **6.7.6 Control de calidad**



Un control de calidad va más allá de la verificación de las piezas obtenidas posteriormente al proceso. Por lo contrario, se trata de establecer una estrategia con la finalidad de definir parámetros adecuados bajo un buen manejo de los mismos. Además, conlleva aquellas estrategias a seguir para obtener el producto en el menor tiempo posible, al igual que, el tipo de herramienta a utilizar, condiciones de trabajo y la trayectoria a seguir bajo la implementación de un software diseñado para el dimensionamiento del objeto solicitado.

El control de la calidad inicia por una etapa muy elemental como la es la inspección, durante la cual se considera ciertas etapas secuenciales que se deberá cumplir durante el desarrollo de la operación de la máquina. Por otra parte, la calidad se establece a través del producto, usuario, producción y bajo estándares que acrediten a la misma. Lo cual permite la implantación de un modelo de evaluación, donde se especifique la metodología empleada para determinar cierto producto.

En relación a lo comprendido por calidad, y bajo las características en la cual se encuentra la empresa anteriormente mencionada, surge la necesidad de crear un formato, a través del cual se establecen ciertas características que deberá cumplir previo al proceso de mecanizado, para posteriormente al mismo, realizar una comparación y finalmente la aprobación o no del elemento obtenido.

Cabe recalcar que el proceso se lleva a cabo a través de la aplicación del dieléctrico ecológico (TL-ECO250-MG) seleccionado durante el proceso investigativo, y bajo los parámetros de mecanizado como lo son: intensidad de corriente (A), velocidad de avance (mm/min) y rapidez del hilo de corte (m/min), mencionados a través del estudio. En la tabla 44 se observa la estructura del formato, donde se indica datos informativos, especificaciones iniciales como lo es el tipo de material base, dimensionamiento del objeto a ser mecanizo y ciertas características adicionales. Para posterior a ello, relacionarlo con lo establecido por la normativa de rugosidad, y así establecer el grado de calidad en cuanto al acabado superficial se refiere, además, cumpliendo con lo requerido por la persona que solicite la ejecución a través de dicho proceso.

Tabla 44. Formato de control de calidad.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO - COHORTE 2017																																																														
INFORME DE CONTROL DE CALIDAD																																																														
Datos informativos																																																														
Actividad a realizarse	Mecanizado no convencional	Denominación del producto	.....																																																											
Solicitado por	.....	Fecha	___/___/___																																																											
Realizado por	.....	Supervisado por	.....																																																											
Especificación de la pieza a obtenerse		.....																																																												
Parámetros - proceso de mecanizado																																																														
Especificación del Material Base	.....																																																													
Proceso	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)																																																													
Tipo de hilo de corte	Alambre de tungsteno, diámetro: 0,08 a 0,14 (mm)																																																													
Tipo de fluido dieléctrico	Ecológico (TL-ECO250-MG)																																																													
Temperatura ambiente	.....																																																													
Geometría del espécimen		Selección de parámetros iniciales de corte																																																												
Regular	Irregular	Intensidad de corriente (A)	<input type="checkbox"/> mín: 1,5 <input type="checkbox"/> máx: 2,5																																																											
(Anexar plano con medidas)	(Anexar plano con medidas)	V - F (avance mm/min)	<input type="checkbox"/> mín:80 <input type="checkbox"/> máx: 120																																																											
		Rapidez_hilo (m/min)	<input type="checkbox"/> mín: 50 <input type="checkbox"/> máx:110																																																											
Muestra fotográfica de la pieza obtenida																																																														
.....																																																														
Características- Equipo de medición de rugosidad (MITUTOYO SJ210)																																																														
$\lambda_c$	0,8 $\mu\text{m}$	Norma	ISO 1997																																																											
$\lambda_s$	2,5 $\mu\text{m}$	Mediciones	x5																																																											
Registro de mediciones - Ra ( $\mu\text{m}$ )																																																														
Denominación del producto	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio ( $\mu\text{m}$ )																																																								
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....																																																								
Grado de acabado superficial con relación a la rugosidad media obtenida																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">VALORES DE RUGOSIDAD (RA) EN MICRAS</th> <th colspan="2">GRADOS DE CALIDADES DE RUGOSIDAD</th> </tr> <tr> <th><math>\mu\text{m}</math></th> <th><math>\mu\text{in}</math></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50</td><td>2000</td><td></td><td>N12</td></tr> <tr><td>25</td><td>1000</td><td></td><td>N11</td></tr> <tr><td>12.5</td><td>500</td><td></td><td>N10</td></tr> <tr><td>6.3</td><td>250</td><td></td><td>N9</td></tr> <tr><td>3.2</td><td>125</td><td></td><td>N8</td></tr> <tr><td>1.6</td><td>63</td><td></td><td>N7</td></tr> <tr><td>0.8</td><td>32</td><td></td><td>N6</td></tr> <tr><td>0.4</td><td>16</td><td></td><td>N5</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>8</td><td></td><td>N4</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>4</td><td></td><td>N3</td></tr> <tr><td>0.05</td><td>2</td><td></td><td>N2</td></tr> <tr><td>0.025</td><td>1</td><td></td><td>N1</td></tr> </tbody> </table>					VALORES DE RUGOSIDAD (RA) EN MICRAS		GRADOS DE CALIDADES DE RUGOSIDAD		$\mu\text{m}$	$\mu\text{in}$			50	2000		N12	25	1000		N11	12.5	500		N10	6.3	250		N9	3.2	125		N8	1.6	63		N7	0.8	32		N6	0.4	16		N5	0.2	8		N4	0.1	4		N3	0.05	2		N2	0.025	1		N1	Observaciones:	
VALORES DE RUGOSIDAD (RA) EN MICRAS		GRADOS DE CALIDADES DE RUGOSIDAD																																																												
$\mu\text{m}$	$\mu\text{in}$																																																													
50	2000		N12																																																											
25	1000		N11																																																											
12.5	500		N10																																																											
6.3	250		N9																																																											
3.2	125		N8																																																											
1.6	63		N7																																																											
0.8	32		N6																																																											
0.4	16		N5																																																											
0.2	8		N4																																																											
0.1	4		N3																																																											
0.05	2		N2																																																											
0.025	1		N1																																																											
Aplicación de la Norma: ISO 1997					.....																																																									
.....					.....																																																									
.....					.....																																																									
.....					.....																																																									
.....					.....																																																									
.....					.....																																																									
.....					.....																																																									
.....					.....																																																									
Resultados de la operación																																																														
Cumple con lo solicitado	<input type="checkbox"/>																																																													
No cumple con lo solicitado	<input type="checkbox"/>																																																													
Firma del Solicitante:	Firma del Responsable:		Firma del Supervisor:																																																											
.....	.....		.....																																																											
C.I:	C.I:		..... C.I:																																																											

Fuente: Autor.



### 6.7.7 Valores de rugosidad y dureza en función al cumplimiento de los parámetros establecidos para el mecanizado.

De acuerdo a los valores alcanzados en el estudio realizado durante el capítulo 4 del presente trabajo investigativo, se puede expresar un resumen la variabilidad de los parámetros de acuerdo al grado de rugosidad alcanzada, al igual que el valor de dureza final que se obtuvo en la superficie de corte.

En la tabla 45 se exponen los valores de los parámetros con los cuales se trabajó, tomando en cuenta que el espesor de las muestras extraídas no varió (5 mm), y a su vez, respetando lo indicado por el proveedor del equipo mecánico. Cabe recalcar que el material empleado para la experimentación fue una barra de acero K100 (estado de suministro: recocido 248 HB-máx.).

Tabla 45. Valores establecidos de rugosidad, dureza y tiempo de mecanizado con relación a la calidad final obtenida.

<b>Medio Dieléctrico: Ecológico (TL-ECO250-MG)</b>				
<b>Corriente (A)</b>	<b>Velocidad de avance (mm/min)</b>	<b>Tiempo de mecanizado (min)</b>	<b>Rugosidad (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Dureza (HRC)</b>
2,5	80	8,378	4,956	17,125
2,5	120	9,005	5,262	16,575
1,5	80	14,993	3,976	17,775
1,5	120	15,543	4,440	18,775

Fuente: Autor

Bajo la presencia del medio dieléctrico de carácter ecológico se observa que, al aplicar una intensidad de corriente igual a 1,5 A y una velocidad de avance equivalente a los 80 mm/min, se obtiene el menor valor de rugosidad posible (3,976  $\mu\text{m}$ ), tomando en cuenta que el tiempo requerido para la operación aumenta (14,993 min) permitiendo que la dureza en la zona de corte incremente notablemente (17,77 HRC). Mientras que al aumentar la cantidad de corriente (2,5 A) y de igual manera la velocidad de avance (120 mm/min) se logra obtener una rugosidad moderada (5,262  $\mu\text{m}$ ), durante un menor

tiempo de mecanizado (9,005 min); lo cual hace que la dureza (16,575 HRC) en la zona de corte tienda a ser un valor promedio.

Claramente se identifica que, al hacer uso de un medio ecológico como fluido de corte, se logra obtener valores de rugosidad moderados y próximos a los obtenidos mediante el uso de medios convencionales como lo es la taladrina. Además, indicar que el grado de calidad representa a un N9 el cual está establecido bajo la norma ISO 19997.

### **6.7.8 Normas de seguridad**

Con la finalidad de salvaguardar la integridad física del operador u otras personas que hagan uso de la máquina electroerosionadora, se recomienda cumplir con ciertas recomendaciones, con el objetivo de reducir al mínimo ciertos riesgos asociados al funcionamiento y operación del equipo. Como base primordial, se deberá dar prioridad a la prevención de los posibles riesgos o peligros relacionados con las especificaciones del diseño de la pieza a ser mecanizada.

### **6.7.9 Equipos de protección personal**

Exclusivamente para la persona que esté operando la máquina con una proximidad a ella, debe llevar equipo de protección personal, el cual está compuesto por: casco, zapatos de protección, guantes, gafas, mascarilla exclusiva para emisión de gases y su debida protección auditiva ya que el nivel de ruido efectuado en el proceso, puede dar lugar a trastornos auditivos de carácter permanente. Además, recalcar que las instalaciones eléctricas deben ser las adecuadas para evitar complicaciones al momento de la operación. La figura 44 representa a los elementos que forman parte del equipo de protección personal.



Figura 44. Equipos de protección personal.

Fuente: Autor

### 6.7.10 Medidas de prevención en general

- Respetar todo reglamento de seguridad expuesto por el proveedor del equipo.
- Emplear fuentes de alimentación seguras (baja tensión).
- Aplicar fluidos dieléctricos que no atenten la integridad de la persona y de la máquina.
- Mantener una secuencia de mando correcta durante el ajuste y la operación del equipo.
- Mantener limpia la zona de trabajo.
- Ubicar las herramientas en lugares específicos para evitar posibles atascamientos o daños irreversibles en la máquina.
- Procurar que el volumen del fluido dieléctrico sea el adecuado, para evitar un posible derramamiento.
- Hacer uso del equipo de protección personal para garantizar la seguridad durante el proceso de mecanizado.
- Mantener calibradas las herramientas empleadas en el mecanizado por electroerosión.
- Tener muy en cuenta la capacidad máxima de desplazamiento en la zona de trabajo.

### 6.7.11 Mantenimiento del equipo.

Con el fin de prolongar la vida útil de la máquina, se recomienda la aplicación de mantenimientos preventivos, lo cual beneficia a la calidad del proceso. El mantenimiento de cada sistema está acorde a las especificaciones dadas por el fabricante del equipo; las cuales se exponen en la siguiente tabla 46.

Tabla 46. Mantenimiento de los sistemas que comprende la máquina electroerosionadora.

<b>ELECTROEROSIONADORA DE HILO DK 7735</b>	
<b>SISTEMA</b>	<b>MANTENIMIENTO PREVENTIVO</b>
<b>Control CNC</b>	- Realizar la limpieza semanal de material producido por efecto del corte al igual que residuos de materia prima.

<p><b>(Cabezal horizontal y vertical)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controlar trimestralmente los controladores de movimiento de los cabezales.</li> <li>- Revisar anualmente las sujeciones de los subsistemas de desplazamiento horizontal como vertical.</li> </ul>
<p><b>Sistema de desplazamiento del hilo de corte</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controlar semanalmente la tensión del hilo de corte.</li> <li>- Inspeccionar trimestralmente el desgaste en las guías del hilo conductor.</li> <li>- Verificar semestralmente el funcionamiento del motor que establece el movimiento o desplazamiento del hilo (herramienta de corte).</li> </ul>
<p><b>Sistema de distribución del fluido dieléctrico</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpiar semanalmente los sumideros del dieléctrico.</li> <li>- Revisar bimensualmente los conductos de suministro de fluido, con el fin de identificar posibles fugas.</li> <li>- Comprobar trimestralmente la cantidad de caudal aplicado sobre la pieza a obtenerse.</li> </ul>
<p><b>Sistema de bombeo y filtrado del dieléctrico</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprobar semanalmente la cantidad de fluido dieléctrico (12 litros como mínimo).</li> <li>- Limpiar mensualmente el tanque de almacenamiento del fluido.</li> <li>- Verificar bimensualmente el correcto funcionamiento de la bomba.</li> <li>- Cambiar el filtro de la bomba, en función al tiempo de uso del dieléctrico. Por lo general se lo realiza trimestralmente.</li> <li>- Inspeccionar semestralmente la presencia de posibles fisuras en el tanque de almacenamiento del medio dieléctrico.</li> </ul>

<b>Sistema CAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar trimestralmente la cantidad de energía eléctrica suministrada por la red.</li> <li>- Comprobar diariamente las dimensiones comprendidas para la base del equipo.</li> <li>- Identificar semanalmente la presencia de la variabilidad de los parámetros situados en el proceso de corte.</li> </ul>
--------------------	---

Fuente: Autor.

## 6.8 Administración

Finalizado el proyecto de investigación en base a los objetivos planteados, se ve la necesidad de documentar el análisis de costos relacionado al desarrollo del mismo, con el fin de que futuras investigaciones relacionadas al área, posean una base de referencia en cuanto a recursos económicos. En las tablas 47 a 51 se detallan aquellos valores asociados a los costos directos e indirectos.

### 6.8.1 Costos directos

Tabla 47. Costos relacionados a adquisición de materiales.

<b>Costos-Recursos Materiales</b>					
N°	Cantidad	Unidad	Detalle	Precio Unit.	Valore en USD
1	1	m	Barra de acero K 100 diámetro de 25, 4 mm	50,00	50,00
2	5	L	Dieléctrico convencional (Taladrina)	4,00	20,00
3	10	L	Dieléctrico Ecológico (TL-ECO250-MG)	70,00	700,00
				Subtotal	770,00
				IVA 12%	92,40
				<b>Total (1)</b>	<b>862,40</b>

Fuente: Autor.

### 6.8.2 Costos indirectos

Tabla 48. Costos relacionados al alquiler del equipo de corte y ensayos.

<b>Costos -Alquiler de Equipo de corte-Ensayos</b>					
N°	Cantidad	Unidad	Detalle	Precio Unit.	Valore en USD
1	8	h	Uso de la máquina de corte por electroerosión por hilo	7,50	60,00
2	2	h	Ensayo de Rugosidad	40,00	80,00
3	2	h	Ensayo de Dureza	150,00	300,00
4	2	h	Ensayo de espectrofotometría	25,00	50,00
5	2	h	Ensayo de microscopía	35,00	70,00
				Subtotal	560,00
				IVA 12%	67,20
				<b>Total (2)</b>	<b>627,20</b>

Fuente: Autor.

Tabla 49. Costos asociados a recursos humanos.

<b>Costos-Recursos Humanos</b>				
N°	Cantidad	Detalle	Precio Unit.	Valore en USD
1	1	Ayudante-obtención de probetas	80,00	80,00
2	1	Ayudante-preparación de muestras para microscopía	50,00	50,00
			<b>Total (3)</b>	<b>130,00</b>

Fuente: Autor.

Tabla 50. Costos relacionados a recursos adicionales.

<b>Costos - Recursos Adicionales</b>					
Nº	Cantidad	Unidad	Detalle	Precio Unit.	Valore en USD
1	550	-	Impresiones	0,12	66,00
2	3	-	Anillados	5,00	15,00
3	60	h	Uso de internet	0,55	33,00
4	1	-	Movilización	60,00	60,00
				Subtotal	174,00
				IVA 12%	20,88
				<b>Total (4)</b>	<b>194,88</b>

Fuente: Autor.

### 6.8.3 Costos totales

El costo total de la investigación está formado por la suma de los costos anteriormente detallados como directos e indirectos, lo cual se visualiza en la tabla 51.

Tabla 51. Costo total de la Investigación.

<b>Costo Total - Investigación</b>		
Nº	Detalle	Valore en USD
1	Recursos Materiales	862,40
2	Costos -Alquiler de Equipo de corte-Ensayos	627,20
3	Costos-Recursos Humanos	130,00
4	Costos - Recursos Adicionales	194,88
	Subtotal	1814,48
	Imprevistos (10%)	181,45
	<b>Total</b>	<b>1995,93</b>

Fuente: Autor.

### 6.9 Previsión de la evaluación

La presente investigación tiene un aporte muy significativo en cuanto a nuevas estrategias ecológicas de mecanizado, ya que cuenta con una estructura de estudio a

detalle para la obtención de piezas mecánicas a través del proceso de corte por electroerosión por hilo. Además, se demostró que se obtiene resultados favorables en cuanto a la rugosidad y dureza superficial, al controlar la intensidad de corriente suministrada, la velocidad de avance y rapidez del hilo de corte.

Se ve la necesidad de desarrollar nuevas investigaciones que complementen o fortalezcan el estudio de aquellos parámetros de los cuales depende la correcta manipulación del equipo de corte por electroerosión, con la finalidad de obtener mejores características superficiales en la sección donde se presenta el efecto, lo cual permite generar un desarrollo industrial bajo el principio de la ecología, ampliando las ventajas que lo definen frente a metodologías tradicionales.

## **6.10 Conclusiones y recomendaciones**

### **6.10.1 Conclusiones**

- Se puede concluir que, al establecer un procedimiento adecuado de uso del equipo de electroerosión por hilo, se logra obtener mejores resultados en cuanto a la calidad final del producto obtenido, de igual manera se prolonga la vida útil del equipo; sin dejar de lado la seguridad antes y durante la operación.
- De acuerdo a las características que posee el equipo, es necesario considerar ciertos valores límites en cuanto se refiere a los parámetros de mecanizado, ya que de ellos depende las propiedades finales que adquiere la pieza mecanizada, tal es el caso del acabado final.
- La proyección de carácter lineal de los factores que actúan directamente en el proceso permiten comprender de mejor manera cuán importante es su relación y así programar un mejor sistema de operación.
- El identificar y comparar aquellos valores propiamente de las variables que intervienen en el proceso, hace posible preestablecer, o a su vez, conocer el tiempo necesario que se requerirá para la obtención de la pieza solicitada; recordando que de ellos también se dependerá la integridad superficial en la zona donde se efectuó el corte.
- La aplicación de un medio dieléctrico ecológico hace que el proceso sea viable en relación al manejo de desechos líquidos, ya que los mismos presentan valores



aceptables en cuanto se refiere a la Demanda Química Residual (DBQ), lo cual no sucede al emplear a la taladrina como medio dieléctrico.

- Es indispensable conocer la importancia de hacer un mantenimiento preventivo, ya que con ello se puede garantizar el buen uso y maniobrabilidad de la máquina, valorando al tiempo como su principal particularidad.

### **6.10.2 Recomendaciones**

- Identificar correctamente aquellos sistemas conformados por elementos y parámetros de los cuales depende la máquina, ya que la calidad final que adquiere la pieza mecanizada, es directamente proporcional a ellos.
- Es necesario e indispensable respetar lo establecido como norma de seguridad, ya permitirá garantizar la vida útil del equipo al igual que la integridad de quien lo esté manipulando.
- El uso correcto de los equipos de protección personal, hace que la persona que manipule la máquina, lo haga de forma correcta, es por ello que se recomienda ubicar señaléticas de los mismos al contorno del equipo de electroerosión por hilo.
- Se recomienda tomar muy en cuenta la ubicación de un adecuado sistema de alimentación de potencia, ya que permitirá que la máquina no sufra desperfectos debido a la fluctuación en relación a la cantidad de voltaje suministrado.

## 7. Referencias Bibliográficas

- [1] T. Newman, S. Rahimifard y R. Allen, States of the art in wire electrical discharge machining, 2014, pp. 1-13.
- [2] V. Moreno, Análisis multivariable en el proceso de corte electro abrasivo por hilo para su aplicación en el sistema CAPP, Cuba, 2014, pp. 1-7.
- [3] B. Nayak y S. Mahapatra, Optimization of WEDM process parameters using deep cryo-treated Inconel 718 as work material, India, 2016, pp. 1-10.
- [4] K. Mohapatra, V. Shaibua, S. Sahoob, Modeling and Analysis of Wire EDM in a Gear Cutting Process for a 2D Model, 2018, pp. 1-15.
- [5] M. Subrahmanyam, T. Nancharaiah, “Optimization of process parameters in wire-cut EDM of Inconel 625 using Taguchi’s approach, Materials” , 2019, pp. 1-6
- [6] Santosh Kumar Sahu, Thrinadh Jadam, Saurav Datta, “Performance of dielectric media (conventional EDM oil and distilled water) during machining of Inconel 825 super alloy”,2019, pp. 1-8.
- [7] G. Pellegrini, Ch. Ravasio, A sustainability index for the micro-EDM drilling process,2019, pp. 8-28.
- [8] L. Yadav, S. Lal, N. Kumar Singh, D. Chouhan, Y. Singh, Impact of powder additives in liquid and gaseous dielectric fluids on electrical discharge machining through aerospace region applications, 2019, pp. 1-8.
- [9] B. Lodhia, S. Agarwalb, “Optimization of machining parameters in WEDM of AISI D3 Steel using Taguchi Technique, 2014, pp. 1-10.
- [10] M. Groover, Fundamentos de manufactura moderna. Tercera Ed. México Ed., McGraw Hill., 2007, pp. 18-22
- [11] Ravindranadh Bobbili, V. Madhu, A.K. Gogia, “Modelling and analysis of material removal rate and surface roughness in wire-cut EDM of armour materials”, 2015, pp. 664-668.
- [12] P. Molera, Electromecanizado, electroerosión y mecanizado electroquímico. Primera Ed. Barcelona-España, Ed., Marcombo S.A., 1989, pp.21-39

- [13] M.P. Jahan, Y.S. Wong, M. Rahman, “A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator”, 2009, pp. 1706-1716
- [14] A. Charmilles, “Diseño mecánico compacto y rígido”, GF Machining Solutions, pp. 10-14.
- [15] C. Santamaria, “Análisis de parámetros de mecanizado en el proceso de electroerosión por penetración en microfundición de aluminio con electrodos de cobre y grafito y su relación con la rugosidad superficial resultante”, UTA, 2016, pp. 6-21.
- [16] Ming Zhou, Xin Mu, Liang He, Qing Ye, “Improving EDM performance by adapting gap servo-voltage to machining state”, 2019, pp. 101-113.
- [17] Manufacturing Guide, “Cutting method in which an electrically charged wire is fed through a workpiece creating an electric discharge that cuts a contour in its horizontal plane”, 2017.
- [18] C. Mascaraque, “Estudio teórico y experimental de las propiedades dimensionales de la pieza final y vida de la herramienta en procesos de mecanizado por electroerosión. análisis de su aplicación en la construcción naval”, Argentina, 2018, pp. 27-61.
- [19] H. Singh, R. Garg, Effects of process parameters on material removal rate in WEDM, JAMME, Vol. 32, 2009, pp. 1-5.
- [20] S. Kalpakjian, S. Schmid, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 2012, Cuarta Ed., México, Prentice Hall, pp. 758-769.
- [21] TECNUM “Introducción a la Electroerosión”, Universidad de Navarra, pp. 42.
- [22] Chakraborty, S., Dey, V., & Ghosh, S. K. A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. Precision Engineering, 40, 2015, pp.1-6.
- [23] Leão F., Pashby I., A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining. Materials Processing Technology, 2014, pp.1-6.
- [24] ISO 1302, UNE-EN ISO. “Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos”, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid-España, 2002.
- [25] ISO 1997, Roughness measurements of stainless steel surfaces, PP. 1-7.

[26] ASTM E18-15, Standard test methods for Rockwell hardness of Metallic Materials, pp.1-12.

[27] H. Gutiérrez. “Análisis de Diseño de Experimentos”, 2nd. Edición, McGraw Hill., 2008, pp. 166-220.

# **ANEXOS**

## Anexo 1: Ficha técnica del material base (acero k100)

### BÖHLER K 100

Tipo de aleación: C 2.00 Si 0.25 Mn 0.35 Cr 11.50 %

Color de identificación: Blanco - Amarillo  
 Estado de suministro: Recocido 248 HB (máx.)  
 Acabado: IBO ECOMAX

Equivalencia  
 AISI: ~D3  
 DIN: X210Cr12  
 No. Mat. 1.2080

#### PROPIEDADES:

Marca estándar de los aceros ledeburíticos de alto porcentaje de carbono y cromo, de alta estabilidad dimensional en el tratamiento térmico y gran resistencia al desgaste.

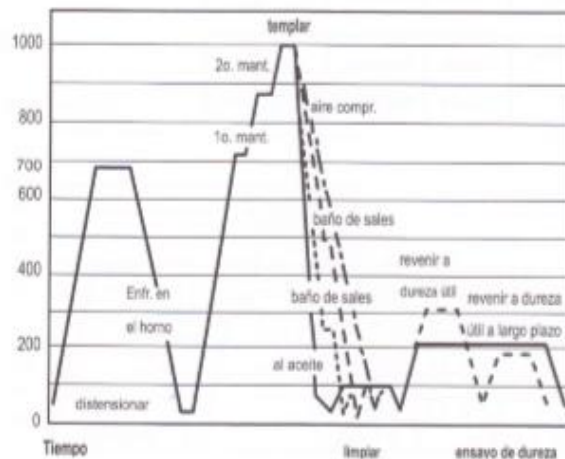
#### EMPLEO:

Para la fabricación de herramientas para trabajo en frío como punzones y matrices para corte de lámina de hasta 4 mm de espesor, herramientas para trabajo en madera, rodillos de conformado en frío. Herramientas para el prensado de materiales cerámicos y farmacéuticos.

#### TRATAMIENTO TÉRMICO:

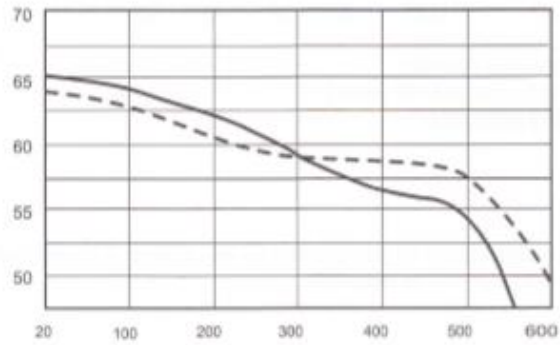
Forjado:	1050 - 850 °C
Recocido:	800 - 850 °C
enfriamiento lento en el horno	
Distensionado:	aprox. 650 °C
Temple:	940 - 970 °C
enfriamiento en: aceite, baño de sales (220 - 250 °C / 500 - 550 °C), aire y aire comprimido (espesores menores a 25 mm).	
Dureza obtenible:	63 - 65 HRC
Revenido:	ver en el diagrama de revenido las durezas obtenibles después del temple.

#### Esquema de tratamiento térmico



### DIAGRAMA DE REVENIDO

- Temperatura de temple: 950 °C.
- - - Temperatura de temple: 1000 °C.
- Mantenimiento a temperatura: 1 hora por 20 mm espesor
- Sección de la probeta: cuadr. de 20 mm



### SOLDADURA DE REPARACIÓN


El proceso de soldadura en aceros de alto porcentaje de carbono no es recomendable, por el posible origen de fisuras de ser necesario puede utilizar los siguientes electrodos:

Electrodos recomendados: UTP 63  
 Pre calentamiento: 300 ° - 350 °C

No es recomendable interrumpir la aplicación de soldadura una vez precalentada la pieza. El enfriamiento debe ser lento y uniforme

### PRESENTACIÓN:\*

	Desde:	Ancho	20	mm	Alto	20	mm
	Hasta:	Ancho	120	mm	Alto	12	mm

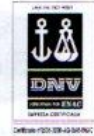
	Desde:	Diámetro	6	mm
	Hasta:	Diámetro	50	mm

	Desde:	Espesor	13,5	mm
	Hasta:	Espesor	353,00	mm

## Anexo 2: Ficha técnica del dieléctrico ecológico



ESPECIALIDADES QUIMICAS INDUSTRIALES



# TL – ECO 250-MG

## REFRIGERANTE DE CORTE ECOLÓGICO

### FICHA TÉCNICA

#### CARACTERÍSTICAS

Producto autoemulsionable constituido por una mezcla de aditivos anticorrosivos, lubricantes, emulgentes, humectantes y conservantes, diseñados especialmente para refrigerar y lubricar los procesos de mecanizado y rectificado de todo tipo de metales.

#### APLICACIONES

Las emulsiones de TL-ECO 250 MG son especialmente indicadas para refrigerar y lubricar las operaciones básicas de mecanizado general así como también de rectificado sin centros. Este producto es apto para todo tipo de aleaciones, siendo especialmente indicado para todo tipo de aceros y aluminios. Debido a sus propiedades lubricantes y humectantes permite obtener superficies con baja rugosidad y evitar de este modo fenómenos de "quemaduras" en las piezas. Su capacidad lubricante garantiza un mínimo desgaste de la herramienta y un excelente acabado superficial en los procesos de arranque de metal.

#### MODO DE EMPLEO

Se emplea vertiendo el producto sobre el agua y agitando ligeramente a efectos de obtener una perfecta emulsión. La concentración recomendada de uso es de un 5 a un 6 % tanto para las operaciones de rectificado como las de mecanizado general (fresado, roscado, taladrado, ...). La dureza del agua a emplear influye en la estabilidad de las disoluciones, ya que si se sobrepasan los 60°HF de dureza total, ésta puede verse afectada disminuyendo su vida útil además de una merma de sus propiedades detergentes con el consiguiente perjuicio de la buena conservación de los mecanismos de la máquina-herramienta. Por otro lado, la presencia de acarrear problemas de corrosión. Mantener bajo techo, lejos de la luz solar entre 5 y 40°C.

Control de la concentración:

- Por Lectura Refractométrica: multiplicar la lectura obtenida en un Refractómetro de mano tipo SHIBUYA o ATAGO, previamente calibrado con agua, por el factor del producto: 1'1
- Por valoración de la alcalinidad: pipetear 10 ml de la muestra y valorar con HCl 0,1 N hasta alcanzar un pH de 3,5. La concentración se obtiene mediante el cálculo siguiente:  
$$\text{Conc. (\%)} = \text{ml HCl} \times 0,80$$

REVISIÓN: 22/06/2011

EDICIÓN: 0

Página 1 de 2

Polígono Industrial Raval dels Torrents, Nave A - 08297 Castellgalí (Barcelona) - Tel: 93 833 28 88 - Fax: 93 833 28 89  
Web: www.senigrup.com - e-mail: senigrup@senigrup.com





ESPECIALIDADES QUIMICAS INDUSTRIALES



**Valores Típicos:**

Características	Valor	Norma
Aspecto	Líquido límpido	
Color	Rojo	
Factor Refractómetro	1'1	
pH al 5 %	9,0 – 9,4	DIN 51369
Ensayo de corrosión al 5 % (200 ppm Cl)	0	IP 287
Estabilidad de la emulsión al 5 % 30ºHF	Correcta	ASTM D-1479
Ensayo de espuma al 5%, 20ºHF	300/750/0/0/200	CNOMO D65-5212

**PRESENTACIÓN**

\* Disponible a granel en envases de 25, 50 y 200 lts.

Las emulsiones de TL-ECO 250 MG son especialmente indicadas para refrigerar y lubricar las operaciones básicas de mecanizado general así como también de acabado en centros. Este producto es apto para todo tipo de operaciones, siendo especialmente indicada para todo tipo de aceros y aluminios. Debido a sus propiedades lubricantes y refrigerantes permite obtener superficies con altas rugosidades y evita de este modo fenómenos de "trabaduras" en las piezas. Su capacidad lubricante garantiza un mínimo desgaste de la herramienta y un excelente acabado superficial en los procesos de mecanizado de metales.

**MODO DE EMPLEO**

Se emplea vertiendo el producto sobre el material a mecanizar y ligando ligeramente a efectos de obtener una buena emulsión. La concentración recomendada de uso es de un 5 a un 10 % tanto para las operaciones de mecanizado como las de mecanizado general (mecado, acabado, taladrado, etc.). La dilución de agua y material a mecanizar en la estabilidad de las emulsiones, ya que a un 50% de agua el agua más alta puede verse afectada disminuyendo su vida útil. Además de una mezcla de sus propiedades. Dependiente con la concentración por lo que se recomienda de los mecanismos de la máquina herramienta. Por otro lado, la presencia de aceites protectores de la herramienta, también afecta de la vida útil entre 5 y 40%.

**Control de la concentración**

- Por Lectura Refractométrica: midiendo la lectura obtenida en el Refractómetro de mano tipo SHIBUYA o ATAGO previamente calibrado con agua, por el factor del producto: 1'1
- Por valoración de la densidad: pipetear 10 ml de la muestra y valorar con HCl 0.1 N hasta alcanzar un pH de 3,5. La concentración en número mediante el cálculo:  $Conc. (g/l) = m \cdot HCl \cdot 0,85$

Anexo 3: Informe técnico del ensayo del análisis químico del material base  
(espectrofotometría)



CERTIFICATE OF INSPECTION

LABORATORIO DE METALOGRAFÍA REPORTE DE ESPECTOFOTOMETRÍA																																																		
DATOS INFORMATIVOS																																																		
Usuario: Ing. Diego Patricio Molina Molina RUC/CI: 0503064065 Dirección: Latacunga Teléfono: 0995297941																																																		
Tipo de estudio: Experimental Lugar de Ejecución: Laboratorio de Metalografía Fecha de Ejecución: 2019-07-08 Fecha de Finalización: 2019-07-08 Tipo de ensayo: Cuantitativo																																																		
<b>Realizado por:</b>		Ing. Esteban Ramírez		<b>Revisado por:</b>		Ing. Isaac Simbaña																																												
Parámetros del Ensayo																																																		
<b>Material:</b>				Acero Ledeburítico al 12 % de cromo AISI: D3																																														
<b>Especificación Comercial:</b>				K100																																														
<b>Proceso:</b>				Torneado/refrentado																																														
Parámetros de medición del espectrofotómetro																																																		
<b>Norma de mantenimiento:</b>		DIN 31051		<b>Norma de calibración:</b>		DIN EN 10012																																												
<b>Marca:</b>		Oxford Instruments		<b>Longitud focal:</b>		350 mm																																												
<b>Modelo:</b>		Foundry-Master Xpert		<b>Rejilla holográfica:</b>		3000 surcos/mm																																												
<b>Rango de longitud de onda:</b>		130 - 780 nm		<b>Sistema óptico:</b>		Multi CCD																																												
<b>Sistema de vacío:</b>		Bomba de vacío		<b>Dispersión recíproca:</b>		0.9 nm/mm																																												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>Fe</th> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Cr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">Quemas</td> <td>1</td> <td>84,9</td> <td>2,14</td> <td>0,249</td> <td>0,376</td> <td>0,0210</td> <td>0,0092</td> <td>11,6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>84,7</td> <td>2,17</td> <td>0,249</td> <td>0,375</td> <td>0,0221</td> <td>0,0091</td> <td>11,7</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>84,9</td> <td>2,1</td> <td>0,251</td> <td>0,374</td> <td>0,0217</td> <td>0,0082</td> <td>11,6</td> </tr> <tr> <td colspan="2"><b>Promedio</b></td> <td><b>84,8</b></td> <td><b>2,14</b></td> <td><b>0,249</b></td> <td><b>0,375</b></td> <td><b>0,0216</b></td> <td><b>0,0089</b></td> <td><b>11,6</b></td> </tr> </tbody> </table>										Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Quemas	1	84,9	2,14	0,249	0,376	0,0210	0,0092	11,6	2	84,7	2,17	0,249	0,375	0,0221	0,0091	11,7	3	84,9	2,1	0,251	0,374	0,0217	0,0082	11,6	<b>Promedio</b>		<b>84,8</b>	<b>2,14</b>	<b>0,249</b>	<b>0,375</b>	<b>0,0216</b>	<b>0,0089</b>	<b>11,6</b>
		Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr																																										
Quemas	1	84,9	2,14	0,249	0,376	0,0210	0,0092	11,6																																										
	2	84,7	2,17	0,249	0,375	0,0221	0,0091	11,7																																										
	3	84,9	2,1	0,251	0,374	0,0217	0,0082	11,6																																										
<b>Promedio</b>		<b>84,8</b>	<b>2,14</b>	<b>0,249</b>	<b>0,375</b>	<b>0,0216</b>	<b>0,0089</b>	<b>11,6</b>																																										



		Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
Quemas	1	0,133	0,211	0,0184	0,0248	0,0878	< 0,0010	0,0034
	2	0,137	0,209	0,0187	0,0251	0,0888	< 0,0010	0,0037
	3	0,133	0,212	0,0186	0,0247	0,0873	< 0,0010	0,0035
<b>Promedio</b>		<b>0,134</b>	<b>0,211</b>	<b>0,0186</b>	<b>0,0248</b>	<b>0,0880</b>	<b>&lt; 0,0010</b>	<b>0,0036</b>

		V	W	Pb	Sn	B	N	Se
Quemas	1	0,107	0,0780	0,0022	0,0013	0,0004	0,0811	0,0079
	2	0,110	0,0745	0,0030	0,0011	0,0002	0,0910	0,0075
	3	0,108	0,0778	< 0,0020	0,0013	< 0,0002	0,0817	0,0081
<b>Promedio</b>		<b>0,108</b>	<b>0,0768</b>	<b>0,0021</b>	<b>0,0012</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,0846</b>	<b>0,0078</b>

		Sb
Quemas	1	< 0,0020
	2	< 0,0020
	3	< 0,0020
<b>Promedio</b>		<b>&lt; 0,0020</b>

**Observaciones:** La fabricación de las probetas y su configuración están de acuerdo según especificaciones declaradas por el cliente.

Elaborado por: Ing. Esteban Ramírez  
 Analista Técnico Laboratorio de Metrología




Aprobado por: Ing. Isaac Simbaña  
 Director Laboratorio de Metalografía



FMX 52U0016      Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE\_300      Mode : PA 09/07/2019 18:27:56

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	84.9	2.14	0.249	0.376	0.0210	0.0092	11.6
2	84.7	2.17	0.249	0.375	0.0221	0.0091	11.7
3	84.9	2.10	0.251	0.374	0.0217	0.0082	11.6
<b>Average</b>	<b>84.8</b>	<b>2.14</b>	<b>0.249</b>	<b>0.375</b>	<b>0.0216</b>	<b>0.0089</b>	<b>11.6</b>

	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
1	0.133	0.211	0.0184	0.0248	0.0878	< 0.0010	0.0034
2	0.137	0.209	0.0187	0.0251	0.0888	< 0.0010	0.0037
3	0.133	0.212	0.0186	0.0247	0.0873	< 0.0010	0.0035
<b>Average</b>	<b>0.134</b>	<b>0.211</b>	<b>0.0186</b>	<b>0.0248</b>	<b>0.0880</b>	<b>&lt; 0.0010</b>	<b>0.0036</b>

	V	W	Pb	Sn	B	N	Se
1	0.107	0.0780	0.0022	0.0013	0.0004	0.0811	0.0079
2	0.110	0.0745	0.0030	0.0011	0.0002	0.0910	0.0075
3	0.108	0.0778	< 0.0020	0.0013	< 0.0002	0.0817	0.0081
<b>Average</b>	<b>0.108</b>	<b>0.0768</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.0012</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0846</b>	<b>0.0078</b>

	Sb
1	< 0.0020
2	< 0.0020
3	< 0.0020
<b>Average</b>	<b>&lt; 0.0020</b>



Anexo 4: Norma de rugosidad (ISO 4287-1997)

**INTERNATIONAL  
STANDARD**

**ISO  
4287**

First edition  
1997-04-01  
**AMENDMENT 1**  
2009-06-15

---

**Geometrical Product Specifications  
(GPS) — Surface texture: Profile  
method — Terms, definitions and  
surface texture parameters**

**AMENDMENT 1: Peak count number**

*Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface:  
Méthode du profil — Termes, définitions et paramètres d'état de surface  
AMENDEMENT 1: Nombre de pics*



Reference number  
ISO 4287:1997/Amd.1:2009(E)

© ISO 2009



Anexo 5: Informe técnico del ensayo de rugosidad.



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UTA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA  
INGENIERÍA MECÁNICA

MEDICIÓN DE RUGOSIDAD

NOVIEMBRE DE 2019  
AMBATO – ECUADOR

## INFORME TÉCNICO

Lb1-0008-2019

### Objetivo

Establecer y mantener un método para evaluar la rugosidad superficial de un objeto o pieza producto.

### Alcance

Aplicable a medición de rugosidad en superficies planas de valores Rz entre 0,03  $\mu\text{m}$  y 20  $\mu\text{m}$ .

Proceso de medida bajo normas: ISO 4287-1997, ISO 3274 e ISO 5436-1

### ANTECEDENTES:

Con fecha 8 de enero de 2019, la Sr Diego Molina, domiciliado en la ciudad de Salcedo – Cotopaxi, solicita al Centro de Transferencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para medir la calidad superficial de dos materiales compuestos.

Se reciben 32 muestras o probetas, bajo el nombre de: (Acero ledeburítico al 12% Cr / AISI: D3 Especificación comercial: K100) con dos procesos Convencional (Aceite soluble en agua – Taladrina) y por Corte por electroerosión por hilo (WEDM)

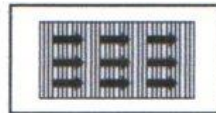
### PROCESO GENERAL:

Alineación del objeto o pieza producto. Se procede antes de cada medición alinear el objeto o pieza producto con el eje de desplazamiento del palpador.

Selección de los Parámetros a medir. Se selecciona los parámetros a medir en función de la información o documentación suministrada por el usuario o de las necesidades manifestadas por el mismo.

Antes de efectuar las respectivas mediciones de la rugosidad en las probetas se calibra el equipo de medición con la galga de calibración que debe estar cerca de 2,94  $\mu\text{m}$  (Ra).

Las mediciones se realizan perpendicularmente a las líneas de mecanizado, como se indica en la figura adjunta.



Se efectuaron las mediciones de rugosidades superficiales de las probetas con las réplicas solicitadas por el usuario y los respectivos datos fueron registrados y tabulados.

#### CONDICIONES DE ENSAYO

- Temperatura: 20 °C
- Ángulo de la pendiente del cono: 60°
- Fuerza de medición estática: 0,75 mN
- Radio de la punta: 2um

Se selecciona el palpador en función de la medición a realizar y siguiendo los lineamientos del manual de fabricante del Rugosímetro.

Un criterio práctico aproximado de selección de palpadores podría ser el siguiente:


Ra	Palpadores de radio ap
$R_a \leq 0,4 \mu m$	2 $\mu m$ o 2,4 $\mu m$
$0,4 \mu m \leq R_a \leq 6 \mu m$	5 $\mu m$
$R_a \geq 6 \mu m$	10 $\mu m$

#### Calibración del Equipo

Con la medición se puede verificar un error de 0.001 um con lo cual se asegura la fiabilidad de los resultados.





UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO - COHORTE 2017						
<b>REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL</b>						
<b>Datos informativos</b>						
Tipo de estudio	Experimental	Ensayo N°	1-16			
Solicitado por	Ing. Diego Molina	Fecha	8/11/2019			
Centro de estudio y análisis	Laboratorio de Ingeniería Mecánica - UTA					
Realizado por	Ing. Sebastian Villegas	Supervisado por	Ing. Cristian Pérez			
Código del espécimen	DC-TL	Código laboratorio	17216850-ETM 01-1			
<b>Parámetros - proceso de mecanizado</b>						
Material Base	Acero ledeburítico al 12% Cr / AISI: D3 Especificación comercial: K100					
Proceso	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)					
Tipo de Dieléctrico	Convencional (Aceite soluble en agua – Taladrina)					
Geometría del espécimen	Plana	Intensidad de corriente (A)	1,5 - 2,5			
Diámetro (mm)	25	V - F (avance mm/min)	80 - 120			
Espesor (mm)	5	Rapidez_hilo (m/min)	50 - 110			
<b>Parámetros - medición de rugosidad MITUTOYO SJ210</b>						
Øc	0,8 µm	Norma	ISO 1997			
Øs	2,5 µm	Mediciones	x5			
<b>Muestra fotográfica de un Especimen</b>						
						
<b>Registro de mediciones - Ra (µm)</b>						
Probeta	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio (µm)
DC-TL-01	6.951	7.854	7.589	6.243	6.158	6.959

DC-TL-02	7.322	6.388	8.367	6.301	7.183	7.112
DC-TL-03	5.515	6.574	7.061	6.486	6.134	6.354
DC-TL-04	7.652	5.329	4.871	4.576	4.066	5.299
DC-TL-05	6.859	6.794	8.609	8.959	10.673	8.379
DC-TL-06	7.945	6.823	7.495	7.495	9.692	7.890
DC-TL-07	6.691	7.603	5.711	7.216	6.416	6.727
DC-TL-08	5.706	6.945	5.090	5.648	7.753	6.228
DC-TL-09	2.572	3.412	3.902	3.707	3.516	3.422
DC-TL-10	3.190	2.657	2.429	2.434	3.372	2.816
DC-TL-11	2.657	2.641	2.650	2.550	3.345	2.769
DC-TL-12	3.030	3.583	4.446	3.395	3.725	3.636
DC-TL-13	3.408	2.479	3.186	3.336	3.161	3.114
DC-TL-14	3.107	2.732	4.685	3.211	3.839	3.515
DC-TL-15	4.170	4.613	4.175	4.813	4.410	4.436
DC-TL-16	5.319	5.100	5.618	4.543	6.405	5.397
<b>Promedio total</b>						<b>5.253</b>
<b>Observaciones</b>						
El tipo de trabajo muestra un acabado fino, correspondiente a un grado de rugosidad N9.						

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO - COHORTE 2017						
<b>REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL</b>						
<b>Datos informativos</b>						
Tipo de estudio		Experimental		Ensayo N°		1-16
Solicitado por		Ing. Diego Molina		Fecha		8/11/2019
Centro de estudio y análisis		Laboratorio de Ingeniería Mecánica - UTA				
Realizado por		Ing. Sebastian Vilegas		Supervisado por		Ing. Cristian Pérez
Código del espécimen		DE-TLECO	Código laboratorio		17216850-ETM 01-1	
<b>Parámetros - proceso de mecanizado</b>						
Material Base		Acero ledeburítico al 12% Cr / AISI: D3 Especificación comercial: K100				
Proceso		Corte por electroerosión por hilo (WEDM)				
Tipo de Dieléctrico		Ecológico (TL-ECO250-MG)				
Geometría del espécimen		Plana		Intensidad de corriente (A)		1,5 - 2,5
Diámetro (mm)		25		V - F (avance mm/min)		80 - 120
Espesor (mm)		5		Rapidez_hilo (m/min)		50 - 110
<b>Parámetros - medición de rugosidad MITUTOYO SJ210</b>						
λc		0,8 μm	Norma		ISO 1997	
λs		2,5 μm	Mediciones		x5	
<b>Muestra fotográfica de un Espécimen</b>						
						
<b>Registro de mediciones - Ra (μm)</b>						
Probeta	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Promedio (μm)

DE-TLECO-01	5.289	4.173	4.998	4.537	5.92	4.749
DE-TLECO-02	4.582	5.084	4.581	3.616	4.895	4.552
DE-TLECO-03	4.876	4.688	4.913	5.314	5.686	5.095
DE-TLECO-04	5.338	5.314	5.295	5.538	5.649	5.427
DE-TLECO-05	5.178	5.469	6.275	6.009	5.172	5.621
DE-TLECO-06	5.796	4.171	4.807	6.122	4.911	5.161
DE-TLECO-07	4.784	5.273	6.333	6.086	5.585	5.612
DE-TLECO-08	4.359	4.585	4.803	4.640	4.877	4.653
DE-TLECO-09	4.277	3.778	3.376	4.421	3.690	3.908
DE-TLECO-10	4.017	3.783	3.996	3.699	3.650	3.829
DE-TLECO-11	4.120	3.690	4.513	3.799	4.261	4.077
DE-TLECO-12	3.301	4.450	4.419	4.028	4.241	4.088
DE-TLECO-13	4.257	4.986	4.695	4.270	3.962	4.434
DE-TLECO-14	3.835	4.772	4.359	4.084	4.412	4.292
DE-TLECO-15	4.610	4.175	4.297	4.057	4.809	4.390
DE-TLECO-16	4.407	4.716	4.855	4.648	4.584	4.642
<b>Promedio total</b>						<b>4.658</b>
<b>Observaciones</b>						
El tipo de trabajo muestra un acabado fino, correspondiente a un grado de rugosidad N9.						



## Anexo 6: Norma de dureza (ASTM E18)



Designation: E18 – 15

An American National Standard

### Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials<sup>1,2</sup>

This standard is issued under the fixed designation E18; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.*

#### 1. Scope\*

1.1 These test methods cover the determination of the Rockwell hardness and the Rockwell superficial hardness of metallic materials by the Rockwell indentation hardness principle. This standard provides the requirements for Rockwell hardness machines and the procedures for performing Rockwell hardness tests.

1.2 This standard includes additional requirements in annexes:

Verification of Rockwell Hardness Testing Machines	Annex A1
Rockwell Hardness Standardizing Machines	Annex A2
Standardization of Rockwell Indenters	Annex A3
Standardization of Rockwell Hardness Test Blocks	Annex A4
Guidelines for Determining the Minimum Thickness of a Test Piece	Annex A5
Hardness Value Corrections When Testing on Convex Cylindrical Surfaces	Annex A6

1.3 This standard includes nonmandatory information in appendixes which relates to the Rockwell hardness test.

List of ASTM Standards Giving Hardness Values Corresponding to Tensile Strength	Appendix X1
Examples of Procedures for Determining Rockwell Hardness Uncertainty	Appendix X2

1.4 *Units*—At the time the Rockwell hardness test was developed, the force levels were specified in units of kilograms-force (kgf) and the indenter ball diameters were specified in units of inches (in.). This standard specifies the units of force and length in the International System of Units (SI); that is, force in Newtons (N) and length in millimeters (mm). However, because of the historical precedent and continued common usage, force values in kgf units and ball diameters in inch units are provided for information and much of the discussion in this standard refers to these units.

1.5 The test principles, testing procedures, and verification procedures are essentially identical for both the Rockwell and

Rockwell superficial hardness tests. The significant differences between the two tests are that the test forces are smaller for the Rockwell superficial test than for the Rockwell test. The same type and size indenters may be used for either test, depending on the scale being employed. Accordingly, throughout this standard, the term Rockwell will imply both Rockwell and Rockwell superficial unless stated otherwise.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

#### 2. Referenced Documents

##### 2.1 ASTM Standards:<sup>3</sup>

- A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- A623 Specification for Tin Mill Products, General Requirements
- A623M Specification for Tin Mill Products, General Requirements [Metric]
- B19 Specification for Cartridge Brass Sheet, Strip, Plate, Bar, and Disks
- B36/B36M Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B96/B96M Specification for Copper-Silicon Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar for General Purposes and Pressure Vessels
- B103/B103M Specification for Phosphor Bronze Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B121/B121M Specification for Leaded Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B122/B122M Specification for Copper-Nickel-Tin Alloy, Copper-Nickel-Zinc Alloy (Nickel Silver), and Copper-Nickel Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B130 Specification for Commercial Bronze Strip for Bullet Jackets
- B134/B134M Specification for Brass Wire

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved Feb. 1, 2015. Published March 2015. Originally approved in 1932. Last previous edition approved in 2014 as E18 – 14a. DOI: 10.1520/E0018-15.

<sup>2</sup> In this test method, the term Rockwell refers to an internationally recognized type of indentation hardness test as defined in Section 3, and not to the hardness testing equipment of a particular manufacturer.

<sup>3</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

**TABLE A1.3 Maximum Allowable Repeatability and Error of Testing Machines for Ranges of Standardized Test Blocks**

	Range of Standardized Test Blocks <sup>a</sup>	Maximum Repeatability, <i>R</i> (HR units)	Maximum Error, <i>E</i> (HR units)
HRA	< 70	2.0	± 1.0
	≥ 70 and < 80	1.5	± 1.0
HRBW	≥ 80	1.0	± 0.5
	< 60	2.0	± 1.5
	≥ 60 and < 80	1.5	± 1.0
HRC	≥ 80	1.5	± 1.0
	< 35	2.0	± 1.0
HRD	≥ 35 and < 60	1.5	± 1.0
	≥ 60	1.0	± 0.5
	< 51	2.0	± 1.0
HREW	≥ 51 and < 71	1.5	± 1.0
	≥ 71	1.0	± 0.5
	< 84	1.5	± 1.0
HRFW	≥ 84 and < 93	1.5	± 1.0
	≥ 93	1.0	± 1.0
	< 80	1.5	± 1.0
HRGW	≥ 80 and < 94	1.5	± 1.0
	≥ 94	1.0	± 1.0
	< 55	2.0	± 1.0
HRHW	≥ 55 and < 80	2.0	± 1.0
	≥ 80	2.0	± 1.0
	< 96	2.0	± 1.0
HRKW	≥ 96	2.0	± 1.0
	< 65	1.5	± 1.0
	≥ 65 and < 85	1.0	± 1.0
HRLW <sup>b</sup>	≥ 85	1.0	± 1.0
		2.0	± 1.0
HRMW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HRPW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HRRW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HRSW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HRVW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR15N	< 78	2.0	± 1.0
	≥ 78 and < 90	1.5	± 1.0
	≥ 90	1.0	± 0.7
HR30N	< 55	2.0	± 1.0
	≥ 55 and < 77	1.5	± 1.0
	≥ 77	1.0	± 0.7
HR45N	< 37	2.0	± 1.0
	≥ 37 and < 66	1.5	± 1.0
	≥ 66	1.0	± 0.7
HR15TW	< 81	2.0	± 1.5
	≥ 81 and < 87	1.5	± 1.0
	≥ 87	1.5	± 1.0
HR30TW	< 57	2.0	± 1.5
	≥ 57 and < 70	1.5	± 1.0
	≥ 70	1.5	± 1.0
HR45TW	< 33	2.0	± 1.5
	≥ 33 and < 53	1.5	± 1.0
	≥ 53	1.5	± 1.0
HR15WW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR30WW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR45WW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR15XW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR30XW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR45XW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR15YW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR30YW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0
HR45YW <sup>b</sup>		2.0	± 1.0

<sup>a</sup> The user may find that high, medium and low range test blocks are unavailable commercially for some scales. In these cases one or two standardized blocks where available may be used. It is recommended that all high range test blocks for Rockwell scales using a ball indenter should be less than 100 HR units.

<sup>b</sup> Appropriate ranges of standardized test blocks for the L, M, P, R, S, V, W, X, and Y scales shall be determined by dividing the usable range of the scale into two ranges, if possible.

(1) *Alternative Procedure 1*—The testing machine shall be verified using the standardized blocks from the one or two ranges that are available. Also, the testing machine shall be

verified on another Rockwell scale which uses the same test forces and for which three blocks are available. In this case, the testing machine is considered verified for the entire Rockwell scale.

(2) *Alternative Procedure 2*—This procedure may be used when standardized blocks from two ranges are available. The testing machine shall be verified using the standardized blocks from the two available ranges. In this case, the testing machine is considered verified for only the part of the scale bracketed by the levels of the blocks.

A1.4.9.2 On each standardized test block, make five measurements distributed uniformly over the test surface. Determine the error *E* and the repeatability *R* in the performance of the testing machine using Eq 2 and Eq 3 for each hardness level of each Rockwell scale to be verified.

A1.4.9.3 The error *E* and the repeatability *R* shall be within the tolerances of Table A1.3. The indirect verification shall be approved only when the testing machine measurements of repeatability and error meet the specified tolerances using at least one of the user's indenters.

A1.4.9.4 In the case that the testing machine cannot pass the repeatability and error verifications with the user's indenter, a number of corrective actions may be attempted to bring the testing machine within tolerances. These actions include cleaning and maintenance, replacing the anvil or using another of the user's indenters. The indirect verification procedures shall be repeated after making the allowed corrective actions.

NOTE A1.3—When a testing machine fails indirect verification, it is recommended that the testing machine be verified again using a Class A (or better) indenter for those scales and hardness levels that failed the indirect verification with the user's indenter. If the testing machine passes the repeatability and error tests with a Class A indenter, it is an indication that the user's indenter is out of tolerance. A new indenter may be acquired by the user as a corrective action (see A1.4.9.4) allowing the indirect verification procedures to be repeated without having to perform a direct verification. If the testing machine continues to fail the repeatability or error tests of an indirect verification with the Class A indenter, it is an indication that there is a problem with the machine and not the user's indenter.

A1.4.9.5 If the testing machine continues to fail the repeatability or error tests following corrective actions, the testing machine shall undergo adjustment and/or repair followed by a direct verification.

A1.4.10 *Qualifying Additional User's Indenters*—In cases where the testing machine passes indirect verification using only one of the user's indenters, only that one indenter is considered verified for use with the specific testing machine for the Rockwell scales that were indirectly verified using that indenter. Before any other indenter may be used for testing the same Rockwell scales, it must be verified for use with the specific verified testing machine. This requirement does not apply to changing an indenter ball. The indenter verifications may be made at any time after the indirect verification, and may be performed by the user as follows.

A1.4.10.1 The testing machine and indenter shall be verified together using the indirect verification procedures of A1.4.9 with the following exception. The verification shall be performed on at least two standardized test blocks (high and low ranges) for each Rockwell scale that the indenter will be used.



Anexo 7: Informe técnico del ensayo de dureza.



CERTIFICATE OF INSPECTION

LABORATORIO DE METALOGRAFÍA						
REPORTE DE DUREZA						
DATOS INFORMATIVOS						
Usuario: Ing. Diego Patricio Molina Molina RUC/CI: 0503064065 Dirección: Latacunga Teléfono: 0995297941						
Tipo de estudio: Experimental Lugar de Ejecución: Laboratorio de Metalografía Fecha de Ejecución: 2019-07-22 Fecha de Finalización: 2019-07-25 Tipo de ensayo: Cuantitativo						
<b>Realizado por:</b>		Ing. Esteban Ramírez		<b>Revisado por:</b>		Ing. Isaac Simbaña
Parámetros del Ensayo						
<b>Material:</b>		Acero Ledeburítico al 12 % de cromo AISI: D3				
<b>Especificación Comercial:</b>		K100				
<b>Proceso:</b>		Corte por electroerosión por hilo (WEDM)				
<b>Medio dieléctrico:</b>		Convencional (aceite soluble en agua - taladrina)				
<b>Intensidad de corriente:</b>		1.5 – 2.5 A				
<b>Frecuencia:</b>		80 - 120 Hz				
<b>Velocidad:</b>		50 mm <sup>2</sup> /min				
Parámetros de medición del durómetro						
<b>Norma:</b>		ASTME18		<b>Temperatura:</b>		21 °C
<b>Marca:</b>		Phase II Plus		<b>Serie:</b>		20JA142015
<b>Modelo:</b>		900-365		<b>Humedad:</b>		30%
Probeta	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio
DC-TL-01	12.2	14.6	14.1	18.0	15.1	14.8
DC-TL-02	12.5	12.2	12.2	15.8	16.5	13.8
DC-TL-03	15.5	13.2	12.5	16.2	20.7	15.6
DC-TL-04	16.1	14.2	15.1	13.1	19.0	15.5
DC-TL-05	18.3	11.9	17.8	18.8	15.7	16.5
DC-TL-06	12.7	16.1	15.9	20.5	20.3	17.1
DC-TL-07	14.4	15.5	19.7	16.9	20.7	17.4
DC-TL-08	12.4	18.5	14.6	14.0	19.5	15.8
DC-TL-09	12.6	15.7	18.1	14.8	16.5	15.5
DC-TL-10	16.4	16.3	19.2	18.4	20.3	18.1



Probeta	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio
DC-TL-11	15.7	15.1	18.9	16.5	19.6	17.2
DC-TL-12	16.0	18.3	13.9	14.4	18.1	16.1
DC-TL-13	14.1	15.8	14.4	14.7	16.0	15.0
DC-TL-14	15.6	16.1	12.5	14.1	15.9	14.8
DC-TL-15	16.2	13.6	16.7	17.2	14.8	15.7
DC-TL-16	14.3	19.9	16.3	18.0	19.0	17.5

**Observaciones:** La fabricación de las probetas y su configuración están de acuerdo según especificaciones declaradas por el cliente.

Elaborado por: Ing. Esteban Ramirez  
Analista Técnico Laboratorio de Metrología

Aprobado por: Ing. Isaac Simbaña  
Director Laboratorio de Metalografía





<b>LABORATORIO DE METALOGRAFÍA</b>						
<b>REPORTE DE DUREZA</b>						
<b>DATOS INFORMATIVOS</b>						
Usuario: Ing. Diego Patricio Molina Molina						
RUC/CI: 0503064065		Dirección: Latacunga				
Teléfono: 0995297941						
Tipo de estudio: Experimental						
Lugar de Ejecución: Laboratorio de Metalografía						
Fecha de Ejecución: 2019-07-22						
Fecha de Finalización: 2019-07-25						
Tipo de ensayo: Cuantitativo						
<b>Realizado por:</b>	Ing. Esteban Ramírez	<b>Revisado por:</b>	Ing. Isaac Simbaña			
<b>Parámetros del Ensayo</b>						
<b>Material:</b>	Acero Ledeburítico al 12 % de cromo AISI: D3					
<b>Especificación Comercial:</b>	K100					
<b>Proceso:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)					
<b>Medio dieléctrico:</b>	Ecológico (TL-ECO250-MG)					
<b>Intensidad de corriente:</b>	1.5 - 2.5 A					
<b>Frecuencia:</b>	80 - 120 Hz					
<b>Velocidad:</b>	50 mm <sup>2</sup> /min					
<b>Parámetros de medición del durómetro</b>						
<b>Norma:</b>	ASTME18	<b>Temperatura:</b>	21 °C			
<b>Marca:</b>	Phase II Plus	<b>Serie:</b>	20JA142015			
<b>Modelo:</b>	900-365					
Probeta	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio
DE-TLECO-01	13.6	16.8	16.9	18.8	16.6	16.5
DE-TLECO-02	14.0	14.4	18.1	16.5	19.6	16.5
DE-TLECO-03	15.3	16.7	18.4	18.7	21.6	18.1
DE-TLECO-04	18.3	16.9	17.8	15.7	18.5	17.4
DE-TLECO-05	15.4	16.8	13.9	20.3	16.5	16.6
DE-TLECO-06	16.6	14.8	17.9	16.2	15.5	16.2
DE-TLECO-07	17.3	14.2	17.6	14.7	18.4	16.4
DE-TLECO-08	16.2	15.7	18.2	17.0	18.3	17.1
DE-TLECO-09	15.2	17.7	18.7	16.0	15.3	16.6
DE-TLECO-10	18.6	16.9	19.2	17.2	18.8	18.1
DE-TLECO-11	20.6	17.6	20.2	18.5	18.8	19.1





# CERTIFICATE OF INSPECTION

Probeta	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio
DE-TLECO-12	17.0	16.8	18.5	18.3	16.0	17.3
DE-TLECO-13	18.5	18.3	20.9	19.3	17.2	18.8
DE-TLECO-14	18.6	16.7	20.8	14.7	19.9	18.1
DE-TLECO-15	19.2	19.5	20.5	18.4	20.7	19.7
DE-TLECO-16	18.4	18.4	20.0	17.3	18.3	18.5

**Observaciones:** La fabricación de las probetas y su configuración están de acuerdo según especificaciones declaradas por el cliente.

Elaborado por: Ing. Esteban Ramirez  
Analista Técnico Laboratorio de Metrología

Aprobado por: Ing. Isaac Simbaña  
Director Laboratorio de Metalografía





21 Industrial Avenue • Upper Saddle River NJ 07458  
 Telephone (201) 962-7373 • Fax (201) 962-8353  
 E-Mail: [info@phase2plus.com](mailto:info@phase2plus.com)

### Certificate of Calibration for Rockwell Hardness Tester

Model: 900-365  
 Temperature: 21°C  
 QC Technician: SJT

Serial No. 20JA142015  
 Humidity: 30%

Date: February 19, 2015  
 Method: ASTM E18  
 Diamond Indentor: n/a

Verification of Test Force				
	Standard Value	Reading Force	Error	Maximum Error ASTM E18
Pre-load (kgf)	10	10.03	+0.03%	±2%
Full load (kgf)	60	60.04	+0.07%	±0.75%
	100	100.15	+0.15%	±0.65%
	150	150.13	+0.09%	±0.60%

Verification of Depth Measuring Device			
Given Depth Movement in Microns	Depth Reading by Hardness Tester	Error	Maximum Error ASTM E18
60µm	60.1µm	+0.1µm	±1µm
110µm	110.3µm	+0.3µm	±1µm
160µm	159.8µm	-0.2µm	±1µm

Indirect Verification										
Standard Blocks	Test Results					Avg.	Error	Maximum Error	Repeatability	Maximum Repeatability
	H1	H2	H3	H4	H5					
83.7HRA	83.5	83.7	83.9	83.8	83.7	83.7	0	±0.5	0.4	1.0
92.9HRB	92.2	93.0	92.9	93.0	93.2	92.9	0	±1.0	1.0	1.5
63.5HRC	63.1	63.1	63.4	63.2	63.4	63.2	-0.3	±0.5	0.2	1.0
46.7HRC	46.6	46.7	46.5	46.7	46.8	46.7	0	±1.0	0.3	1.0
29.1HRC	29.0	29.3	29.5	29.4	29.2	29.3	+0.2	±1.0	0.5	2.0

The above testing machine has been verified to the requirements of ASTM E18. All test blocks used for calibration are NIST traceable and conform to ASTM E18-14.

Approved By: 

- Material Testing Instruments • Machine Tool Accessories • Precision Measuring Tools •
- [www.phase2plus.com](http://www.phase2plus.com)





Anexo 8: Informe del análisis topográfico mediante microscopia SEM.



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UTA



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**INGENIERÍA MECÁNICA**

**INFORME DE ANÁLISIS SEM**

OCTUBRE DE 2019  
AMBATO – ECUADOR

ORDEN 310

**LABORATORIO DE MATERIALES FICM-UTA  
 REPORTE DE EVALUACIÓN DE RUGOSIDAD**

**DATOS INFORMATIVOS**

Usuario: Ing. Diego Molina  
 RUC/CI: 0503064065 Dirección: Latacunga  
 Teléfono: 0995297941

Tipo de estudio: Experimental  
 Lugar de Ejecución: Universidad Técnica de Ambato  
 Fecha de Ejecución: 2019-10-14  
 Fecha de Finalización: 2019-10-17  
 Tipo de ensayo: Cualitativo

**Realizado por:** Ing. Gustavo Pomaquero. **Revisado por:** Ing. Sebastián Villegas.

**Parámetros del Experimento**

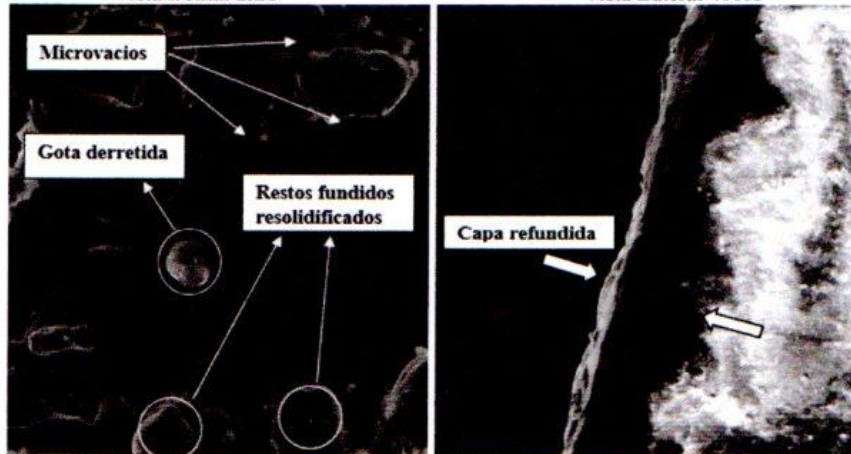
<b>Material:</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) Comercialmente: K100	<b>Tipo de Mecanizado:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)
		<b>Medio Dieléctrico:</b>	Ecológico (TL-ECO250-MG)
<b>Tipo de Muestra:</b>	Valor mínimo de rugosidad (DE-TLECO-10)	<b>Orden:</b>	310

**Análisis Superficial - Topográfico**

Experimento 1

Vista frontal 2kX

Vista Lateral 400X



**Observaciones:** Se presenta ciertas áreas con vacíos en la superficie, además se puede evidenciar ciertas zonas con material resolidificado posterior al corte por electroerosión.



**LABORATORIO DE MATERIALES FICM-UTA  
 REPORTE DE EVALUACIÓN DE RUGOSIDAD**

**DATOS INFORMATIVOS**

Usuario: Ing. Diego Molina  
 RUC/CI: 0503064065 Dirección: Latacunga  
 Teléfono: 0995297941  
 Tipo de estudio: Experimental  
 Lugar de Ejecución: Universidad Técnica de Ambato  
 Fecha de Ejecución: 2019-10-14  
 Fecha de Finalización: 2019-10-17  
 Tipo de ensayo: Cualitativo

**Realizado por:** Ing. Gustavo Pomaquero. **Revisado por:** Ing. Sebastián Villegas.

**Parámetros del Experimento**

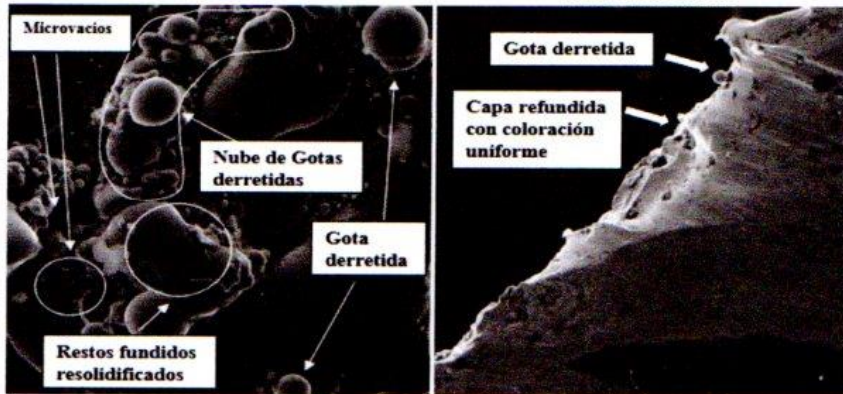
<b>Material:</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) Comercialmente: K100	<b>Tipo de Mecanizado:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)
		<b>Medio Dieléctrico:</b>	Ecológico (TL-ECO250-MG)
<b>Tipo de Muestra:</b>	Valor máximo de rugosidad (DE-TLECO-05)	<b>Orden:</b>	310

**Análisis Superficial - Topográfico**

**Experimento 2**

Vista frontal 2kX

Vista Lateral 400X



**Observaciones:** Se evidencia una superficie con múltiples gotas derretidas debido al corte en las áreas señaladas, además se puede observar una afectación mínima en la zona de corte por afectación térmica.





**LABORATORIO DE MATERIALES FICM-UTA  
 REPORTE DE EVALUACIÓN DE RUGOSIDAD**

**DATOS INFORMATIVOS**

Usuario: Ing. Diego Molina  
 RUC/CI: 0503064065 Dirección: Latacunga  
 Teléfono: 0995297941

Tipo de estudio: Experimental  
 Lugar de Ejecución: Universidad Técnica de Ambato  
 Fecha de Ejecución: 2019-10-14  
 Fecha de Finalización: 2019-10-17  
 Tipo de ensayo: Cualitativo

**Realizado por:** Ing. Gustavo Pomaquero. **Revisado por:** Ing. Sebastián Villegas.

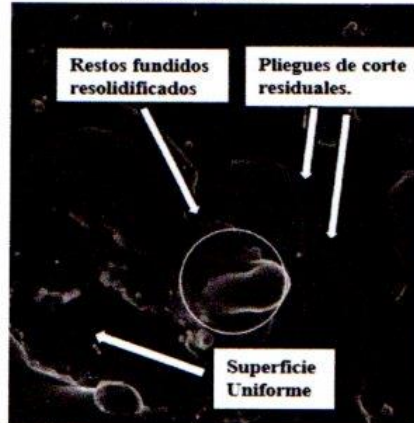
**Parámetros del Experimento**

<b>Material:</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) Comercialmente: K100	<b>Tipo de Mecanizado:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)
		<b>Medio Dieléctrico:</b>	Convencional (Aceite soluble en agua – Taladrina)
<b>Tipo de Muestra:</b>	Valor mínimo de rugosidad (DC-TL-11)	<b>Orden:</b>	310

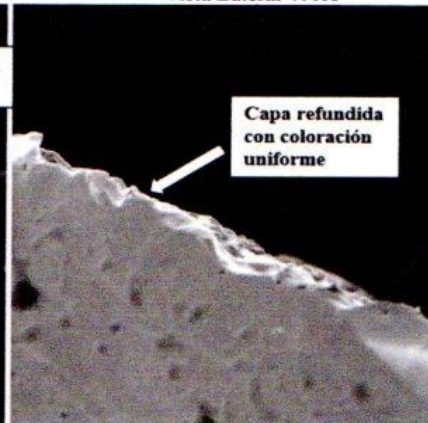
Análisis Superficial - Topográfico

Experimento 3

Vista frontal 2kX



Vista Lateral 400X



**Observaciones:** Se observa uniformidad en el corte desde una vista lateral, en tanto en la parte frontal se muestra una superficie uniforme, sin microvacíos.



**LABORATORIO DE MATERIALES FICM-UTA  
 REPORTE DE EVALUACIÓN DE RUGOSIDAD**

**DATOS INFORMATIVOS**

Usuario: Ing. Diego Molina  
 RUC/CI: 0503064065 Dirección: Latacunga  
 Teléfono: 0995297941

Tipo de estudio: Experimental  
 Lugar de Ejecución: Universidad Técnica de Ambato  
 Fecha de Ejecución: 2019-10-14  
 Fecha de Finalización: 2019-10-17  
 Tipo de ensayo: Cualitativo

**Realizado por:** Ing. Gustavo Pomaquero. **Revisado por:** Ing. Sebastián Villegas.

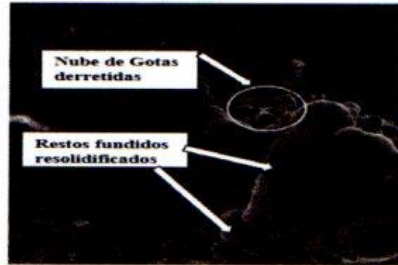
**Parámetros del Experimento**

<b>Material:</b>	Acero ledeburítico al 12% Cr (AISI: D3) Comercialmente: K100	<b>Tipo de Mecanizado:</b>	Corte por electroerosión por hilo (WEDM)
		<b>Medio Dieléctrico:</b>	Convencional (Aceite soluble en agua – Taladrina)
<b>Tipo de Muestra:</b>	Valor máximo de rugosidad (DC-TL-05)	<b>Orden:</b>	310

**Análisis Superficial - Topográfico**

Experimento 4

Vista frontal 2kX



Vista Lateral 400X



**Observaciones:** La superficie presenta zonas con gotas derretidas y ciertos restos fundidos en las zonas señaladas, la muestra presenta una rugosidad aparentemente mayor en comparación a la muestra de corte de taladrina mínima.



Ing. Gustavo Pomaquero  
**TÉCNICO LABORATORISTA**



Ing. Santiago Medina  
**COORDINADOR DE CTT**



Ing. Sebastián Villegas  
**JEFE DE LABORATORIO**