



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS
ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR
OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN
PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.**

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

GUTIÉRREZ TERÁN FERNANDO VLADIMIR
fernando.gutierrez@epn.edu.ec

REINOSO TOLEDO ALVARO ALEJANDRO
alvaro.reinoso@epn.edu.ec

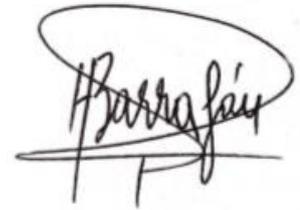
DIRECTOR:
BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO, MSc.
homero.barragan@epn.edu.ec

CODIRECTOR:
SOTOMAYOR GRIJALVA MARÍA VERÓNICA, MSc.
veronica.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, junio 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Fernando Vladimir Gutiérrez Terán** y **Alvaro Alejandro Reinoso Toledo**, bajo nuestra supervisión.



BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO



SOTOMAYOR GRIJALVA MARÍA VERÓNICA, MSc.

CODIRECTORA DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, Fernando Vladimir Gutiérrez Terán y Alvaro Alejandro Reinoso Toledo, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Fernando Vladimir Gutiérrez Terán



Alvaro Alejandro Reinoso Toledo

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado quien gracias a su amor, esfuerzo y sabiduría, en todos estos años, me han permitido llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Es un orgullo y privilegio coincidir en esta vida.

A mi padre Colón Eloy

A mi madre Rosalba

A mi hermano y mejor amigo Colón Eloy Jr.

A mi abuelita Isaura ⁺

A mis tías Amalia, Mery Lucia y María Esther ⁺

A mi tío Alfredo

A mi hermano Diego Andrés

A mi Daniela De Las Mercedes.

Fernando Vladimir

DEDICATORIA

A mis padres, Pablo y Silvana, quienes labraron con el sudor del día a día, su amor y sabiduría, esta tierra fértil a la que llamo mi vida.

A mis abuelos, Estela y Julio, pues en ellos conocí los frutos del amor más dulces que pudiésemos como seres humanos brindar, recordarlos siempre será un hermoso lugar.

Alvaro

AGRADECIMIENTO

Ha llegado la última aurora, tengo al frente un futuro promisorio agitado por las fulguraciones de la conciencia, y a mi espalda una sinfonía de batallas con ensueños de juventud. El derroche de luz es evidente y los latidos de vida que me acontecen son de gratitud.

Gratitud a mis padres Colón y Rosalba, por tornar su sabiduría y amor infinito en mí ser; colmando de apoyo incondicional mis días y siendo los principales promotores de mis sueños. Sueños sustentados en un eco de libertad, gracias a la educación que supieron brindarme. A ustedes, significativo amor envuelto en sublimes manos curtidas por sacrificio, la melodía indeleble de mi existir, la razón del equilibrio impoluto de mi realidad, a ustedes reconozco este singular éxito.

Gratitud a mi hermano Colón Eloy, por ser mi guía y mi protector. Por su basta generosidad de vida, que permitieron el desarrollo de un entorno irremplazable. Por obsequiar en mi vida una juventud en éxtasis. Colón, mi compañero de andar, de tertulias, de incesantes noches estudiantiles, estoy seguro de siempre contar contigo.

Gratitud mi amigo y ahora entrañable colega Alvaro, por brindarme su apoyo para la elaboración de este galardonado proyecto, y más relevante aún por su invaluable hermandad. Hermandad que nos permitió librar mil batallas, dejando en memorias latentes, vivencias extraordinarias. La odisea universitaria, queda insignificante en comparación a su fruto, y a los innumerables momentos de júbilo e intensidad, que eterniza nuestra amistad en este “paseo inmoral”. Siempre agradeceré, a la vida por conocerte, y a ti mi hermano, por hacer de este viaje una bocanada que vale la pena recordar.

Gratitud al amable hechizo del alma mía, mi Daniela De Las Mercedes, por su incondicional amor, basado en un fulgurante intelecto, armonioso dador de esperanza en mis tinieblas. Estos últimos pasos no serían posibles sin tu apoyo, sin el bienestar que provocas en mí; luz de guía, que ilumina la ruta de mi vivir, de esta felicidad eres culpable.

A los dirigentes de este estudio, MSc. Homero Barragán, MSc. María Verónica Sotomayor y MSc. Gabriel Velasteguí. Por su digna labor, mi gratitud y cariño por su generosa paciencia y profesionalidad, la cual enaltece la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Fernando Vladimir

AGRADECIMIENTO

He llegado. Tierra a la vista, es el paisaje más soñado. Después de esta travesía apolínea apostada a la razón, tal como es la vida estudiantil, he de mirar a los ojos, a mis pensamientos y recuerdos para, poco después, hacer un gesto de venia y agradecer. Agradecer a mis padres, trazaron el camino con valores, amor e intelecto, cargaron con cada tronco, esculpieron las piedras, dando forma a cada peldaño, para evitar, en lo posible, que tropezara abruptamente, pudiendo hoy, tener un horizonte hacia dónde dirigir mi mirada.

Mis abuelos, fueron por muchos años de mi vida, los colores más vívidos, más cálidos. Representaron esa cara de la moneda que todos deseamos contemplar, su amor destruyó las más sólidas tristezas, que, aunque su partida marcó un corte abrupto en el hilo de mi historia, hoy vine a avisarles que no me di por vencido, y que su recuerdo viene a ser aún más grato para mí, que esta etapa que estoy a punto de cerrar. Los amaré por siempre.

Todo puede suceder cuando se atraviesa la etapa universitaria, un libre albedrío retumba por cada rincón con fanfarreas y espejismos, muchos de los cuales, en determinadas circunstancias, nos logran seducir. Dentro de estas alucinaciones, debe haber alguien que las comparta para que se encuentre ahí, pero que también te ayude a remar fuera del remolino. Este último, materializado saliendo de la metáfora que entretiene a esta narrativa es mi mejor amigo, Fernando. Juntos, navegamos por aguas inhóspitas, mares agitados por fuerzas que fueron personas, situaciones y limitaciones tratando de confabular en nuestro fracaso, pero la asertividad que ambos tuvimos, se quedaron muy atrás. También, supimos darle el toque dionisiaco necesario a esta etapa, de la que siempre hablamos y recordamos con risa y nostalgia los episodios vividos. Estamos aquí por este esfuerzo colectivo que ha dado frutos. Estaré siempre agradecido mi amigo del alma.

A mi amada Gissella, me conociste como un muchacho lleno de tareas, compartiste mis malas noches, mis desvelos, y ahora puedo compartir contigo mis triunfos también, los cuales, seguirán construyendo nuestro futuro juntos.

A usted, Msc. Barragán, por el docente y cálida persona que representa, mi sincero agradecimiento, su aporte en este trabajo ha sido invaluable.

Alvaro

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| CERTIFICACIÓN..... | i |
| DECLARACIÓN..... | ii |
| DEDICATORIA..... | iii |
| AGRADECIMIENTO..... | v |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x |
| RESUMEN..... | xiii |
| ABSTRACT..... | xiv |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| Objetivo general..... | 2 |
| Objetivos específicos..... | 2 |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 1.1. Corte por oxígeno (OFC)..... | 3 |
| 1.1.1. Elementos de influencia en el proceso OFC..... | 5 |
| 1.2. Corte por Plasma (PAC)..... | 9 |
| 1.2.1. Variables o parámetros de influencia en el proceso PAC..... | 10 |
| 1.3. Corte por Electrohilo (WEDM)..... | 15 |
| 1.3.1. Generación y función de chispas controladas en el proceso WEDM..... | 15 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 22 |
| 2.1. Adquisición material base..... | 26 |
| 2.2. Caracterización preliminar de material base..... | 27 |
| 2.2.1. Espectrometría por chispa..... | 27 |
| 2.2.2. Micrografía del Material Base..... | 27 |
| 2.3. Obtención de probetas..... | 29 |
| 2.3.1. Obtención de probetas con sierra..... | 33 |
| 2.3.2. Obtención de probetas con proceso OFC..... | 33 |
| 2.3.3. Obtención de probetas con proceso PAC..... | 36 |
| 2.3.4. Obtención de probetas con proceso WEDM..... | 39 |
| 2.4. Ensayo Metalográfico..... | 41 |
| 2.4.1. Preparación y montaje de probetas..... | 41 |
| 2.4.2. Obtención de las fotomicrografías..... | 44 |
| 2.5. Ensayo de Microdureza..... | 45 |
| 2.5.1. Proceso de indentaciones..... | 46 |
| 2.5.2. Procesamiento de imágenes y obtención de valores de dureza..... | 47 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 2.6. | Ensayo de Tracción | 47 |
| 3. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 49 |
| 3.1. | Resultados | 49 |
| 3.1.1. | Composición de la plancha de acero. | 49 |
| 3.1.2. | Superficies de corte obtenidas..... | 49 |
| 3.1.3. | Macrografías (zona afectada por el calor)..... | 53 |
| 3.1.4. | Micrografías en la zona de transición de la ZAC..... | 54 |
| 3.1.5. | Valores obtenidos de microdureza..... | 60 |
| 3.1.6. | Valores obtenidos de resistencia a la tracción. | 63 |
| 3.1.7. | Rendimiento de los procesos de corte..... | 64 |
| 3.1.8. | Datos obtenidos para costeo operacional | 65 |
| 3.2. | Discusión..... | 69 |
| 3.2.1. | Análisis de la calidad de corte y tipo de acabado superficial..... | 69 |
| 3.2.2. | Interpretación metalográfica | 70 |
| 3.2.3. | Análisis de microdureza..... | 77 |
| 3.2.4. | Análisis de resistencia a la tracción | 82 |
| 3.2.5. | Análisis de rendimiento en los procesos de corte | 84 |
| 3.2.6. | Análisis de costos de operación entre procesos de corte | 86 |
| 4. | CONCLUSIONES | 88 |
| 4.1. | Conclusiones..... | 88 |
| 4.2. | Recomendaciones..... | 89 |
| 5. | BIBLIOGRAFÍA..... | 91 |
| 6. | ANEXOS..... | 92 |
| 6.1. | ANEXO I. Certificado de calidad de la plancha de acero | 92 |
| 6.2. | ANEXO II. Informe técnico de la espectrometría por chispa | 93 |
| 6.3. | ANEXO III. Registro de operaciones de corte..... | 96 |
| 6.4. | ANEXO IV. Informe de análisis de microdureza..... | 111 |
| 6.5. | ANEXO V. Informe del ensayo de tracción | 123 |
| 6.6. | ANEXO VI. Resultados de ensayo metalográfico | 125 |
| 6.7. | ANEXO VII. Gráficas de dureza en función de la indentación..... | 129 |
| 6.8. | ANEXO VIII. Gráficas de esfuerzo en función del desplazamiento | 132 |
| 6.9. | ANEXO IX. Diagrama Fe – C..... | 136 |
| 6.10. | ANEXO X. Diagrama TTT para acero AISI 1010 | 137 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1. Dimensiones de plancha adquirida. | 26 |
| Tabla 2.2. Resumen de probetas obtenidas para los ensayos de tracción, metalografía y microdureza. | 29 |
| Tabla 2.3. Nomenclatura de las probetas utilizadas para el estudio. | 30 |
| Tabla 2.4. Valores de entrada para realización de indentaciones. | 46 |
| Tabla 3.1. Composición del acero de bajo carbono mediante la espectrometría. | 49 |
| Tabla 3.2. Superficies de corte obtenidas tras los procesos de Sierra, OFC, PAC y WEDM. | 50 |
| Tabla 3.3. Zona afectada por el calor posterior a los procesos de OFC, PAC y WEDM. ... | 53 |
| Tabla 3.4. Micrografías de la zona afectada por el calor, del material base y posterior a los procesos de OFC, PAC y WEDM. | 55 |
| Tabla 3.5. Valores obtenidos de dureza en probeta corte con sierra manual. | 60 |
| Tabla 3.6. Valores obtenidos de dureza en probeta con corte OFC. | 61 |
| Tabla 3.7. Valores obtenidos de dureza en probeta con corte PAC. | 62 |
| Tabla 3.8. Valores obtenidos de dureza en probeta con corte WEDM. | 62 |
| Tabla 3.9. Valores obtenidos del Ensayo de Tracción en las probetas cortadas por sierra, OFC, PAC y WEDM. | 63 |
| Tabla 3.10. Tasa de remoción de material en proceso de corte. | 64 |
| Tabla 3.11. Tasa de remoción de material en proceso de corte. | 64 |
| Tabla 3.12. Velocidad de corte obtenida. | 65 |
| Tabla 3.13. Tiempos de operación de los procesos de corte OFC, PAC y WEDM. | 65 |
| Tabla 3.14. Consumo y costeo de insumos en operaciones de corte. | 66 |
| Tabla 3.15. Consumo de material base en procesos de corte. | 67 |
| Tabla 3.16. Consumo de material base en procesos de corte. | 68 |
| Tabla 3.17. Calidad en la superficie de corte tras los procesos OFC, PAC y WEDM. | 69 |
| Tabla 3.18. Aplicación de los procesos OFC, PAC y WEDM, respecto al grado de rugosidad. | 70 |
| Tabla 3.19. Porcentajes de la zona afectada por el calor para los procesos OFC, PAC y WEDM. | 73 |
| Tabla 3.20. Tamaño de grano ASTM y microestructura de las probetas obtenidas ante los procesos de corte. | 77 |
| Tabla 3.21. Valores de dureza por zonas. Proceso OFC. | 79 |
| Tabla 3.22. Valores de dureza por zonas del proceso PAC. | 80 |
| Tabla 3.23. Costos de inversión en procesos de corte. | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Esquema proceso Oxi-Fuel Cutting (OFC)..... | 3 |
| Figura 1.2. Condiciones para proceso de corte OFC. | 4 |
| Figura 1.3. Elementos de influencia para proceso de corte OFC. | 5 |
| Figura 1.4. Esquema proceso PAC..... | 9 |
| Figura 1.5. Parámetros principales proceso PAC..... | 10 |
| Figura 1.6. Incidencia de altura de antorcha en ángulo de bisel..... | 13 |
| Figura 1.7. Dirección de corte con plasma. | 13 |
| Figura 1.8. Esquema proceso WEDM..... | 15 |
| Figura 1.9. Esquema interacciones en proceso WEDM. | 16 |
| Figura 1.10. Proceso de corte con WEDM durante “pulso on time”..... | 17 |
| Figura 1.11. Proceso de corte con WEDM durante “pulso off time”..... | 17 |
| Figura 1.12. Variables de entrada para el proceso de electrohilo..... | 18 |
| Figura 2.1. Secuencia de Trabajo para la ejecución del Estudio “Análisis comparativo de procesos de corte OFC, PAC, WEDM, en probetas de acero de bajo carbono”..... | 25 |
| Figura 2.2. Plancha de acero de bajo carbono adquirida. | 26 |
| Figura 2.3. Extracción de las muestras representativas para la caracterización del material base..... | 28 |
| Figura 2.4. Preparación y Montaje de las probetas que caracterizan el material base. | 28 |
| Figura 2.5. Designación de la nomenclatura de las probetas..... | 30 |
| Figura 2.6. Esquema de procedimiento para ejecución de cortes OFC, PAC y WEDM.... | 32 |
| Figura 2.7. Ejecución de cortes secundarios en sierra industrial alternativa..... | 33 |
| Figura 2.8. Tanque de Oxígeno y Acetileno suministrados en proceso de OFC..... | 34 |
| Figura 2.9. Manómetros, soplete y boquilla usados en proceso de OFC..... | 35 |
| Figura 2.10. Equipo de plasma Hypertherm Powermax 85. | 36 |
| Figura 2.11. Antorcha de corte Duramax 85. | 36 |
| Figura 2.12. Control de altura THC. | 37 |
| Figura 2.13. Mesa de corte por Plasma (PAC)..... | 37 |
| Figura 2.14. Equipo de corte WEDM Gold San..... | 39 |
| Figura 2.15. Carrete de hilo de corte..... | 40 |
| Figura 2.16. a) Montura de probetas. b) Superficie preparada 01. c) Superficie preparada 02. | 42 |
| Figura 2.17. Preparación de probetas metalográficas en moldes..... | 43 |
| Figura 2.18. Pulidora Forcimat utilizada para el desbaste y pulido..... | 43 |
| Figura 2.19. Probetas metalográficas obtenidas. a) Probetas Sierra manual. b) Probetas OFC. c) Probetas PAC. d) Probetas WEDM. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.20. Microscopio metalográfico OLYMPUS GX41. | 45 |
| Figura 2.21. Microdurómetro Duroline utilizado para las indentaciones. | 46 |
| Figura 2.22. Probetas marcadas a 50 mm en la zona de área constante reducida. | 47 |
| Figura 2.23. Marcador de presión para probetas de tracción. | 48 |
| Figura 2.24. Marcador de presión para probetas de tracción. | 48 |
| Figura 3.1. Zonas de transición de la ZAC para la identificación de las microestructuras. | 54 |
| Figura 3.2. a) Micrografía de S-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%. b) Micrografía estructura ferrítica perlítica a 500X con ataque químico de Nital al 5%. | 71 |
| Figura 3.3. a) Micrografía de S-M-T-01 a 100X con ataque químico de Nital al 10%. b) Micrografía de S-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%. | 72 |
| Figura 3.4. Transición de microestructura en la longitud transversal al corte para OFC, PAC y WEDM. | 72 |
| Figura 3.5. a) Macrografía de la probeta OFC-M-T-01. b) Micrografía de la ZAC en probeta OFC-M-T-01. | 73 |
| Figura 3.6. a) Micrografía de la probeta OFC-M-T-01 a 100X con ataque químico de Nital al 10%. b) Micrografía de la probeta OFC-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%. | 74 |
| Figura 3.7. a) Macrografía de la probeta PAC-M-T-01. b) Micrografía de la ZAC en probeta PAC-M-T-01. | 74 |
| Figura 3.8. a) Micrografía de la probeta PAC-M-T-01 a 100X con ataque químico de Nital al 10%. b) Micrografía de la probeta PAC-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%. | 75 |
| Figura 3.9. a) Macrografía de probeta WEDM-M-T-01. b) Micrografía de la ZAC en probeta WEDM-M-T-01. | 75 |
| Figura 3.10. a) Micrografía de la probeta WEDM-M-T-01 a 100X con ataque químico de Nital al 10%. b) Micrografía de la probeta WEDM-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%. | 76 |
| Figura 3.11. Valores de microdureza en superficie transversal de corte de las probetas obtenidas mediante sierra, OFC, PAC y WEDM. | 77 |
| Figura 3.12. Gráfica dureza vs. distancia (zonas) OFC. | 79 |
| Figura 3.13. Gráfica dureza vs. distancia (zonas) PAC. | 80 |
| Figura 3.14. Gráfica comparativa de dureza media por zonas. | 81 |
| Figura 3.15. Carga máxima registrada para los procesos de corte bajo el ensayo de tracción según la norma ASTM-E8. | 82 |
| Figura 3.16. Resistencia a la tracción para los procesos de corte bajo el ensayo de tracción según la norma ASTM-E8. | 83 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.17. Porcentaje de elongación en 50 mm de zona calibrada para los procesos de corte bajo el ensayo de tracción según la norma ASTM-E8. | 83 |
| Figura 3.18. Valores de esfuerzo en función del desplazamiento del cabezal de las probetas obtenidas mediante sierra, OFC, PAC y WEDM. | 84 |
| Figura 3.19. Parámetros de rendimiento en procesos de corte. | 85 |
| Figura 3.20. Costos fijos y variables en los procesos de corte. | 86 |

RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata el tema del análisis comparativo de los efectos producidos ante la aplicación de procesos de corte OFC, PAC y WEDM en probetas de acero de bajo contenido de carbono. La investigación tiene como objetivo determinar de manera cuantitativa, los efectos producidos por la transferencia de calor que se da durante el proceso de corte en el acero AISI 1010. Se obtuvieron las probetas necesarias bajo los procesos mencionados, registrando los parámetros operacionales y, mediante corte frío, para la evaluación de las propiedades originales del acero. Para la caracterización mecánica se efectuó un ensayo de tracción bajo la norma ASTM E8/E8M-16a y el ensayo para la determinación de microdureza, bajo la norma ASTM E92-17. Se realizó un análisis metalográfico que reveló los cambios microestructurales que produjeron los cortes realizados con plasma y oxígeno. Los resultados muestran que el proceso PAC es el corte que altera en mayor medida a la dureza superficial asociada con la presencia de ferrita acicular fina, OFC el proceso que altera dentro de un área más amplia la dureza, efecto asociado con la presencia de ferrita acicular gruesa y que para el proceso WEDM el cambio microestructural y de valores de dureza no fueron apreciables debido a que no se determinó una zona afectada por el calor (ZAC). La calidad de corte y los costos de operación también fueron determinados y mostrados como parte de los resultados en el trabajo de investigación.

Palabras clave: Acero AISI 1010, electrohilo, ferrita acicular, oxicorte, plasma, ZAC.

ABSTRACT

This research work deals with the topic of comparative analysis of the effects produced by the application of OFC, PAC and WEDM cutting processes on low carbon steel specimens. The objective that this research wants to reach, in a quantitative terms is to determine the effects produced in AISI 1010 steel, by the heat transfer that happens during the cutting process. The specimens had cut, the operational parameters were recorded and, by cold cutting, the original properties of the steel were determine. For mechanical characterization, a tensile test was carried out under the ASTM E8 / E8M-16a standard and the test for the determination of microhardness, was determined by following ASTM E93-17 standard indications. A metallographic analysis was performed that revealed the microstructural changes produced by the cuts made with plasma and oxygen methods. The results show that the PAC process is the cut that alters to a greater hardness values, associated with the presence of fine acicular ferrite, OFC alters within a wider area the hardness surface, effect associated with the presence of acicular ferrite coarse and that for the WEDM process the microstructural change and hardness values were not appreciable because a heat affected zone (HAZ) could not be determined. Cut quality and operating costs were also determined and shown as part of the results in the research work.

Keywords: Acicular ferrite, AISI 1010 steel, HAZ, OFC, PAC, WEDM.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.

INTRODUCCIÓN

En la industria manufacturera y metalmecánica prevalecen como procedimientos fundamentales, los procesos de corte para la separación de metales. Estos procesos se fundamentan en el corte térmico, donde para realizar la remoción del material, se procura llevar al acero a temperaturas superiores a su punto de fusión. La afectación térmica que se produce al ejecutar los principales procesos de corte en metales, es un factor que modifica la microestructura del metal. Al variar su microestructura, varían también sus propiedades mecánicas y repercuten en la aplicación, la vida útil y la eficiencia en el funcionamiento preestablecido para el material.

Entre los procesos más utilizados, se encuentra el Oxicorte (OFC), en el cual se utiliza una temperatura de precalentamiento cercana a 800 °C y una temperatura de corte aproximada de 3000 °C. También un proceso común es el de corte por arco Plasma (PAC), en el cual la temperatura del arco bordea los 30000 °C. Sin embargo, un proceso novedoso en la industria ecuatoriana es el corte por electrohilo WEDM, en el cual se utiliza una temperatura de corte aproximada de 10000 °C para separar el metal, además se requiere que este proceso utilice refrigerante para completar su función.

La zona afectada por el calor (ZAC) implícita en cada proceso de corte térmico, no se encuentra cuantificada, siendo este el propósito del presente estudio, en el cual se analizan los cambios microestructurales, el cambio en el tamaño de grano según la norma ASTM E-112, la variación en la microdureza en el área perpendicular a la dirección de corte y en la resistencia a la tracción en sentido longitudinal de la plancha de acero. Para efectuar lo expuesto anteriormente, se obtendrán probetas de acero de bajo contenido de carbono AISI 1010, mediante el uso de los diferentes procesos de corte mencionados, las mismas que se analizarán bajo los ensayos de metalografía según la norma ASTM E3-11, microdureza según la norma ASTM E92-17 y resistencia a la tracción según la norma ASTM-E8/E8M-16a. Finalmente, se realizará un análisis comparativo de los resultados de estos ensayos y se evaluará el rendimiento de los procesos de corte en función a los costos operacionales y de inversión generados en la aplicación de cada proceso.

Objetivo general

Analizar los efectos producidos ante la aplicación de procesos de corte con Oxicorte (OFC), Plasma (PAC) y Electrohilo (WEDM), en probetas de acero de bajo contenido de carbono.

Objetivos específicos

- Obtener probetas de acero, mediante los procesos de Oxicorte (OFC), Plasma (PAC) y Electrohilo (WEDM).
- Realizar ensayos para caracterizar mecánica y metalográficamente las probetas obtenidas mediante los procesos de corte.
- Comparar cuantitativamente el nivel de afectación y el tipo de acabado superficial de las probetas sometidas a los diferentes procesos de corte.
- Analizar los costos de producción para los procesos de corte establecidos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Corte por oxígeno (OFC)

OFC, Oxi-Fuel Cutting, por sus siglas en inglés, es un proceso de corte de tipo térmico-químico, donde una pequeña sección de la pieza de trabajo metálica, a la cual se le añade calor bajo un proceso de precalentamiento hasta llegar a su punto de ignición, es cortada por la aplicación de un flujo de oxígeno que provoca una rápida reacción de oxidación que tiene como resultado grandes cantidades de material removido (Harish & Babu, 2017). En la Figura 1.1. se observa un esquema básico de este proceso de corte.

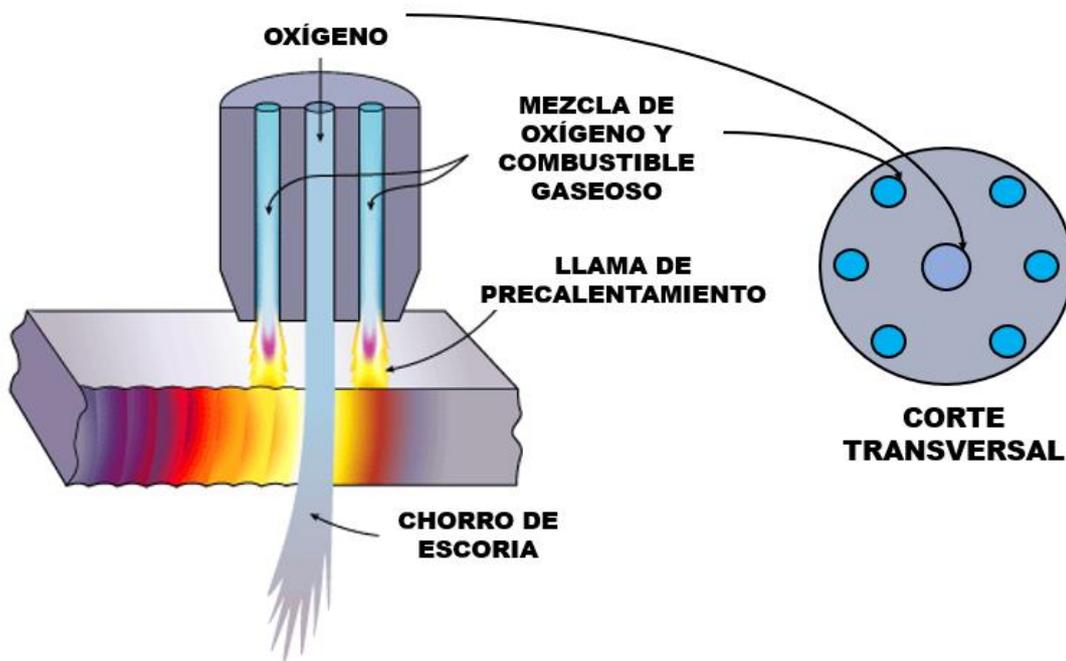


Figura 1.1. Esquema proceso Oxi-Fuel Cutting (OFC).

Fuente: (TWI Ltd., 2020).

Para garantizar el proceso de oxicorte en metales, se debe cumplir cuatro condiciones básicas descritas en el esquema de la Figura 1.2.

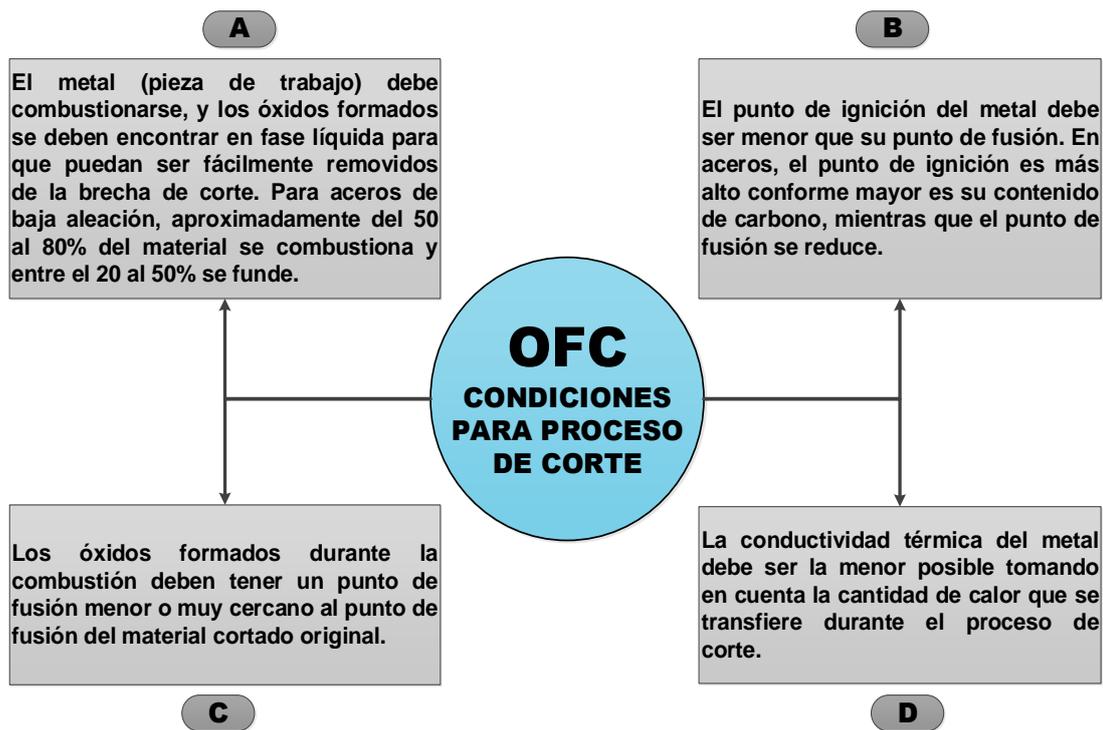


Figura 1.2. Condiciones para proceso de corte OFC.

Fuente: (Tušek & Šraj, 2007).

Teniendo en cuenta estas condiciones, el proceso de oxicrote puede ser considerado como una combinación de dos procesos separados. Como primer punto, el material a ser cortado debe incrementar su temperatura hasta su punto de ignición, se logra alcanzar esta temperatura con el primer proceso, el precalentamiento del área específica que alcanza valores de entre 870 °C a 900 °C. A este punto, un chorro de oxígeno frío pasa a través de una boquilla hacia el área del material precalentado. Esto crea una reacción química entre el material y el oxígeno, liberando una cantidad de calor de tal magnitud que hace que el material se funda. El material rápidamente forma óxidos (escoria), muchos de ellos son expulsados por el mismo chorro de oxígeno, sin embargo, si el chorro no tiene la suficiente potencia para retirar los óxidos formados o si la velocidad de corte es muy elevada, éstos, rápidamente se solidifican en la brecha del corte, por lo que el proceso no resultará totalmente ejecutado (BOC, 2012).

1.1.1. Elementos de influencia en el proceso OFC

Dentro del proceso de oxicorte existen elementos que inciden directamente en el resultado del proceso en términos de calidad, productividad y costos del material cortado obtenido (ESAB, 2006). Estos elementos, que se muestran en la Figura 1.3. son contextualizados a continuación.

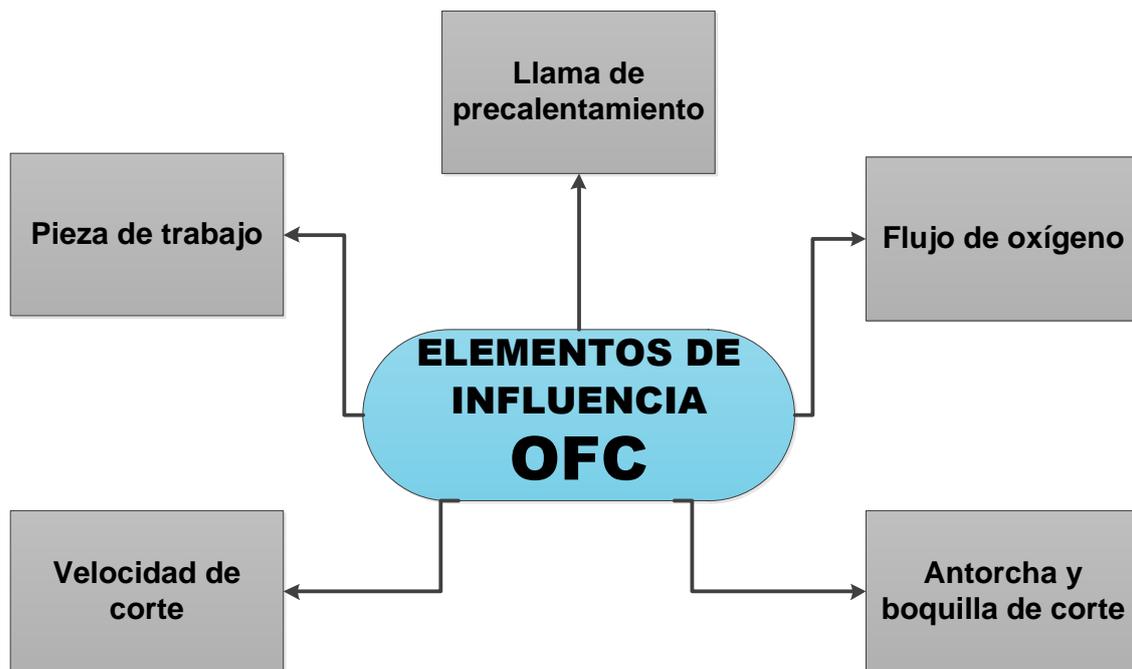


Figura 1.3. Elementos de influencia para proceso de corte OFC.

Fuente: (ESAB, 2006)

a. Llama de precalentamiento

Esta llama se forma a partir de la combustión por la mezcla de oxígeno de precalentamiento y un combustible, pudiendo ser éste, acetileno, propileno, propano, gas natural o metil acetileno. La diferencia entre utilizar uno u otro dependerá del material a cortarse, que determinará la temperatura que se tiene que alcanzar, variable directamente asociada con el poder calorífico que tiene cada combustible (ESAB, 2006). Para el propósito de este estudio se utilizó una llama de precalentamiento de aproximadamente 850 °C, mediante un flujo de oxígeno menor a 40 l/min en un tiempo de 4 minutos, valores recomendados por el manual del operador.

La llama de precalentamiento cumple tres objetivos; el primero, subir la temperatura del material a ser cortado, hasta alcanzar el punto de ignición. El segundo objetivo, contrarresta

las pérdidas de calor por conducción del metal. Por último, protege creando una barrera, al proceso de corte de los efectos adversos que pudiese inferir el entorno (BOC, 2012).

b. Flujo de oxígeno

La cantidad de oxígeno debe ser la necesaria y aplicada con las características adecuadas por dos razones principalmente, la primera, para asegurar que exista la cantidad suficiente de oxígeno para que la reacción de combustión suceda y se mantenga. Por otro lado, porque el flujo de oxígeno es el factor de mayor incidencia en la calidad resultante del corte.

Las características de la aplicación del flujo de oxígeno para un correcto desempeño en el proceso de corte son una alta pureza del oxígeno, alta presión de aplicación, uniformidad y alcance, diámetro del flujo.

La pureza del oxígeno debe alcanzar como un mínimo 99,50 %, entre mayor sea este valor, mejores resultados en términos de calidad de corte se obtendrán, esto, debido a que a ciertos valores de velocidad requeridos a alcanzarse muchas veces no pueden cumplirse y el acabado superficial de la cara de corte resulta pobre.

La presión con la que se aplica el flujo de oxígeno debe ser la adecuada para añadir la cantidad necesaria de oxígeno para reaccionar, además, ser la necesaria para remover los óxidos que se generan.

El flujo de oxígeno debe ser aplicado tomando una forma columnar uniforme, además que permita tener una visibilidad al operador que está cortando el material adecuada. Por último, la cantidad de oxígeno tiene una incidencia directa en la brecha de corte que se genera, lo que afecta en términos de consumo de material, que se traduce a una afectación en los costos de la operación (ESAB, 2006). Para propósitos de este estudio se utiliza un tanque de oxígeno de 99 % de gas, a una presión de 25 psi mediante un flujo de corte de 40 l/min.

c. Antorcha y boquilla de corte

Para la antorcha de corte, el largo, el tipo de dispositivo de mezcla y su capacidad son las características y componentes de mayor importancia en este elemento. El largo de la antorcha no tiene impacto sobre la calidad de corte, únicamente en su capacidad.

Las antorchas pueden tener o no válvulas para su funcionamiento, de no tenerlas tienen dispositivos que realizan de manera similar a la función de una válvula, no tiene impacto en la calidad de corte. De igual manera, el número de mangueras tendrá un impacto en la

capacidad y en casos de espesores de corte grandes si se evidenciará en la calidad de la superficie cortada al tener una distribución mínima de oxígeno y mezcla. Para este estudio se utiliza una boquilla de 2 mm.

En las boquillas de corte, dependiendo del tipo de combustible a utilizarse, existen boquillas de diferente geometría que tienen incidencia en el proceso con respecto a la velocidad de corte que se puede alcanzar con una o con otra sin causar un desgaste mayor en éstas que afectan la durabilidad y se ve reflejado en los costos de la operación (ESAB, 2006).

d. Velocidad de corte

Este parámetro se establece a partir de tablas elaboradas por los diferentes fabricantes de equipos de oxicorte, dependiendo del espesor y tipo de material a cortarse sugiere un valor de velocidad diferente. A partir de este valor sugerido, si la velocidad sobrepasa este valor, la calidad del corte disminuye debido a que aumenta la aparición de líneas de arrastre que van redondeando la parte inferior de la pieza cortada. Si la velocidad es muy baja, se crea inestabilidad en el proceso de corte pudiendo existir zonas en las que no exista una buena penetración en un caso extremo, en términos de calidad existe el apareamiento de rebabas y acumulación de escoria en las esquinas de la cara del corte (ESAB, 2006). La velocidad de corte utilizada en este estudio es de 8.2 mm/s.

e. Pieza de trabajo

Cuando el material a cortar es un acero, el contenido de sus elementos aleantes tales como el níquel, cromo, manganeso y silicio, tienen una incidencia directa en el desempeño del proceso, así como la calidad resultante. A medida que estos elementos incrementan en proporción en la composición del acero puede incrementarse la dureza final de la zona de corte, mayor presencia de líneas de arrastre, la velocidad debe disminuirse debido a que el proceso de oxidación es menor, para manejar esta descompensación en la oxidación, es necesario aportar más energía en el precalentamiento, lo cual tiene una afectación en las propiedades finales de la zona de corte, mayor redondeamiento y un incremento en los costos del corte. Al realizar el corte con llama oxiacetilénica para este estudio, se obtiene en la pieza resultante un arrastre de 1 mm, con un ancho de corte de 15 mm y en una longitud de corte de 30 mm.

f. Régimen de corte

Para OFC, dependiendo del tipo de combustible utilizado, acetileno o propano, existen diferentes tipos de boquillas, la selección de estos consumibles de acuerdo con el poder calorífico del combustible, resultará en la capacidad de cortar del proceso en función del

espesor. Con esto, el corte con oxígeno tiene un rango de corte desde los 3 milímetros hasta 150 milímetros para el caso de aceros de bajo carbono.

Según el manual del operador es importante relacionar el espesor a cortar con la presión de oxígeno, valores entre 30 y 60 psi para corte manual y de 60 a 100 psi para corte automático manteniendo un chorro uniforme de oxígeno. Para las flamas de precalentamiento, se recomienda mantener un rango de 1.5 a 3 mm por encima de la superficie del material a cortar, hasta que el material se torne de color amarillo rojizo.

g. Materiales y espesores que se pueden cortar con llama oxiacetilénica

En el caso del proceso OFC, su aplicación se encuentra limitada para metales donde el punto de fusión de sus óxidos sea menor que el metal original, con esto, el proceso se emplea para aceros de bajo carbono y ciertas aleaciones, hierros colados y aceros de alta aleación en donde se cumple esta condición.

Los espesores a cortar mediante llama oxiacetilénica comprenden desde los 3 milímetros hasta 150 milímetros para aceros de bajo carbono y aleaciones.

h. Alcances del proceso oxicorte

El proceso de corte con llama oxiacetilénica (OFC) implica una simple preparación, equipo portátil y con baja rentabilidad. Además, el usuario no necesita mayor capacitación para hacer uso de este proceso. Otra ventaja es que los aceros se pueden cortar con facilidad, permitiendo así cortar espesores considerables en caso de aceros de bajo carbono, donde la dirección de corte puede cambiar rápidamente y con un radio de giro pequeño.

Mediante la aplicación de este proceso de corte es posible cortar placas de grandes espesores y para el caso de la técnica manual mayor facilidad de manipulación de la antorcha en un tiempo de proceso menor.

i. Limitaciones del proceso oxicorte

Los aspectos negativos que se presentan en el proceso de corte por oxígeno parten de una reducida aplicación, limitada prácticamente al corte de aceros de bajo carbono. Por otro lado, la calidad de corte es pobre, existen muchas irregularidades en el filo de corte. Otra característica negativa del proceso es su gran aporte de calor, que en planchas de espesores delgados suele resultar en superficies deformadas. Por último, siempre se incurre en un proceso previo antes de ejecutar la operación de corte, el precalentamiento, donde existe consumo de oxígeno y combustible.

1.2. Corte por Plasma (PAC)

PAC, Plasma Arc Cutting por sus siglas en inglés, es un proceso térmico de corte donde un arco de plasma es conducido de manera continua a través de una boquilla, el cual se genera después que un gas fluye entre un cátodo de tungsteno y un ánodo alcanzando temperaturas por sobre los 28000 °C, bajo estas condiciones, el material que está siendo maquinado, conductor eléctrico, rápidamente se funde y vaporiza (El-Hofy, 2005).

Los gases del plasma son disociados e ionizados parcialmente dentro del arco haciéndolos eléctricamente conductores; debido a la alta densidad de energía y temperatura, el plasma se expande y desplaza a través de la pieza de trabajo por valores tres veces superiores a la velocidad del sonido (Linde Specialist Plasma Arc, 2011).

Para iniciar el proceso de corte, un arco piloto se genera entre la boquilla y el electrodo producto de la aplicación de alto voltaje, este arco piloto considerado de baja energía, prepara el espacio entre el quemador de plasma y la pieza de trabajo provocando una ionización parcial, en el instante en que el arco piloto hace contacto con la pieza de trabajo, el plasma principal se genera debido a un incremento automático de potencia eléctrica.

Cuando el arco de plasma principal hace contacto con la pieza de trabajo, el material de ésta se funde y parcialmente se vaporiza debido al calor entregado por el arco. El material fundido es retirado del espacio generado por el paso del arco debido a la energía cinética que le proporciona éste a las partículas fundidas (Linde Specialist Plasma Arc, 2011). La esquematización de este proceso de corte se puede observar en la Figura 1.4.

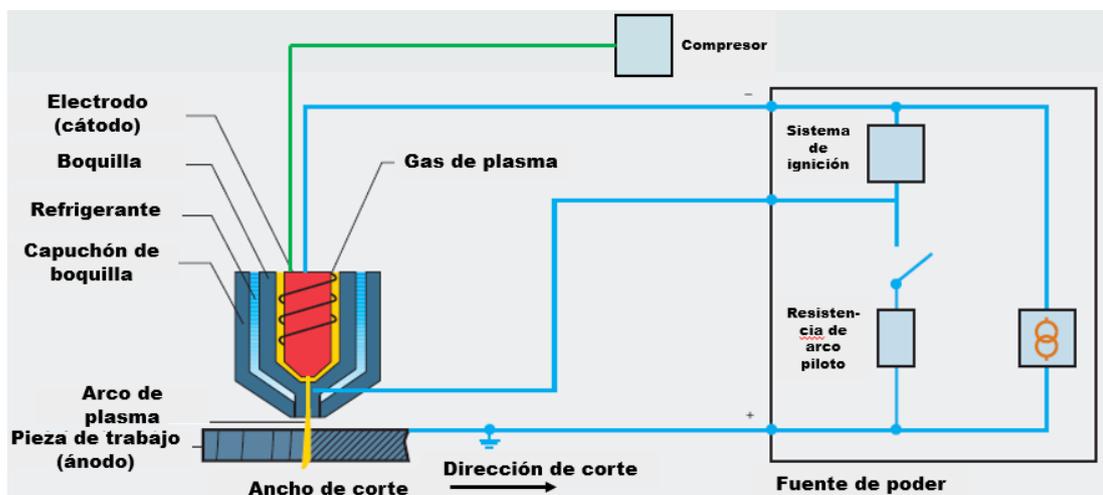


Figura 1.4. Esquema proceso PAC.

Fuente: (Linde Specialist Plasma Arc, 2011)

1.2.1. Variables o parámetros de influencia en el proceso PAC

Para el proceso de corte con plasma, existen parámetros o variables que son determinantes para el resultado que se obtiene tras el corte, se evidencian en las condiciones finales del material cortado como la rugosidad, bisel en la línea de corte, rebabas; además de indicadores del proceso en sí como la tasa de remoción de material, desarrollo de costos (Linde Specialist Plasma Arc, 2011). A continuación, en la Figura 1.5. se indican estas variables.

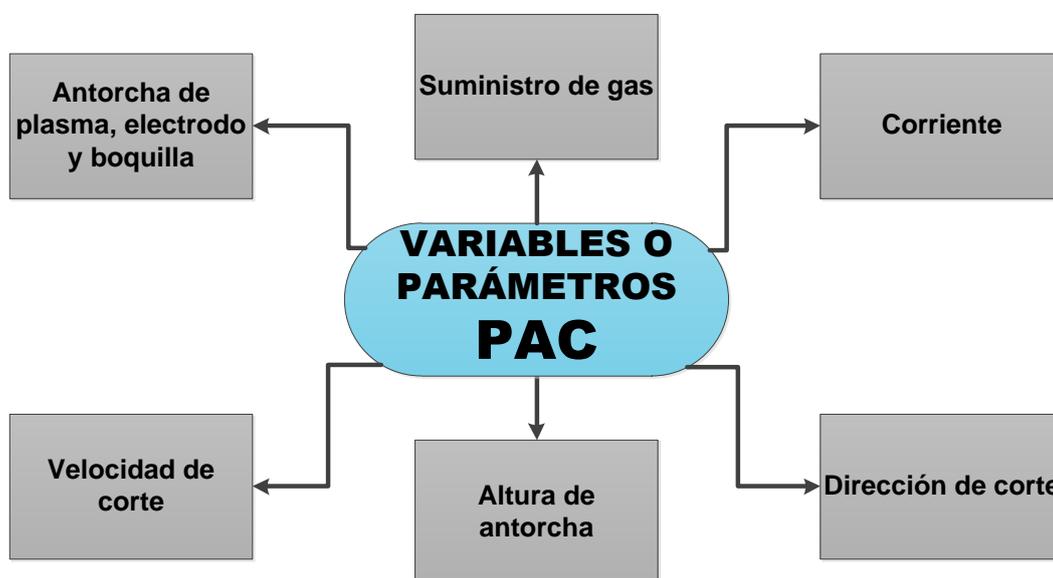


Figura 1.5. Parámetros principales proceso PAC.

Fuente: (Linde Specialist Plasma Arc, 2011)

a. Antorcha (electrodo y boquilla)

La mejora continua del proceso de corte por plasma depende en gran cantidad del diseño de la antorcha de plasma. Entre más se comprima el arco de plasma, mayor será la velocidad de corte y la calidad del área de corte mejorará notablemente.

Los componentes claves de la antorcha son el electrodo y la boquilla, ambos, son elementos con un tiempo de vida útil limitada, por lo que la selección incorrecta de estos elementos acortaría la vida útil de la antorcha además que incrementa los costos del proceso (Linde Specialist Plasma Arc, 2011).

Para garantizar la correcta elección de estos elementos también conocidos en el ámbito industrial-comercial como consumibles se debe tomar en cuenta ciertos factores como el tipo de material a cortar y su espesor, la altura de la antorcha a la pieza de trabajo, altura inicial de perforación, tiempo de demora en perforación (estática), las recomendaciones de configuración en términos de calidad de corte del fabricante así como también de las configuraciones de producción (Hypertherm, 2016). Para propósitos de este estudio se utiliza la boquilla código 220816 y un electrodo de código 220842, estimando una distancia de 1.5 mm desde la antorcha hasta la pieza de trabajo.

b. Suministro de gas

Los sistemas de corte con plasma pueden operar con gases inertes, de reactividad reducida, de baja reactividad, activos y con combinaciones de cualquiera de éstos. Teniendo en cuenta estas composiciones, por la utilización del gas en el proceso de corte se pueden distinguir cuatro; el primero, gas de plasma, hace referencia a los gases o una mezcla de ellos que son empleados para crear el plasma en sí, los gases que se emplean en la industria comúnmente son Argón, Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno y aire.

El segundo, gas de ignición, es el que mantiene el “quemado” del gas de plasma. El gas de corte, es el responsable de, al momento del corte, asegurar una calidad óptima. Por último, se encuentra el gas secundario o auxiliar, encierra enfriando y apretando al gas de plasma, con esto se asegura una mejor calidad en el corte además de proteger la integridad de la boquilla (Linde Specialist Plasma Arc, 2011). El suministro de gas utilizado en este estudio tiene una presión de 100 psi.

c. Corriente

Este parámetro se puede elegir dentro del rango que especifique cada equipo, el factor preponderante para la selección del valor de corriente depende del material base, la composición y espesor, generalmente, cada proveedor del equipo de corte propone sus tablas ideales de corte con valores sugeridos. Los resultados por valores bajos de corriente incurren en falta de penetración a través del espesor de la pieza de trabajo, mientras que altos valores de corriente provocan un ancho de corte excesivo, excesiva producción de escoria y una calidad de corte baja (Sharma, 2011). Para este estudio se utiliza una corriente de alimentación de 58 A y de manera operacional de 85 A y un voltaje de arco de 128 V.

d. Velocidad de corte

Esta variable medida en mm/min, corresponde a cuán rápido es el avance del arco de plasma en el proceso de corte, tiene una relación con dos variables fundamentales, la primera con el voltaje de arco, siendo ésta inversamente proporcional y, de diferente tendencia dependiendo del tipo de sistema de corte, material y espesor, forman parte de las tablas de corte que sugieren los proveedores de equipos de plasma. La segunda variable relacionada es la altura de la antorcha, se conoce que, mientras más baja sea ésta, la velocidad debe ser menor, así, con una altura superior la velocidad debe ser mayor.

Tomando en consideración la calidad de corte, existen dos tipos de escoria que aparece en el filo de corte dependiendo de los valores de velocidad de corte que se manejen; si la velocidad es alta, se forma una capa fina de escoria que se suelda en la parte inferior del filo de corte, si la velocidad es baja, escoria de tipo globular se deposita extendiéndose a lo largo del filo de corte con un ancho mayor que la escoria generada en velocidades de corte altas (Hypertherm, 2019). Se utiliza una velocidad de corte de 30 mm/s para los cortes efectuados en este estudio.

e. Altura de antorcha

Regularmente en sistemas de plasma configurados en mesas de corte, existe un sistema automático que regula la altura de la antorcha con respecto a la pieza de trabajo, conocido como THC (Torch Height Control) por sus siglas en inglés, regula esta distancia tomando el valor del voltaje de arco, entre mayor es este valor, mayor es la distancia entre la pieza y la antorcha y lo contrario si el valor disminuye, de manera que el sistema se autocorriga para lograr que la distancia sea la misma mientras ocurre el proceso de corte.

En términos generales, una distancia grande entre la antorcha y la pieza de trabajo, no permitiría una transferencia del arco adecuada lo que desemboca en un fallo de encendido, mientras que, si la distancia es pequeña el desgaste de los consumibles es mucho mayor, afectando los costos de operación (Hypertherm, 2016).

Uno de los factores que se ven afectados en términos de calidad de corte por la altura de la antorcha es el ángulo de bisel, mientras la altura de la antorcha se mantenga en valores recomendados por el fabricante este ángulo no será pronunciado tendiendo a valores cercanos a cero, si la antorcha se encuentra muy cerca de la pieza de trabajo, se genera un bisel con un ángulo negativo; si la distancia es muy grande se generará un bisel con un ángulo positivo, tal como lo ejemplifica la Figura 1.6. La altura entre la antorcha a la pieza de trabajo es 1.5 mm.

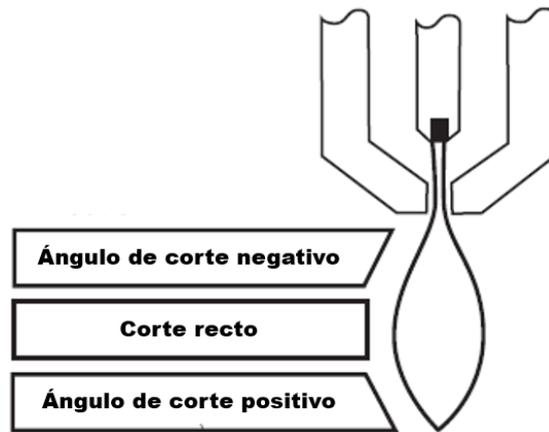


Figura 1.6. Incidencia de altura de antorcha en ángulo de bisel.

Fuente: (Hypertherm, 2019).

f. Dirección de corte

Debido a que la parte gaseosa del plasma de corte se encuentra en estado turbulento, un filo de corte siempre tendrá un bisel con un ángulo pronunciado, éste filo de corte se conoce como el “lado malo” de la pieza cortada. Para evitar que el material de trabajo tenga este bisel, la antorcha debe recorrer en la dirección correcta, correspondiente al lado derecho de la antorcha conforme se aleja hacia delante de su posición fija frente a la pieza de trabajo. La Figura 1.7. muestra la dirección de avance correcta (Hypertherm, 2019).

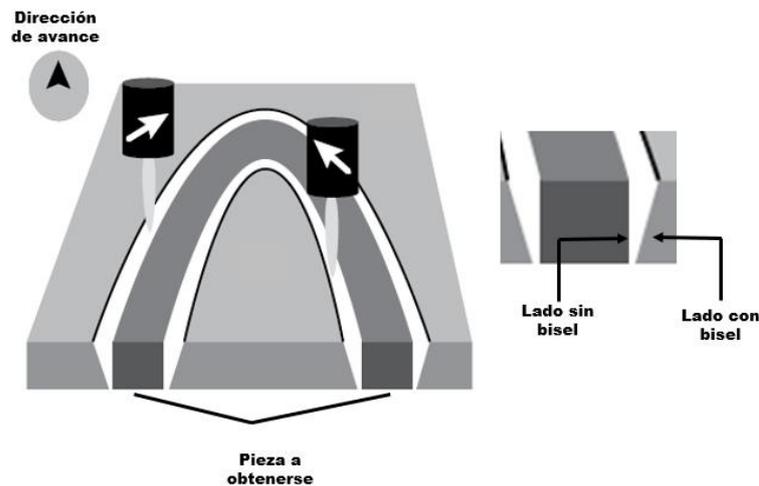


Figura 1.7. Dirección de corte con plasma.

Fuente: (Hypertherm, 2019)

g. Régimen de corte

En el caso del corte PAC, el rango que está determinado para cortar aceros de bajo carbono utilizando equipos manuales mecanizados, va desde 1 milímetro hasta 50 milímetros, con costos operativos regulares. Si se emplean equipos de corte de alta definición, se pueden cortar espesores de hasta 200 milímetros, con una corriente de salida de 800 A, sin embargo, la inversión en el equipo es muy elevada. Además de las condiciones mencionadas anteriormente, como condiciones límites primordiales tenemos la velocidad de corte donde se debe conseguir la máxima producción y el menor desgaste de la herramienta, donde para efectos de este estudio se utilizó aproximadamente 30 mm/s, condiciones brindadas por el manual del operador. La fuente de energía es un transformador trifásico, por lo que la tensión en vacío será de 10 a 400 voltios. Los parámetros que complementan esta información se encuentran mencionados en los literales que anteceden.

h. Materiales y espesores que se pueden cortar con arco plasma

La versatilidad que tiene el proceso PAC para cortar materiales, va desde las aleaciones ferrosas como no ferrosas, incluyendo a los aceros inoxidable. Es uno de los procesos más eficientes si se considera cortar varios materiales.

Los espesores que se pueden cortar en los materiales mencionados, dependen del equipo y sus características, donde va desde 1 mm hasta 50 mm, con una cortadora de plasma normal, mientras si se dispone de equipos de alta definición se pueden cortar hasta 200 mm de espesor.

i. Alcances del proceso de corte por plasma

En el corte por arco plasma se presenta un espectro de aplicación sobre materiales más amplio a diferencia de los otros procesos de corte. Si bien la inversión inicial es considerable, el costo operativo es inferior en comparación al oxicorte. En este proceso existe facilidad y rapidez en su operación, dejando como resultado un acabo prácticamente definitivo. Lo destacado de este proceso es la versatilidad para cortar metales de espesores delgados, manteniendo sus bordes bien definidos.

j. Limitaciones del proceso de corte por plasma

En el proceso de corte con plasma, un aspecto que resulta desfavorable es que existe un rango limitado de espesores donde la inversión del equipo se justifica, para espesores mayores, el costo del equipo de corte es muy elevado. Por otro lado, uno de los aspectos desfavorables en una operación de corte bajo este proceso, es la generación de bisel en

el filo de corte, existen alternativas para la disminución de este efecto, pero que requieren una mayor inversión.

1.3. Corte por Electrohilo (WEDM)

WEDM, Wire Electrical Discharge Machining por sus siglas en inglés, es un proceso termoeléctrico de corte sin contacto directo, en el cual, el material base que cuenta con la característica de conducir la electricidad, es erosionado por una serie de chispas generadas entre éste y el electrodo denominado hilo, que se desplaza mediante el seguimiento de coordenadas en x y y a través de comando CNC, funde y vaporiza las partículas del material a nivel microscópico (Sommer, 2012). El esquema de funcionamiento descrito para el corte WEDM se muestra en la Figura 1.8.

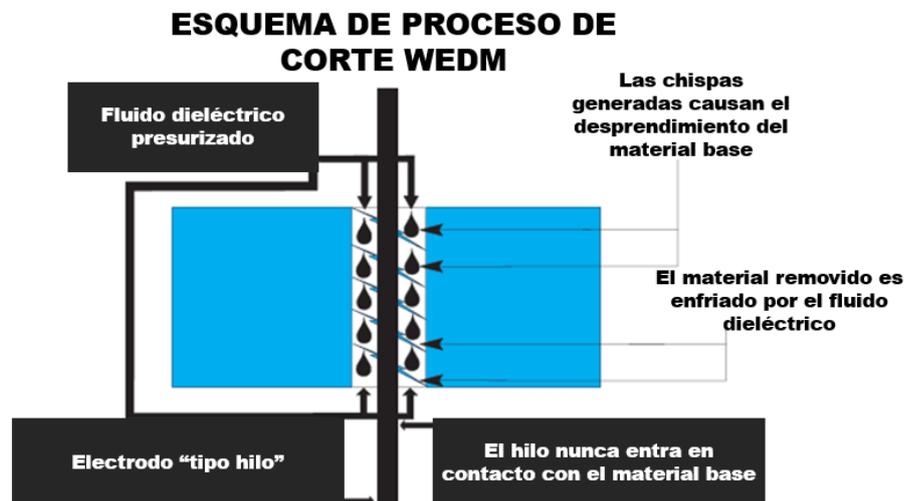


Figura 1.8. Esquema proceso WEDM.

Fuente: (Sommer, 2012)

1.3.1. Generación y función de chispas controladas en el proceso WEDM

Como en cualquier proceso de corte, en WEDM existe la remoción de material, para este proceso, las partículas del material base son removidas a través de la generación de chispas controladas. Estas chispas controladas que se crean entre el hilo y el material base son producidas mediante pulsos de corriente en una onda cuadrada modulada generada por una fuente de energía eléctrica que dispone de un inversor, dentro de esta brecha o "gap" que existe entre el material base y el electrodo, fluye el líquido dieléctrico que, cuando se alcanza un voltaje determinado, se ioniza consiguiendo que estas chispas controladas erosionen una pequeña sección del material causando que se funda y vaporice,

procedimiento que se repite miles de veces por segundo, este fluido que sale a presión a través de una bomba también tiene la función refrigerar las partículas del material base vaporizadas forzando a una resolidificación y posterior evacuación de las mismas (Sommer, 2012).

En la Figura 1.9. se muestra el esquema de los elementos involucrados en el proceso descrito.

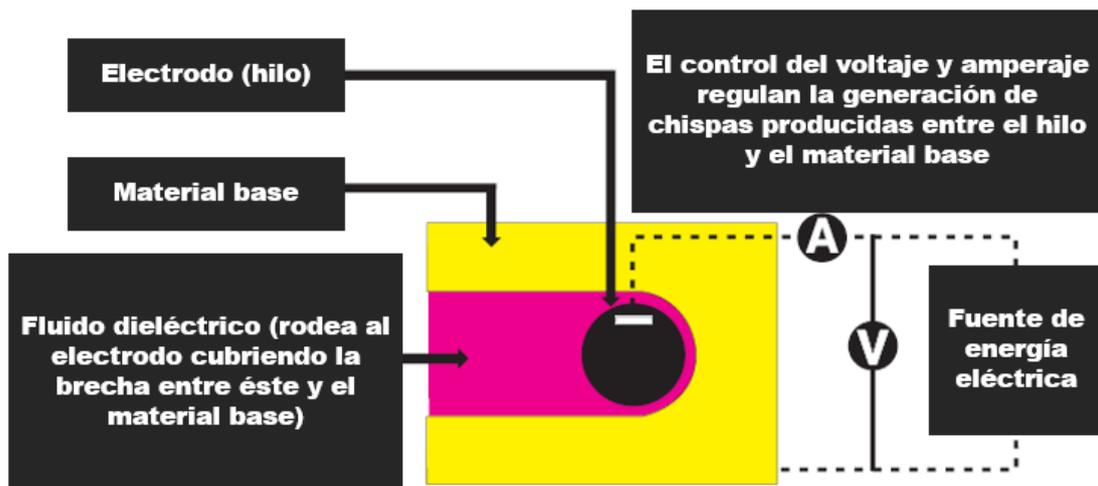


Figura 1.9. Esquema interacciones en proceso WEDM.

Fuente: (Sommer, 2012).

Debido a que la energía es transmitida mediante una onda cuadrada simple, tomando dos valores posibles; cero y el voltaje de la señal correspondiente, por lo que, existen dos escenarios durante el proceso de corte en la interacción entre el material base, el electrodo y las chispas generadas. El primero, cuando el valor del voltaje es diferente de cero, conocido como “pulso on time”, donde el fluido dieléctrico poco antes generada la corriente se comporta como resistor, una vez que la corriente actúa, el fluido se ioniza transportando las chispas que erosionan el material tal como se observa en la Figura 1.10.

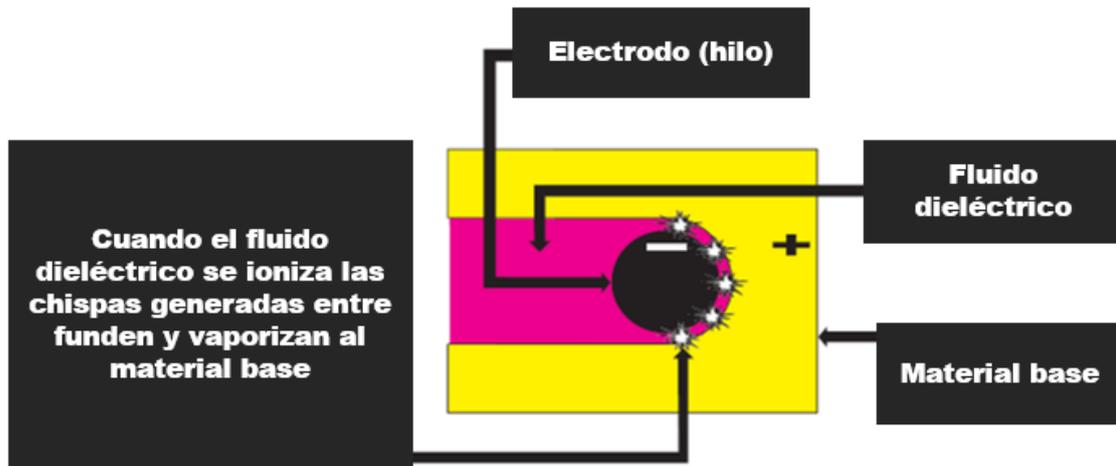


Figura 1.10. Proceso de corte con WEDM durante “pulso on time”.

Fuente: (Sommer, 2012).

En el segundo escenario, cuando el valor del voltaje cambia a cero, “pulso off time”, una vez que las chispas controladas desprenden el material base, la generación se suspende, el fluido dieléctrico actúa como refrigerante enfriando las partículas desprendidas, por último, el fluido retira estas partículas, en su paso se encuentra un filtro que retiene a estas partículas para que el fluido dieléctrico no se contamine y pueda seguir recirculando (Sommer, 2012). En la Figura 1.11. se observa un esquema explicativo del proceso de corte durante el “pulso off time”.

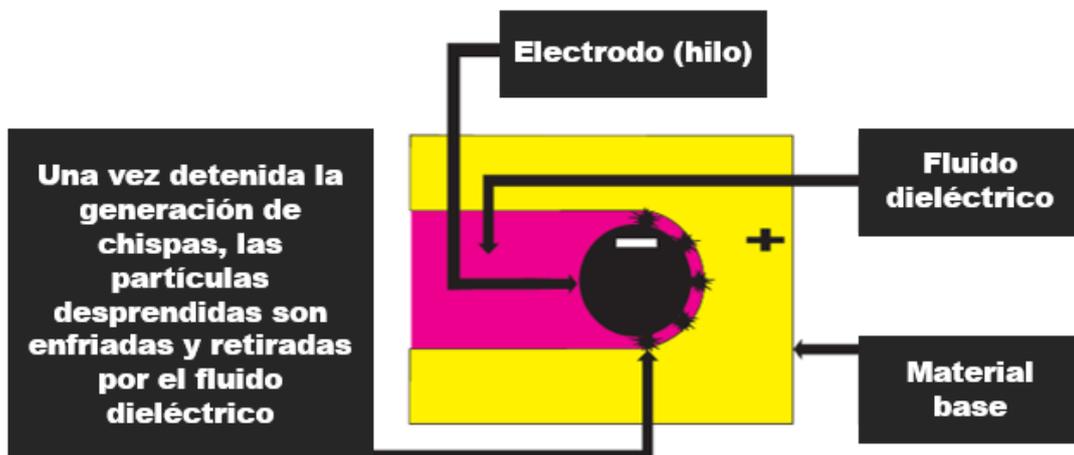


Figura 1.11. Proceso de corte con WEDM durante “pulso off time”.

Fuente: (Sommer, 2012).

Dentro del proceso de corte WEDM, los parámetros que permiten medir el desempeño del corte en sí, tales como la tasa de remoción de material, la rugosidad superficial, el ancho

de corte, entre otros, dependen de las variables de entrada del proceso (Patel & Maniya, 2018). En la Figura 1.12. se muestra una clasificación de estas variables.

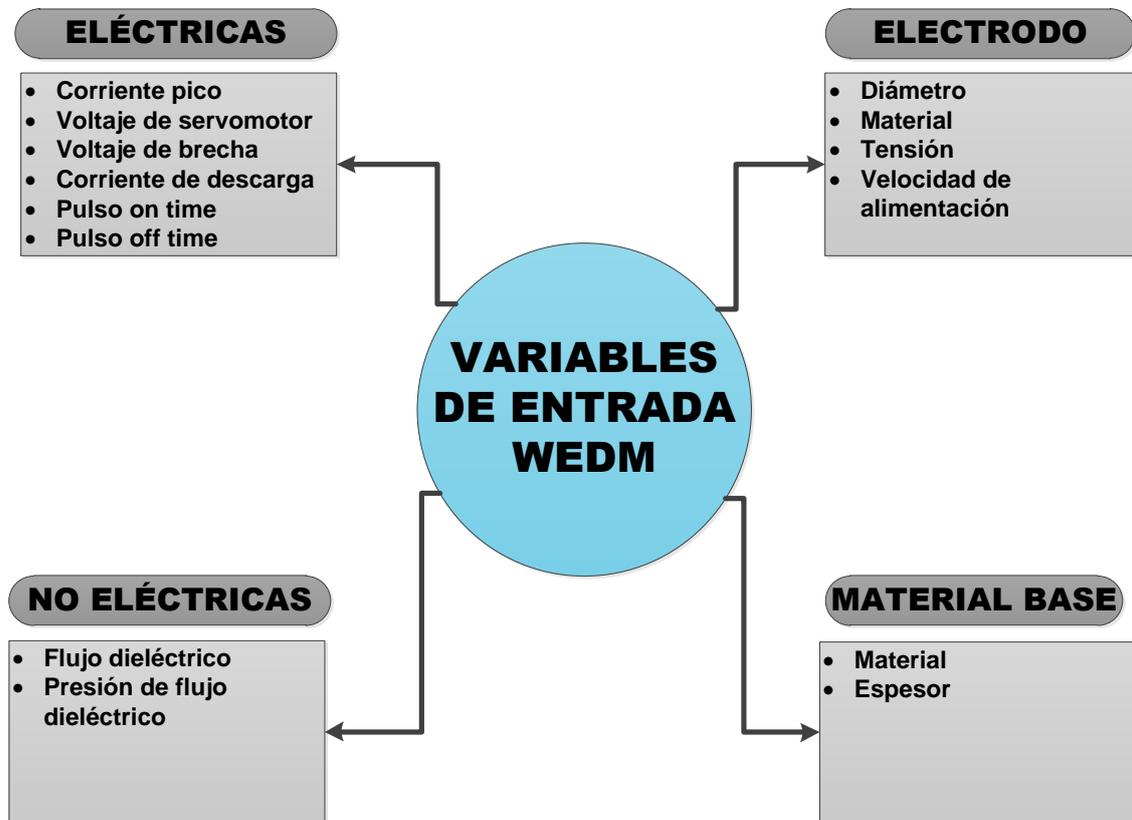


Figura 1.12. Variables de entrada para el proceso de electrohilo.

Fuente: (Patel & Maniya, 2018).

Dentro de esta clasificación, las variables cuyos valores son de mayor relevancia y que tienen mayor influencia en las condiciones finales en las que el material cortado por electrohilo obtiene, así como del desempeño del proceso se describen a continuación.

a. Corriente de descarga

El valor de esta variable corresponde a la corriente aplicada al electrodo durante el pulso on time. Es una de las variables más críticas en el proceso conjuntamente con el tiempo de descarga y el voltaje. En este estudio se utiliza una corriente de 5 A.

b. Corriente pico

Durante cada pulso on-time la corriente va aumentando hasta alcanzar un valor preestablecido, este valor es conocido como la corriente pico. Valores altos de corriente son utilizados en materiales de alta dureza, durante la generación de cavidades y detalles en superficies extensas, además, la tasa de remoción de material aumenta mientras que

la rugosidad superficial se ve afectada. Para propósito de este estudio se utiliza una corriente pico de 7 A.

c. Voltaje de servomotor

Este voltaje de señal sirve comandar al motor que tiene como función controlar los movimientos de avance del electrodo. Cuando el voltaje que produce la chispa es mayor que el voltaje de servomotor el electrodo avanza, cuando ocurre el escenario contrario el electrodo retrocede. Cuando se configura el este valor de voltaje, mientras más pequeña es la cantidad menor es la brecha entre el electrodo y la pieza, esto se traduce en una mayor incidencia de las chispas generadas sobre el material base, lo cual aumenta la tasa de remoción del material, sin embargo, aumenta la posibilidad de que el hilo se rompa. Se utiliza un voltaje de alimentación de 220 V.

d. Voltaje de brecha

Este es el voltaje que se aplica entre el electrodo y el material base, si este valor aumenta mayor será la descarga eléctrica que genera las chispas. Para propósitos de este estudio se utiliza un voltaje pico de chispa de brecha de 40 V.

e. Pulso on time

Corresponde al tiempo medido en microsegundos donde la corriente es aplicada al electrodo durante el ciclo de corte. La cantidad de material removido es directamente proporcional a la cantidad de energía aplicada, por lo que se debe considerar que existe también una mayor aportación de calor al material base. Otra consecuencia de tener periodos de pulso on time más prolongados es una tasa de remoción de material más alta. En este estudio, al realizar los cortes, el pulso on time utilizado es 6 μ s.

f. Pulso off time

Corresponde al intervalo de tiempo que existe entre dos descargas, expresado en microsegundos, es decir, es el tiempo de pausa entre descargas, durante este lapso de tiempo, el material removido se solidifica y es desplazado por el flujo dieléctrico antes de que ocurra la siguiente descarga eléctrica. Si este intervalo de tiempo es corto, existirá una mayor cantidad descargas dentro de un tiempo determinado, lo cual aumentaría la eficiencia del corte, sin embargo, reducir el tiempo de pulso off time puede provocar una sobrecarga en el hilo, causando que se rompa, por otro lado, no existiría tiempo suficiente para evacuar las partículas removidas antes de la siguiente descarga. Para efectos de este estudio, el pulso off time usado es 12 μ s.

g. Velocidad de alimentación de electrodo

Esta variable indica la velocidad a la que el electrodo se desplaza a través de su guía o polea. En este proceso de corte este tipo de electrodo ocupa alrededor del 70 % de los costos de maquinado; debido a esto, se debe configurar bajos valores de velocidad de alimentación, así se reduce el consumo del hilo, siempre y cuando la velocidad de avance de corte no tenga valores elevados ya que causaría su rotura. La velocidad de alimentación en este estudio es 5 mm/min.

h. Tensión del electrodo

Es de suma importancia que la tensión del hilo sea lo suficientemente alta para asegurar que éste se mantenga recto, se reduzca la vibración, no genere bisel en el material cortado y no incremente el ancho de corte. Por otro lado, si la tensión del hilo sobrepasa el límite superior recomendado por el fabricante, existiría el riesgo de rotura. Para efectos de este estudio la tensión de hilo es de 11 N.

i. Presión de flujo dieléctrico

Es la presión que ejerce la bomba que impulsa al fluido dieléctrico a salir por las boquillas inferior y superior con el objetivo de realizar sus funciones de refrigeración y evacuación de partículas desprendidas por el proceso de corte (S. Alsoufi & K. Suker, 2018). La presión de bombeo de flujo dieléctrico utilizada en este estudio es de 3 kgf/cm².

k. Régimen de corte

Además de los puntos mencionados anteriormente, en el proceso de corte con electrohilo, los espesores que se pueden cortar, dependen de la configuración de la máquina empleada, la distancia entre la polea superior e inferior conjuntamente con el material del hilo, entre otros parámetros seteados, definen el espesor que se puede alcanzar. En equipos convencionales, el rango va de 1 mm hasta 300 mm. Sin embargo, el ancho de corte KERF obtenido en este estudio es 0,20 mm, donde se aplica una velocidad de corte de 8 mm/s. El hilo empleado es de tungsteno con una composición de 70% W y 30 % Cu, de 0.18 mm de diámetro. Este proceso generalmente implica el uso de un fluido dieléctrico como es un aceite de corte de composición general.

l. Materiales y espesores que se pueden cortar con electrohilo

Con el proceso de corte WEDM, se pueden cortar todos los metales que sean eléctricamente conductores, sin restricción por temas de alta dureza, como metales, aleaciones metálicas, grafito, entre otros. Con esta condición se puede mencionar

espesores cortados desde 1 mm hasta 300 mm, donde el acabado superficial tras el corte es definitiva y se sobrepone ante cualquier proceso de corte térmico.

m. Alcances del proceso de corte por electrohilo

La principal ventaja del proceso de corte por electroerosión por hilo es la alta precisión que representa en el acabado superficial de la pieza, la cual implica que no sea necesario un proceso posterior de rectificación. Además de su versatilidad en los materiales que pueden ser cortados, existe la estabilidad que presenta este proceso en el corte de estos materiales, debido a la generación de pulsos por el circuito oscilador regido por el circuito integrado. Este proceso presenta un mínimo de escoria tras el maquinado, en comparación a los otros procesos en los cuales se desperdicia material. Este proceso puede lograr formas complejas en su maquinado, incluso mecanizando materiales previamente templados y evitando deformaciones después de terminada la pieza.

n. Limitaciones del proceso de corte por electrohilo

En el corte WEDM, la principal limitante es el tiempo de operación, pese a ser uno de los más precisos, el tiempo que tarda en separar el material disminuye notablemente su productividad. Se puede añadir, además, el costo de inversión elevado.

2. METODOLOGÍA

En la industria manufacturera y metalmecánica, prevalecen como procesos fundamentales los procesos de corte para la separación de metales. Estos procesos se fundamentan en el corte térmico. Si bien la adición de calor es la que permite que el metal se separe, también, existen efectos adversos que afectan al metal cortado, esta afectación, se da a nivel microestructural, provocando variaciones en las propiedades mecánicas que condicionan la aplicación del material, su vida útil y desempeño.

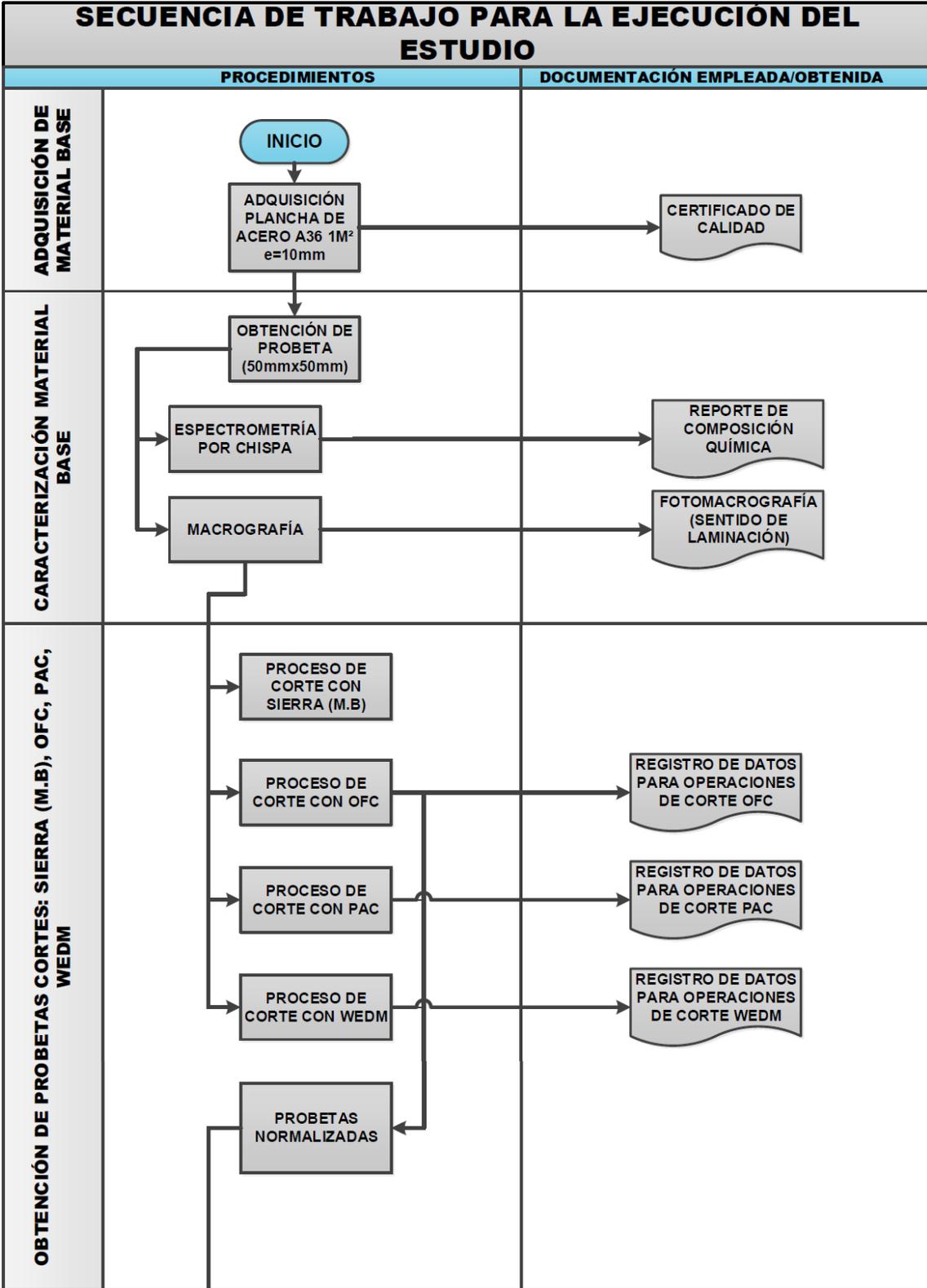
En el país, el metal más utilizado en estas industrias es el acero, con un consumo promedio mensual de 65 mil toneladas en planchas en 2018 (ALACERO, 2018). De esta cifra, el de mayor consumo es el acero AISI 1010, motivo por el cual, es el material escogido para realizar este estudio.

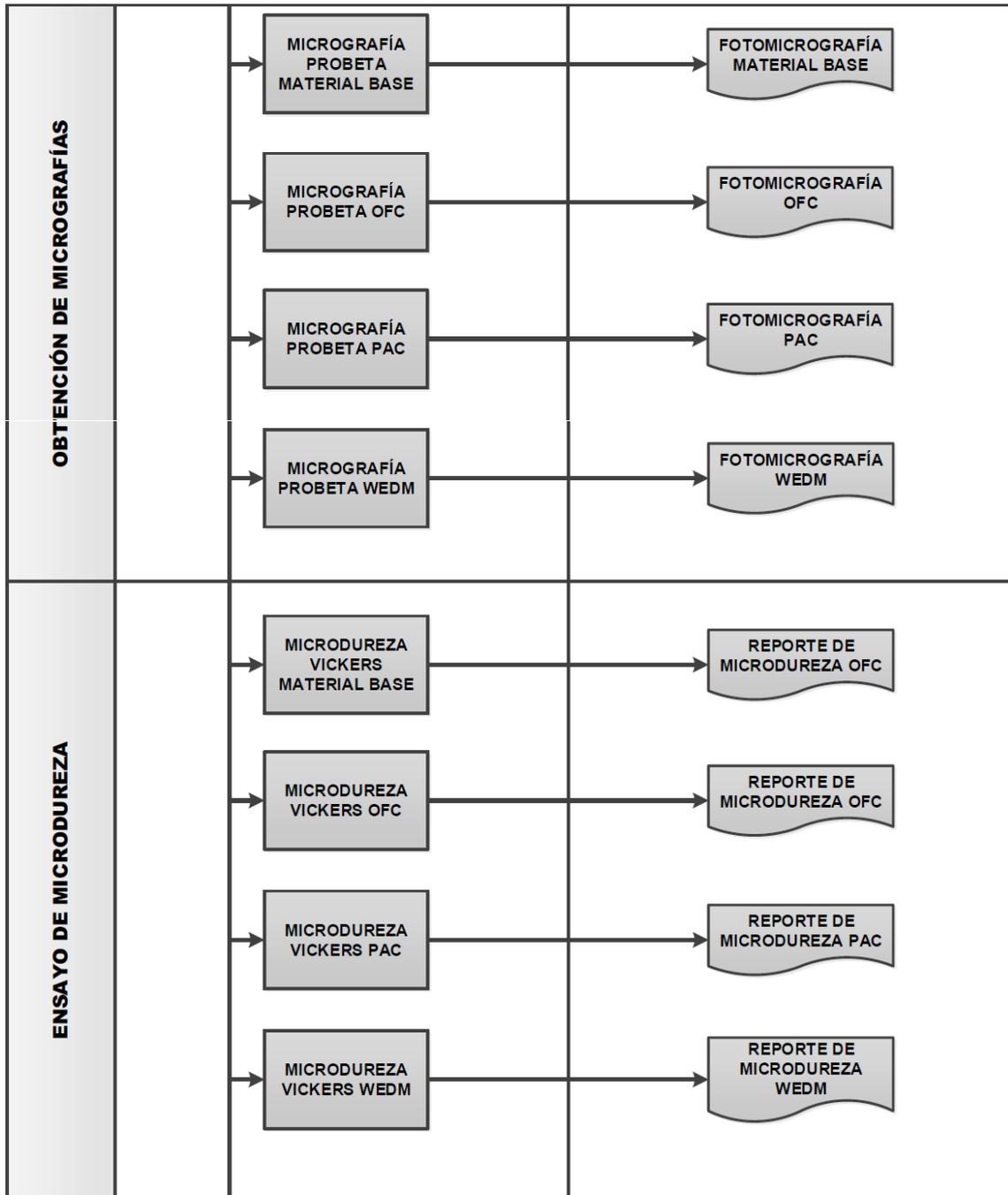
Se adquirió a la empresa Dismetel S.A, una plancha de acero AISI 1010 laminado en caliente, de 1 metro por 1 metro, con un espesor de 10mm, teniendo en cuenta que esta última dimensión no condiciona a ninguno de los tres procesos de corte involucrados en este estudio. Con el material a disposición, el primer procedimiento que se realizó fue extraer una primera probeta para la determinación de la composición química del acero, así como también una macrografía para garantizar que se tratase de un acero laminado en caliente y determinar el sentido de laminación al haber observado la huella que dejan los rodillos laminadores, para la extracción de las siguientes probetas.

Una vez determinados los ensayos necesarios para la obtención de la información requerida, para evaluar los cambios ocurridos en el acero tras los procesos de corte OFC, PAC y WEDM, se dimensionaron las probetas y la cantidad a obtenerse, bajo las normas empleadas. Los cortes fueron llevados a cabo para OFC, PAC y WEDM en las entidades y empresas EPN, Seblan y ATI respectivamente, debidamente documentados.

Se ejecutaron los diferentes ensayos para la obtención de micrografías, determinación de microdureza, resistencia a la tracción entre otras características relevantes para el estudio.

La descripción detallada de las etapas que fueron desarrolladas, se encuentran en los puntos subsiguientes, sin embargo, una secuencia resumida del trabajo realizado se presenta en la Figura 2.1. a continuación.





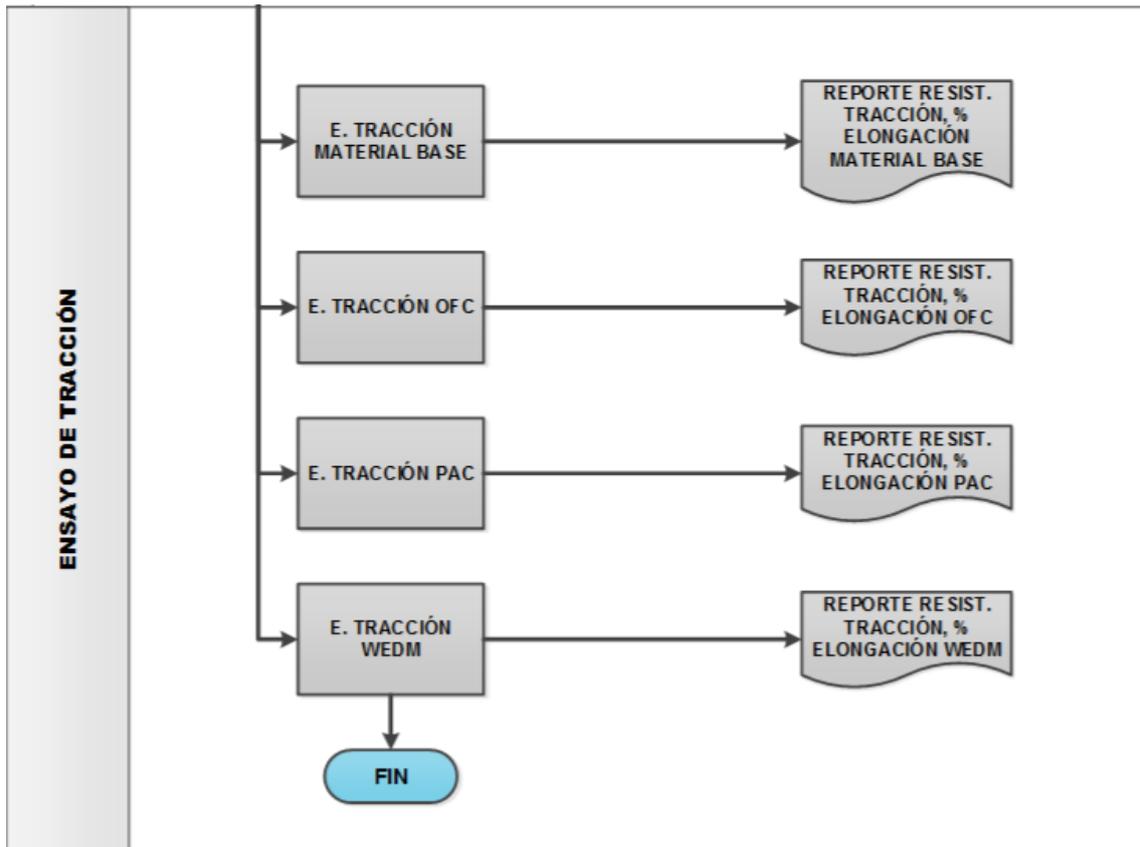


Figura 2.1. Secuencia de Trabajo para la ejecución del Estudio “Análisis comparativo de procesos de corte OFC, PAC, WEDM, en probetas de acero de bajo carbono”.

(Fuente: Propia)

2.1. Adquisición material base

Con el resultado de la investigación bibliográfica, se observó que el material más consumido por las industrias manufactureras y metalmeccánicas es el acero de bajo carbono, por lo tanto, se procedió a realizar la compra de una plancha de acero A36 laminada en caliente, de procedencia China, a la empresa Dismetel S.A. En la Figura 2.2. se observa la plancha adquirida.



Figura 2.2. Plancha de acero AISI 1010 de bajo contenido de carbono adquirida.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.1. se observan las dimensiones, mientras que en el ANEXO I, se encuentra el certificado de calidad entregado por parte del proveedor.

Tabla 2.1. Dimensiones de plancha adquirida.

| | |
|-----------------------|---|
| Material base: | Acero A36 Laminado en caliente |
| Dimensiones | Valor |
| Largo de plancha | 1 m |
| Ancho de plancha | 1 m |
| Espesor de plancha | 0,01 m |

(Fuente: Propia)

2.2. Caracterización preliminar de material base

Para la realización de los cortes con los procesos establecidos en este estudio, obteniendo las probetas necesarias para el desarrollo del análisis comparativo pertinente, se caracterizó previamente al material base. Este procedimiento constó, en primer lugar, con la determinación de la composición química del acero, a través de espectrometría por chispa. Por otro lado, se realizó una micrografía donde se corroboró el proceso de manufactura del acero, laminación en caliente, además de la visualización del sentido de laminación. Estos dos procedimientos se describen en los puntos subsiguientes.

2.2.1. Espectrometría por chispa

Se obtuvo la muestra representativa M1, sección de plancha cortada con Disco Abrasivo de dimensiones 0,05 m por 0,05 m. Seguidamente, se realizó la limpieza superficial de la muestra M1, según la norma ASTM E415 -17 (ASTM, 2017b).

Para el análisis de espectrometría por chispa, se empleó el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2-ION, según el método Fe-110 Low Alloy. Para el análisis, se calibró el espectrómetro y se tomaron cuatro mediciones en distintos puntos del espécimen, puntos definidos con el fin de abarcar la mayoría de superficie de la muestra.

Los valores resultantes obtenidos para cada elemento presente en la muestra se pueden observar en el ANEXO II, y son el promedio de los valores de los cuatro puntos definidos anteriormente.

2.2.2. Micrografía del Material Base

Con el objetivo de visualizar las características estructurales, el sentido de laminación de la plancha de acero y determinar la dirección de los procesos de corte que son parte de este estudio, se extrajeron dos muestras representativas mediante corte con sierra manual, de 0,25 m de sección y 0,13 m de altura, como se indica en la Figura 2.3.

De estas dos muestras, una se evaluó para el sentido transversal y otra para el sentido longitudinal respecto a la supuesta dirección de laminación estimada visualmente. Este proceso de corte se lo realizó en frío, con sierra manual, para evitar transformaciones estructurales del material.



Figura 2.3. Extracción de las muestras representativas para la caracterización del material base.

(Fuente: Propia)

A continuación, cómo se indica en la Figura 2.4. se preparó cada muestra mediante diferentes tipos de desbaste, pulido y ataque químico, procedimientos que se detallan en la sección 2.4.1. preparación y montaje de las probetas.

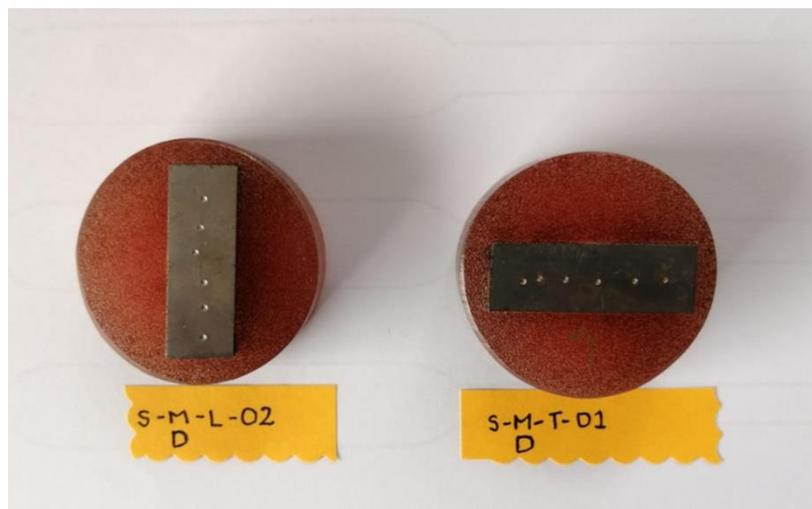


Figura 2.4. Preparación y Montaje de las probetas que caracterizan el material base.

(Fuente: Propia)

Con las probetas resultantes de esta interacción de procedimientos, se procedió a evaluar su estructura utilizando el microscopio metalográfico. Para efectuar esta aplicación se contó con los lentes objetivos de 100X y 500X, dando como resultado la foto-micrografía transversal y longitudinal, que caracterizan al material base.

2.3. Obtención de probetas

Previamente a la realización de los cortes mediante los procesos que forman parte de este estudio, y los cortes con procesos secundarios para la obtención de las probetas para evaluación comparativa, con el material base, se establecieron las dimensiones de las probetas, de acuerdo a la sección de espécimen de las normas que fueron seleccionadas para realizar los ensayos establecidos. La Tabla 2.2. resume esta información.

Tabla 2.2. Resumen de probetas obtenidas para los ensayos de tracción, metalografía y microdureza.

| Norma | Cantidad | Esquema [mm] |
|--|---------------------------|--------------|
| ASTM E8/E8M-16a Norma para la realización de ensayos de tracción en materiales metálicos | Sierra (material base): 2 | |
| | OFC: 2 | |
| | PAC: 2 | |
| | WEDM: 2 | |
| ASTM E3-11 Norma para la preparación de probetas para metalografías | Sierra (material base): 2 | |
| | OFC: 2 | |
| | PAC: 2 | |
| | WEDM: 2 | |
| ASTM E92-17 Norma para la realización de ensayos de dureza Vickers y Knoop en materiales metálicos | Sierra (material base): 2 | |
| | OFC: 1 | |
| | PAC: 1 | |
| | WEDM: 1 | |

(Fuente: Propia)

a. Designación de las probetas

Como se observa en la Figura 2.5. se designó las probetas dependiendo del proceso de corte aplicado, el ensayo asociado, el sentido de obtención de la muestra y la secuencia de ejecución del proceso. Además, en la Tabla 2.3. se indica la nomenclatura específica utilizada para cada probeta.

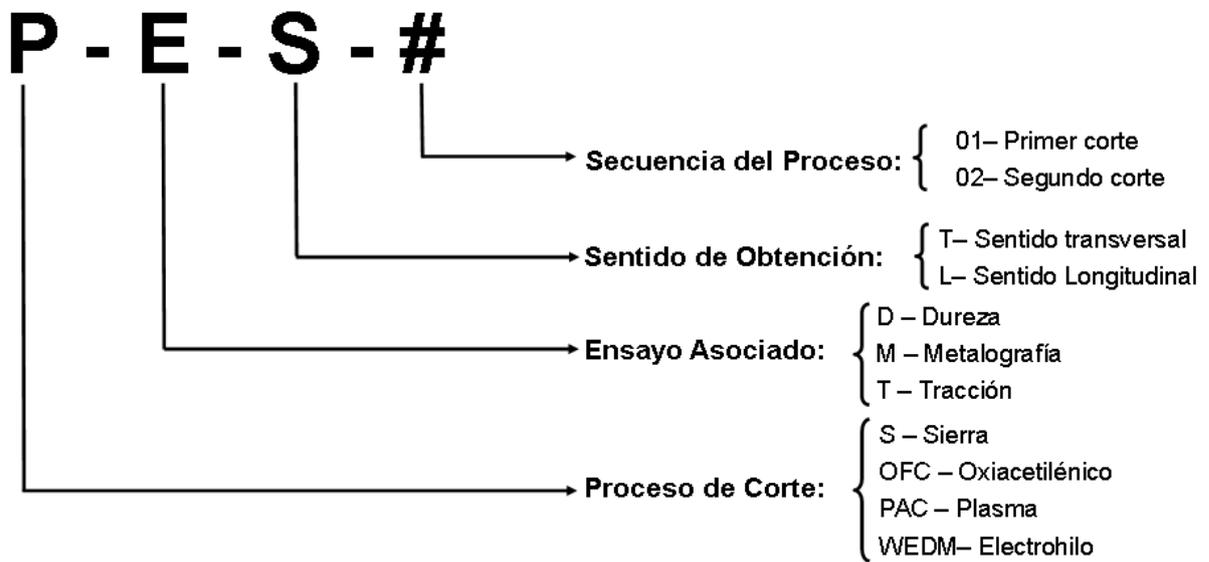


Figura 2.5. Designación de la nomenclatura de las probetas.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.3. Nomenclatura de las probetas utilizadas para el estudio.

| Tipo de probeta | Proceso de corte | Nomenclatura |
|----------------------------------|------------------------|--------------|
| Probetas para ensayo de tracción | Sierra (Material base) | S-T-L-01 |
| | | S-T-L-02 |
| | OFC | OFC-T-L-01 |
| | | OFC-T-L-02 |
| | PAC | PAC-T-L-01 |
| | | PAC-T-L-02 |
| | WEDM | WEDM-T-L-01 |
| | | WEDM-T-L-02 |

| | | |
|---|------------------------|-------------|
| Probetas para análisis metalográfico | Sierra (Material base) | S-M-T-01 |
| | | S-M-L-02 |
| | OFC | OFC-M-T-01 |
| | | OFC-M-L-02 |
| | PAC | PAC-M-T-01 |
| | | PAC-M-L-02 |
| | WEDM | WEDM-M-T-01 |
| | | WEDM-M-L-02 |
| Probetas para ensayo el dureza | Sierra (Material base) | S-D-T-01 |
| | Sierra (Material base) | S-D-L-02 |
| | OFC | OFC-D-T-01 |
| | PAC | PAC-D-T-01 |
| | WEDM | WEDM-D-T-01 |

(Fuente: Propia)

Para la ejecución de los cortes con los procesos OFC, PAC y WEDM, se estructuró una secuencia de actividades, con el objetivo de organizar sistemáticamente cada corte y obtener la información relevante de los mismos. El esquema de la Figura 2.6. muestra esta secuencia.

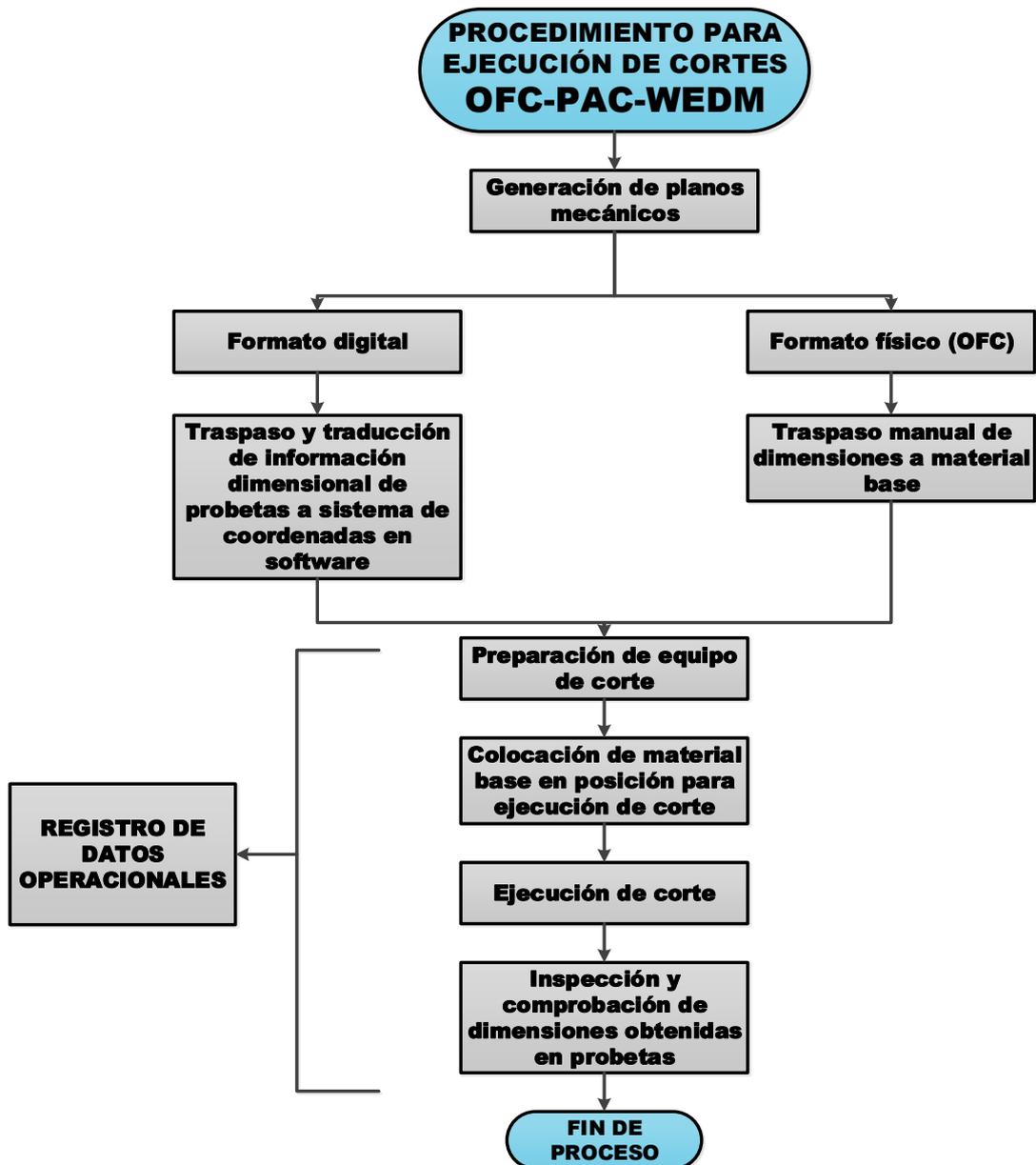


Figura 2.6. Esquema de procedimiento para ejecución de cortes OFC, PAC y WEDM.

(Fuente: Propia)

2.3.1. Obtención de probetas con sierra

Para la determinación a nivel cualitativo y cuantitativo de la incidencia sobre las propiedades originales del material base, ante la aplicación de los procesos de corte OFC, PAC y WEDM, fue necesario extraer mediante métodos de corte en frío, probetas tanto para la realización de los ensayos de tracción, dureza como para el análisis metalográfico efectuado.

Para la obtención de las probetas de tracción se realizó previamente cortes secundarios en una sierra industrial alternativa o de vaivén, como se observa en la Figura 2.7.



Figura 2.7. Ejecución de cortes secundarios en sierra industrial alternativa.

(Fuente: Propia)

Una vez obtenidas las secciones de plancha, a raíz de los cortes secundarios, se procedió a dibujar la geometría de las probetas establecida por la norma ASTM- E8, para seguidamente maquinar estas dimensiones mediante una fresadora universal. El resultado son las probetas S-T-L-01 y S-T-L-02.

A continuación, se realizaron las probetas pertenecientes al ensayo de metalografía y dureza, donde sus dimensiones son establecidas en las normas ASTM E 3-11 y ASTM E 92-17 respectivamente. Para esta aplicación se utilizó como herramienta una sierra manual y se obtuvieron las probetas S-M-T-01, S-M-L-02, S-D-T-01 y S-D-L-02.

2.3.2. Obtención de probetas con proceso OFC

El proceso de corte con gas oxcombustible se realizó en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, donde se empleó el equipo que se describe a continuación.

a. Equipo de corte con gas oxicombustible

El equipo utilizado consta principalmente de un Tanque de Oxígeno (O₂) - 99% gas, suministrado por la empresa ENOX S.A., y un Tanque de Acetileno 99.1% (C₂ H₂), suministrado por la empresa LINDE S.A., que es el combustible empleado para el proceso de corte, como se observa en la Figura 2.8.



Figura 2.8. Tanque de Oxígeno y Acetileno suministrados en proceso de OFC.

(Fuente: Propia)

Por otro lado se encuentran las mangueras, conexiones, reguladores de presión, manómetros, válvulas de seguridad, soplete y boquilla de 2 mm, como se observa en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Manómetros, soplete y boquilla usados en proceso de OFC.
(Fuente: Propia)

La información a detalle del equipo de corte con gas oxiacetilénico y sus componentes, consta en las Secciones I y II del registro de datos de operaciones de corte OFC mostrado en el ANEXO III.

Previstas las características del equipo, se dio paso a las operaciones de corte para obtener las probetas OFC-T-L-01, OFC-T-L-02, OFC-M-T-01, OFC-M-L-02 y OFC-D-T-01.

Mientras los procesos de corte se llevaron a cabo, paralelamente, se tomaron todos los datos relevantes de las operaciones efectuadas que fueron documentados en los registros de datos de operaciones de corte OFC para cada probeta obtenida, registros que constan en el ANEXO III y que describen el proceso de manera cuantitativa.

La descripción cualitativa de la operación de corte efectuada se expone a continuación.

b. Operación de corte

Para dar inicio al proceso de oxicorte, se procedió a encender la llama utilizando un encendedor de fricción con el fin de regular una llama neutra, 50% de oxígeno y 50 % de acetileno. Con esta llama se realizó un corto precalentamiento del borde de corte y seguidamente se presionó el gatillo del oxígeno a alta presión para realizar el corte hasta desprender la pieza.

Para verificar la pieza cortada, se esperó que la misma se enfríe a temperatura ambiente, donde posteriormente se evaluó que no presente acumulación de escoria en las dimensiones definidas de las probetas.

Finalizado el proceso se apagó la llama, cerrando la válvula del tanque de acetileno y del tanque de oxígeno. También se purgó los gases de los instrumentos y se desmontó el equipo de oxicorte.

2.3.3. Obtención de probetas con proceso PAC

El proceso de corte con arco de plasma, se llevó a cabo empleando el equipo de corte que dispone la empresa Seblan Cia. Ltda., equipo que se detalla brevemente a continuación.

a. Equipo de corte con plasma

Se empleó un equipo de plasma Hypertherm Powermax 85, mostrado en la Figura 2.10. montado en una mesa de corte Steel Tailor Smart II, equipada con la interfaz necesaria para transmitir la información enviada por el software FastCAM.



Figura 2.10. Equipo de plasma Hypertherm Powermax 85.

(Fuente: Propia)

La antorcha de corte montada en el carro de antorchas, corresponde a la Duramax 180, representada en la Figura 2.11. equipada con sus respectivos consumibles.



Figura 2.11. Antorcha de corte Duramax 85.

(Fuente: Hypertherm, 2018)

Además, el equipo de corte contaba con sistema de control de altura THC, tal como se muestra en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Control de altura THC.
(Fuente: Hypertherm, 2018)

La información a detalle del equipo de corte con plasma y sus componentes, consta en las secciones I y II del registro de datos de operaciones de corte PAC mostrado en el ANEXO III. El equipo completo se puede observar en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Mesa de corte por Plasma (PAC).
(Fuente: Propia)

Conocidas y recopiladas las características del equipo, se dio paso a las operaciones de corte para obtener las probetas PAC-T-L-01, PAC-T-L-02, PAC-M-T-01, PAC-M-L-02 y PAC-D-T-01.

Mientras los procesos de corte se llevaron a cabo, paralelamente, se tomaron todos los datos relevantes de las operaciones efectuadas que fueron documentados en los registros de datos de operaciones de corte PAC para cada probeta obtenida, registros que constan en el ANEXO III y que describen el proceso de manera cuantitativa.

La descripción cualitativa de la operación de corte efectuada se expone a continuación.

b. Operación de corte

Para dar inicio a la operación de corte realizada para las probetas establecidas, como primer paso, se ingresó la información en formato digital correspondiente a las dimensiones de las piezas a ser obtenidas, el software del equipo CNC de la mesa de corte FastCAM tradujo la información contenida en los planos mecánicos, a código G3 para direccionar la antorcha de corte. Seguido de esto, una vez que el flujo de aire ingresó al sistema de corte, se revisó en el manómetro, que la presión a la cual se encontraba, fuese la adecuada para efectuar las operaciones.

Para las operaciones de corte realizadas, se emplearon tanto boquilla como electrodo nuevos, por lo que fue necesario desensamblar la antorcha de corte para reemplazar estos consumibles. Una vez rearmada, fue colocada nuevamente en el carro de antorchas. Después, se montó al material base sobre la mesa de corte, con la ayuda del software CNC de ésta, se fijó el punto de partida para realizar la perforación inicial.

En el equipo de plasma, se fijó el valor de la corriente correspondiente a 85 A. Para la regulación de la altura inicial de perforación, la antorcha hizo contacto con la pieza de trabajo, con el contacto óhmico se cerró el circuito que transmitió una señal al equipo para fijar esta distancia, se encendió el arco piloto, mientras que en el control de altura (THC), se reguló el voltaje de arco para fijar la altura de la antorcha con respecto a la plancha para ejecutar el corte. Luego de esto, el equipo de plasma desactivó el arco piloto para dar lugar a la activación del arco de plasma con el cual se efectuaron las diferentes operaciones de cortes necesarias.

2.3.4. Obtención de probetas con proceso WEDM

Las operaciones de corte empleando WEDM, se llevó a cabo con el equipo que dispone la empresa ATI S.A, el cual, se detalla brevemente a continuación, mientras que, en las Secciones I y II del registro de datos de operaciones de corte WEDM perteneciente al ANEXO III, se detallan las especificaciones técnicas.

a. Equipo de corte con Electrohilo

El equipo utilizado fue el cortador múltiple CNC de Electrohilo Gold San modelo 5063T6H50, de procedencia china, equipada con su panel de control y pantalla de visualización, el bloque para la montura de la pieza a trabajar, un chiller para mantener la temperatura del líquido refrigerante necesaria durante la operación de corte y una bomba que impulsa este líquido. En la imagen de la Figura 2.14. se indica el equipo de corte mencionado.



Figura 2.14. Equipo de corte WEDM Gold San.
(Fuente: Propia)

Para la ejecución del corte WEDM, el consumible principal corresponde al hilo. El hilo empleado para las diferentes operaciones de corte ejecutadas fue el A28-19, un cable compuesto por 70 % Tungsteno y un restante 30 % de Cobre. En la Figura 2.15. se observa una imagen del carrete utilizado.



Figura 2.15. Carrete de hilo de corte.

(Fuente: Propia)

Registradas las características del equipo de corte, se procedió a la preparación de la máquina de corte, completada esta actividad, se dio paso a ejecutar las operaciones de corte para obtener las probetas: WEDM-T-L-01, WEDM-T-L-02, WEDM-M-T-01, WEDM-M-L-02, WEDM-D-T-01.

La información cuantitativa que corresponde a datos operacionales se encuentra para cada probeta en el ANEXO III, a continuación, se resume brevemente la ejecución de los cortes realizados.

b. Operación de corte

Previo a la preparación del equipo, al tratarse de un carrete que ya había sido utilizado anteriormente, este se pesó, con el fin de relacionarlo con el peso final después de las operaciones de corte y obtener el consumo en peso del consumible.

Después, se ajustó la altura (eje z) del cabezal del cortador de acuerdo con el espesor de la plancha a cortarse. Para el procedimiento de alimentación del hilo, como primer punto se colocó al carrete en el eje secundario y se posicionó al hilo por las poleas de guía, así posicionar al tambor en la posición de corte, acto seguido, se encendió el motor del tambor para comenzar el bobinado del hilo en el tambor. Con la cantidad suficiente de hilo para realizar las operaciones, sugerida por el operador de ATI, se cortó el hilo que provenía del carrete y se ajustó este extremo con el tornillo de sujeción, el carrete fue descargado una vez efectuada esta actividad.

El otro extremo del hilo se pasó por las poleas guidoras principales, hasta hacerlo pasar por la boquilla del cabezal, luego, por la boquilla inferior. Con el circuito del hilo completo,

se procedió a delimitar el movimiento transversal del tambor, seguido de un reajuste en la tensión del hilo para efectos de garantizar que durante el corte éste permaneciera perpendicular a la pieza de trabajo. Con el hilo colocado en el equipo de corte, se posicionó a la plancha de acero en el bloque de montura.

Los parámetros de voltaje de brecha o chispa, tiempo de pulso on y off, corriente pico, velocidad del tambor y de alimentación fueron fijados a través del software de corte, luego, se ingresó la información dimensional de las piezas a cortarse.

Se encendió la generación de chispas y se acercó al hilo al extremo de la plancha por donde comenzaría el corte, a través del movimiento en ejes u y v comandados por el servomotor que mueve al bloque donde estaba montada la plancha. Aquí, se dio inicio a las operaciones de corte, mientras, paralelamente, se registró los datos operacionales necesarios para este estudio.

2.4. Ensayo Metalográfico

Una vez obtenidas las probetas según la norma ASTM E3-11 (ASTM, 2017), con los diferentes procesos de corte, para la realización del ensayo metalográfico, OFC-M-T-01, OFC-M-L-02, PAC-M-T-01, PAC-M-L-02, WEDM-M-T-01, WEDM-M-L-02, así como también las obtenidas con sierra manual para la evaluación del material base, S-M-T-01, S-M-L-02, se procedió en primer lugar, a la preparación y montaje de estas probetas para después, llevar a cabo los procedimientos de revelado de microestructura, captura de fotomicrografías, además, para las probetas obtenidas bajo los procesos de corte del estudio, visualización de cambios microestructurales y determinación cualitativa y cuantitativa, de la zona afectada por el calor. Estos procedimientos son descritos en las secciones subsiguientes.

2.4.1. Preparación y montaje de probetas

Para la obtención de fotomicrografías, previamente, fue necesario realizar una operación de montaje empleando resina polimérica, un paso previo a esta operación fue la determinación de la superficie a ser revelada. En la Figura 2.16. se muestra el montaje y las dos superficies donde, poco después, se llevaron a cabo las operaciones de pulido.

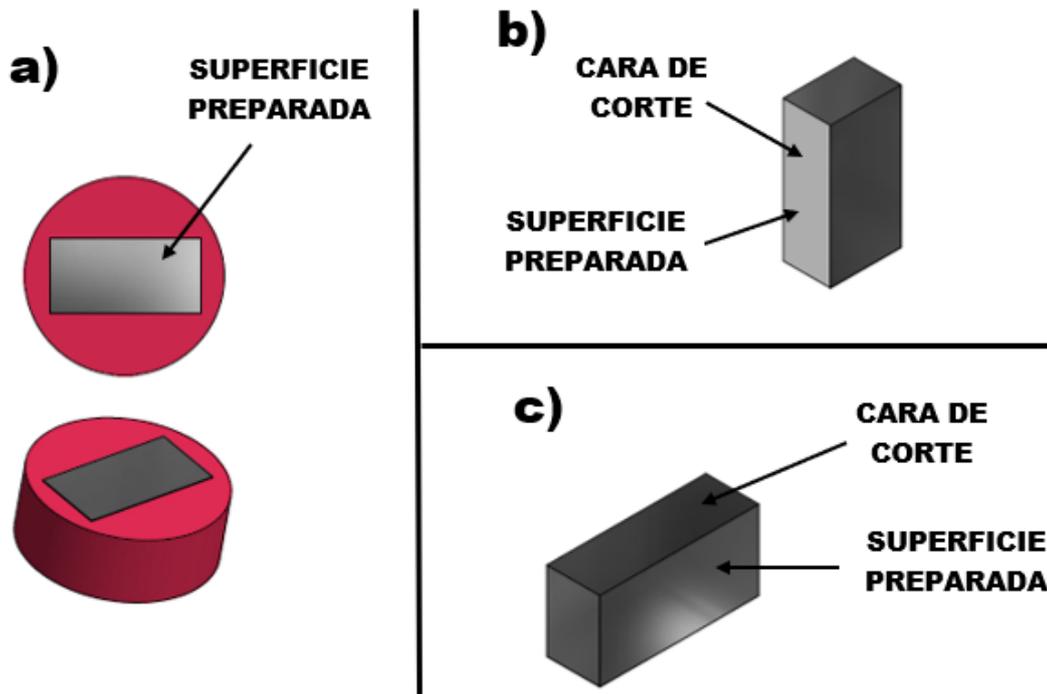


Figura 2.16. a) Montura de probetas. b) Superficie preparada 01. c) Superficie preparada 02.
(Fuente: Propia)

Como se muestra en la Figura 2.16. literales b y c, dos disposiciones fueron determinadas para la montura de las probetas, el primero, mostrado en el literal b, la cara de corte es la superficie que se preparó. En el literal c, la superficie preparada corresponde a la cara adyacente a la cara de corte.

A estas dos disposiciones, que fueron identificadas con la nomenclatura 01 y 02 respectivamente dentro del grupo de probetas para ensayo metalográfico, fueron montadas de acuerdo al procedimiento descrito a continuación.

a. Operación de montaje

Para ejecutar esta operación, se preparó en un recipiente de 6 onzas resina polimérica, una vez que se obtuvo la consistencia adecuada, se colocaron a las probetas de acuerdo a la determinación previa de la superficie a ser desbastada y pulida, dentro de los moldes de montaje tal como lo muestra la Figura 2.17. Después de 25 minutos, con la resina ya endurecida, se procedió a desmoldar las probetas para dar paso a la siguiente operación, desbaste y pulido.

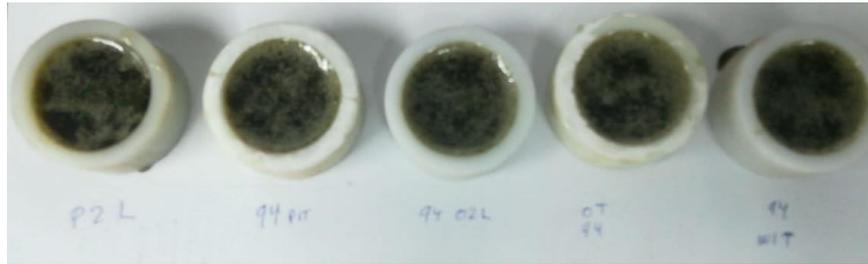


Figura 2.17. Preparación de probetas metalográficas en moldes.

(Fuente: Propia)

b. Desbaste y pulido

Para la realización de estas dos operaciones se empleó el equipo con el que cuenta el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla de la EPN, una pulidora semiautomática Forcimat, mostrada en la Figura 2.18.



Figura 2.18. Pulidora Forcimat utilizada para el desbaste y pulido.

(Fuente: Propia)

La primera operación ejecutada, consistió en el desbaste grueso, con la aplicación de lijas de grano basto, se eliminaron imperfecciones grandes y rayaduras profundas de la superficie, además, se nivelaron las caras paralelas. En cada cambio de lijas progresivo, se retiraron las muestras y se añadió alcohol para evitar su oxidación. Para el desbaste fino, se eliminaron las imperfecciones que dejó el paso de las lijas de desbaste grueso con el paso progresivo de lijas con granos más pequeños.

Finalmente, para la operación de pulido, donde se eliminaron prácticamente en su totalidad las rayaduras remanentes de los procesos anteriores, se empleó la lija tipo espejo, dejando la superficie lista para el ataque químico y revelar la microestructura con el microscopio

óptico. En la Figura 2.19. se muestran las probetas metalográficas obtenidas de acuerdo con la determinación y nomenclatura de la Tabla 2.3.

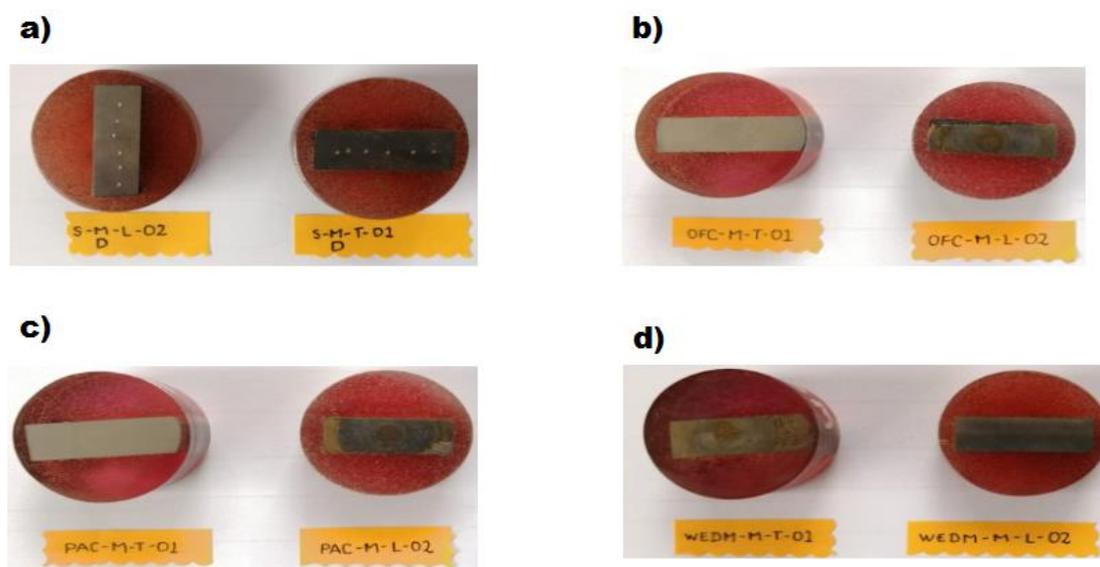


Figura 2.19. Probetas metalográficas obtenidas. a) Probetas Sierra manual. b) Probetas OFC. c) Probetas PAC. d) Probetas WEDM.

(Fuente: Propia)

c. Ataque químico

Para revelar la microestructura de la superficie preparada de las diferentes probetas obtenidas, fue necesario la utilización de compuestos químicos que permitan visualizar y diferenciar a través del microscopio óptico, las diferentes fases originales y resultantes del material. Los reactivos que se emplearon fueron vilela, que es una combinación entre nital al 2%, además de nital a la misma concentración.

Primero, se sumergió a las probetas en vilela durante 15 segundos, para después del ataque, retirar con agua el reactivo, luego, se vertió alcohol en la probeta para evitar su oxidación, por último, se limpió la superficie con algodón, para que ninguna de las sustancias utilizadas distorsione la visualización en el microscopio. El mismo procedimiento se realizó para el ataque químico con nital al 2%.

2.4.2. Obtención de las fotomicrografías

Una vez preparadas las diferentes probetas, se obtuvieron las fotomicrografías de cada una de ellas, mediante un Microscopio Metalográfico OLYMPUS GX41 y lentes de aumento objetivo de 100 X y 500 X. Para las probetas descritas en la Figura 2.19, se realizó el procedimiento mencionado a continuación.

Se posicionó la probeta en la pletina porta-muestras, ajustando la luz de la lámpara, el enfoque y seleccionando el lente objetivo. Ver Figura 2.20.



Figura 2.20. Microscopio metalográfico OLYMPUS GX41.

(Fuente: Propia)

Para la primera captura, se adaptó en el revólver el lente objetivo de 100X. Seguidamente, para la segunda captura se adaptó el lente objetivo 500 X. Con ayuda del software Stream Essentials, se visualizó las fotomicrografías, ajustando el contraste para mejor calidad de la imagen. Este software permitió guardar las fotomicrografías correspondientes a los objetivos de 100X y 500X para las diferentes zonas de transición, afectadas por el corte térmico en la probeta.

2.5. Ensayo de Microdureza

Las mediciones para determinar la dureza superficial de las probetas fueron llevadas a cabo bajo un ensayo de microdureza, según lo estipulado en la norma ASTM E92-17 (ASTM, 2017), norma para la realización de ensayos de dureza Vickers y Knoop en materiales metálicos. Se recurrió al ensayo de microdureza, debido a que, para obtener más de un solo valor de dureza en la zona afectada por el calor, y poder evidenciar un cambio progresivo, era necesaria la realización de indentaciones microscópicas.

Las probetas utilizadas para este ensayo correspondieron a las S-D-T-01, OFC-D-T-01, PAC-D-T-01 y WEDM-D-T-01. Su preparación consistió en los mismos pasos descritos en la sección 2.4.1. a excepción del ataque químico.

El ensayo realizado tuvo una excepción de carácter práctico respecto a lo recomendado en la metodología de la norma ASTM E92-17, la distancia de separación entre indentaciones normalizado determina que corresponde a 2,5 veces el diámetro del

indentador. En las secciones subsiguientes, se detallan las actividades realizadas a lo largo de este ensayo.

2.5.1. Proceso de indentaciones

Para las indentaciones realizadas, se utilizó el equipo del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla, un microdurómetro de la marca Duoline que se muestra en la Figura 2.21.



Figura 2.21. Microdurómetro Duoline utilizado para las indentaciones.

(Fuente: Propia)

Para la ejecución de las indentaciones, previamente se establecieron los valores que se muestran a continuación en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores de entrada para realización de indentaciones.

| Valor de entrada | Especificación |
|---------------------------------|----------------|
| Carga de indentación Aplicada | 200 gf |
| Duración de aplicación de carga | 15 s |
| Distancia entre indentaciones | 8 μ m |

(Fuente: Propia)

Establecidos los datos de entrada, se procedió con la ubicación del primer punto a indentar visualizando este procedimiento a través del microscopio del equipo. Una vez realizada la indentación, a través del software Kameram que posee la computadora conectada al equipo Duroline, se capturaron las imágenes de ésta para su procesamiento posterior. El proceso de obtención de indentaciones se repitió de la misma manera, hasta llegar a la cercanía del filo de la cara de corte a 13 micras de distancia.

2.5.2. Procesamiento de imágenes y obtención de valores de dureza

Procesadas las imágenes obtenidas de las indentaciones y haber sido mejorada su resolución mediante la función de multienfoque, se procedió a la determinación de los valores de dureza en escala Vickers. En este procedimiento, el valor de dureza se obtiene de manera indirecta, debido a que, en la imagen obtenida se trazaron las diagonales de la marca que dejó la indentación, para que después, el software arroje el valor de la medición relacionando la medida de estas diagonales. En el ANEXO IV se encuentran los valores obtenidos bajo esta metodología.

2.6. Ensayo de Tracción

Obtenidas las probetas para tracción, según la norma ASTM - E8 (ASTM, 2016), con los diferentes procesos de corte, OFC-T-L-01, OFC-T-L-02, PAC-T-L-01, PAC-T-L-02, WEDM-T-L-01 y WEDM-T-L-02, como las probetas que caracterizan el material base obtenidas mediante sierra de vaivén S-T-L-01 y S-T-L-02, se procedió a realizar el ensayo de tracción para cada probeta, siguiendo los pasos descritos a continuación.

Se midió 50 mm en la zona de área constante reducida con un calibrador digital. Esta medida se tomó como la longitud inicial en todas las probetas y se marcó con señales de color blanco, como se observa en la Figura 2.22.



Figura 2.22. Probetas marcadas a 50 mm en la zona de área constante reducida.

(Fuente: Propia)

Se comprobó las dimensiones de las probetas según la norma ASTM-E8, seguidamente se utilizó un marcador de presión, que mediante un punzón, se marcó los límites de la zona de área constante reducida, como se observa en la Figura 2.23.



Figura 2.23. Marcador de presión para probetas de tracción.
(Fuente: Propia)

Se ubicó la probeta en las mordazas de la Máquina Universal con las mordazas de Ensayos de Tracción. Como se observa en la Figura 2.24. cada mordaza fija y móvil, sostuvo a la probeta aproximadamente 20 [mm] hacia el exterior de los límites marcados por el punzón.



Figura 2.24. Marcador de presión para probetas de tracción.
(Fuente: Propia)

Se encendió la Máquina Universal mientras se verificó la posición inicial del sistema, la velocidad de carga y se encendió la carga de la máquina. Al iniciar el ensayo, se observó la fluencia del acero y el encuellamiento de la probeta. Simultáneamente, se tomaron las lecturas de deformación y carga. Previo a la rotura de la probeta, se verifican los valores registrados y finalmente se midió la longitud entre las marcas realizadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se encuentran los resultados de las superficies de corte obtenidas en términos de calidad, las fotomicrografías obtenidas, dureza superficial, resultados de los ensayos de tracción efectuados, costos por operaciones de corte generados. Esta información obtenida, se encuentra compilada en tablas y gráficas en la sección 3.1. mientras que, el análisis de la información obtenida sobre el estudio, se expone en la sección 3.2.

3.1. Resultados

3.1.1. Composición de la plancha de acero.

Los elementos que componen a la plancha de acero utilizada se exponen en la Tabla 3.1. además, se presenta la información completa en el ANEXO II.

Tabla 3.1. Composición del acero de bajo carbono mediante la espectrometría.

| Elemento | Valor [%] |
|----------------|-----------|
| Carbono [C] | 0.121 |
| Silicio [Si] | 0.112 |
| Manganeso [Mn] | 0.229 |
| Fósforo [P] | 0.010 |
| Cromo [Cr] | 0.378 |
| Níquel [Ni] | 0.034 |
| Cobre [Cu] | 0.017 |
| Aluminio [Al] | 0.012 |
| Hierro [Fe] | 99.08 |
| Total | 99.99 |

(Fuente: Propia)

3.1.2. Superficies de corte obtenidas

A continuación, en la Tabla 3.2. se presentan las superficies de las probetas obtenidas tras la ejecución de los diferentes procesos de corte OFC, PAC y WEDM, además las probetas de corte en frío realizadas con sierra manual, industrial y fresadora.

Tabla 3.2. Superficies de corte obtenidas tras los procesos de Sierra, OFC, PAC y WEDM.

| Superficie de probetas obtenidas por Sierra: | |
|--|---|
| <p>Probetas S-M-T-01 y S-D-L-02 Obtenidas mediante corte con sierra manual.</p> |  |
| <p>Probeta S-T-L-01 Obtenida mediante corte con sierra industrial alternativa.</p> | <p>S-T-L-01 Frontal</p>  <p>Perfil</p>  |
| <p>Probeta S-T-L-02 Obtenida mediante corte con sierra industrial alternativa.</p> | <p>S-T-L-02 Frontal</p>  <p>Perfil</p>  |
| Superficie de probetas obtenidas por Oxicorte (OFC): | |
| <p>Probeta OFC-M-T-01 Obtenida mediante el proceso de Oxicorte</p> | <p>OFC-M-T-01</p> <p>Frontal</p>  <p>Perfil</p>  |
| <p>Probeta OFC-M-L-02 Obtenida mediante el proceso de Oxicorte.</p> | <p>OFC-ML-02</p> <p>Frontal</p>  <p>Perfil</p>  |

| | | |
|---|---|--|
| <p>Probeta OFC-T-L-01 Obtenida mediante el proceso de Oxicorte.</p> | <p>OFC-T-L-01 Frontal  Perfil </p> | |
| <p>Probeta OFC-T-L-02 Obtenida mediante el proceso de Oxicorte.</p> | <p>OFC-T-L-02 Frontal  Perfil </p> | |
| <p>Superficie de probetas obtenidas por corte Plasma (PAC):</p> | | |
| <p>Probeta PAC-M-T-01 Obtenida mediante el proceso de corte por Plasma</p> | <p>PAC-M-T-01 Frontal  Perfil </p> | |
| <p>Probeta PAC-M-L-02 Obtenida mediante el proceso de corte por Plasma.</p> | <p>PAC-M-L-02 Frontal  Perfil </p> | |
| <p>Probeta PAC-T-L-01 Obtenida mediante el proceso de corte por Plasma.</p> | <p>PAC-T-L-01 Frontal  Perfil </p> | |
| <p>Probeta PAC-T-L-02 Obtenida mediante el proceso de corte por Plasma.</p> | <p>PAC-T-L-02 Frontal  Perfil </p> | |

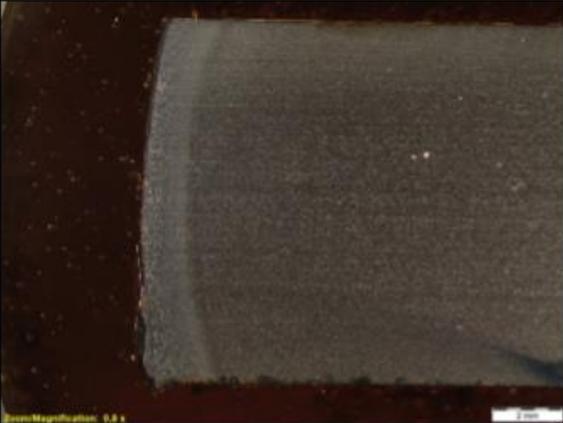
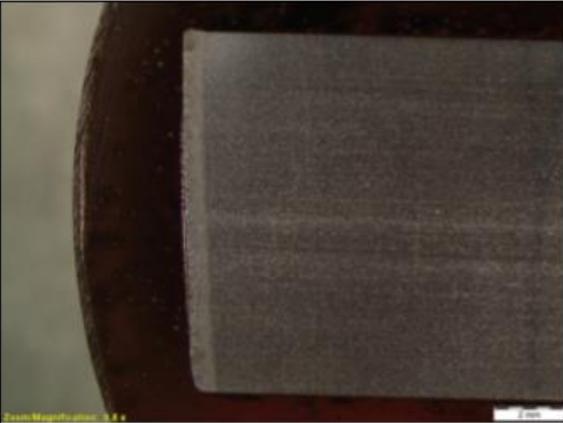
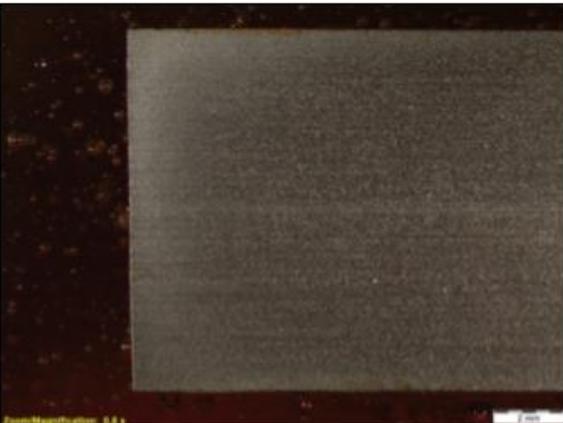
| Superficie de probetas obtenidas por corte con Electrohilo (WEDM): | | |
|--|---|--|
| <p>Probeta WEDM-M-T-01</p> <p>Obtenida mediante el proceso de corte con Electrohilo.</p> | WEDM-M-T-01 | |
| | <p>Frontal</p>  | <p>Perfil</p>  |
| <p>Probeta WEDM-M-L-02</p> <p>Obtenida mediante el proceso de corte con Electrohilo.</p> | WEDM-M-L-02 | |
| | <p>Frontal</p>  | <p>Perfil</p>  |
| <p>Probeta WEDM-T-L-01</p> <p>Obtenida mediante el proceso de corte con Electrohilo.</p> | WEDM-T-L-01 | |
| | <p>Frontal</p>  | <p>Perfil</p>  |
| <p>Probeta WEDM-T-L-02</p> <p>Obtenida mediante el proceso de corte con Electrohilo.</p> | WEDM-T-L-02 | |
| | <p>Frontal</p>  | <p>Perfil</p>  |

(Fuente: Propia)

3.1.3. Macrográficas (zona afectada por el calor)

Las macrográficas obtenidas del área transversal de las probetas, posterior a los procesos de corte OFC, PAC y WEDM, en las cuales se observa la zona afectada por el calor perteneciente a cada proceso, se indica en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Zona afectada por el calor posterior a los procesos de OFC, PAC y WEDM.

| Zona afectada por el Calor en probeta obtenida por Oxicorte (OFC): | |
|---|--|
| Macrografía de la probeta OFC-M-T-01 Obtenida mediante el proceso de Oxicorte. |  |
| Zona afectada por el Calor en probeta obtenida por corte Plasma (PAC): | |
| Macrografía de la probeta PAC-M-T-01 Obtenida mediante el proceso de corte por Plasma. |  |
| Zona afectada por el calor en probeta obtenida con Electrohilo (WEDM): | |
| Macrografía de la probeta WEDM-M-T-01 Obtenida mediante el proceso de corte por Electrohilo. |  |

(Fuente: Propia)

3.1.4. Micrografías en la zona de transición de la ZAC

Para observar las diferentes microestructuras que caracterizan a la zona afectada por el calor (ZAC), se divide la longitud transversal de la probeta en varias zonas, tomando la zona 1 como la primera afectada por el corte térmico, la zona 2 caracterizada con una invasión de calor disminuida y en transición hasta la zona 3 que equivale a las propiedades originales del material base, cómo se observa en la Figura 3.1.

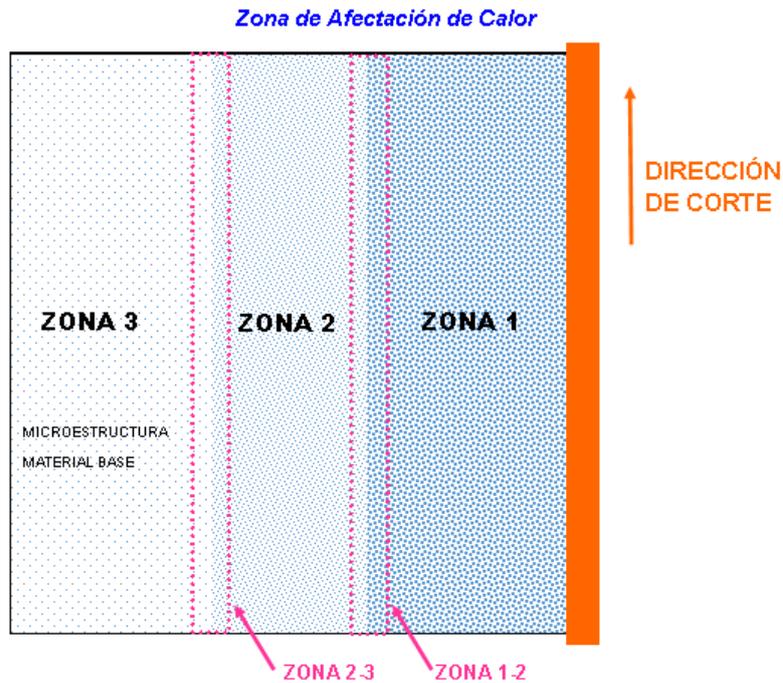
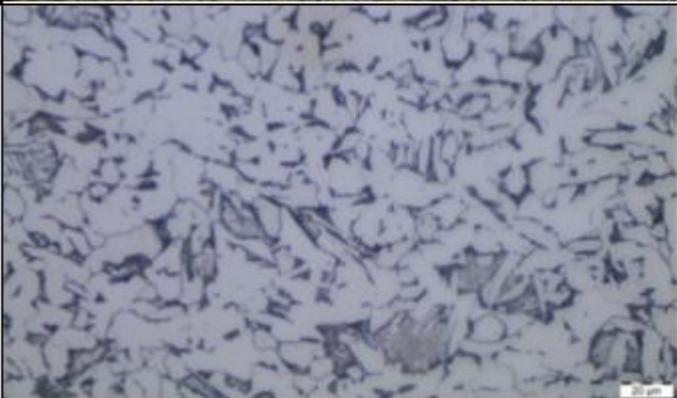
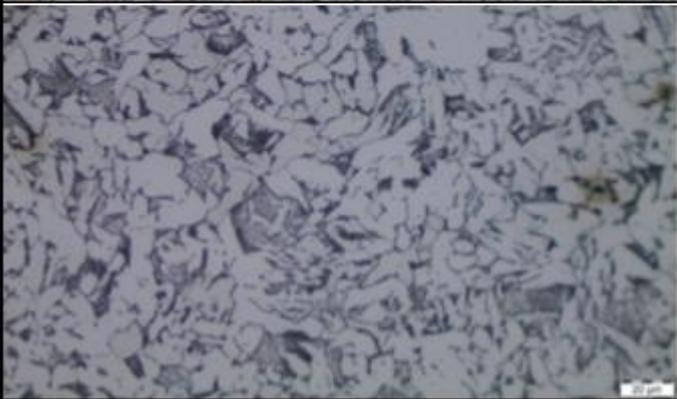


Figura 3.1. Zonas de transición de la ZAC para la identificación de las microestructuras.

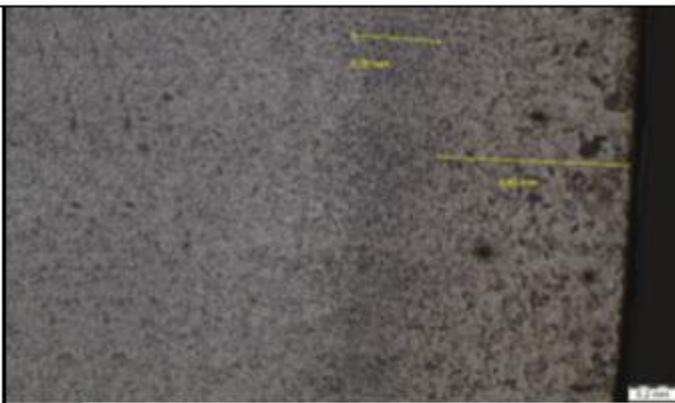
(Fuente: Propia)

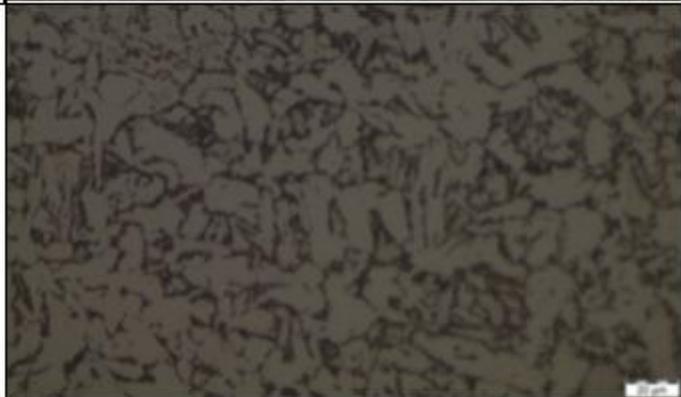
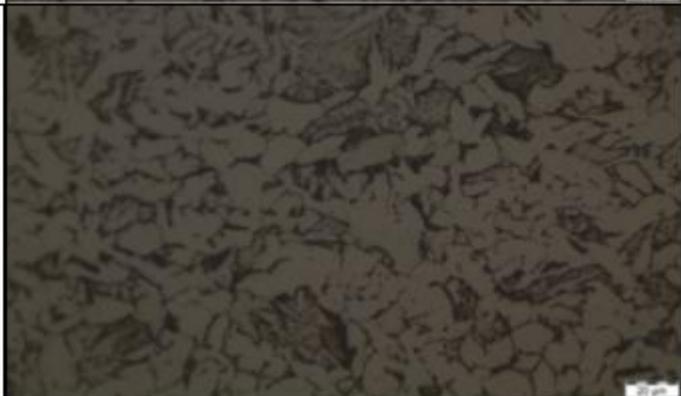
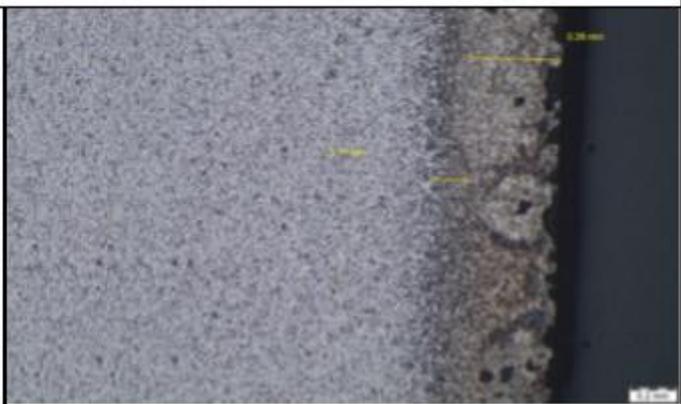
De esta manera, se clasifican las micrografías obtenidas de las diferentes probetas, para los aumentos de 50 X, 100 X y 500 X, como se observa en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Micrografías de la zona afectada por el calor, del material base y posterior a los procesos de OFC, PAC y WEDM.

| Material Base: | |
|---|--|
| <p>Micrografía de la probeta S-M-T-01 Obtenida con la magnificación 100X.</p> |  |
| <p>Micrografía de la probeta S-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |
| <p>Micrografía de la probeta S-M-L-02 Obtenida con la magnificación 100X.</p> |  |
| <p>Micrografía de la probeta S-M-L-02 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |

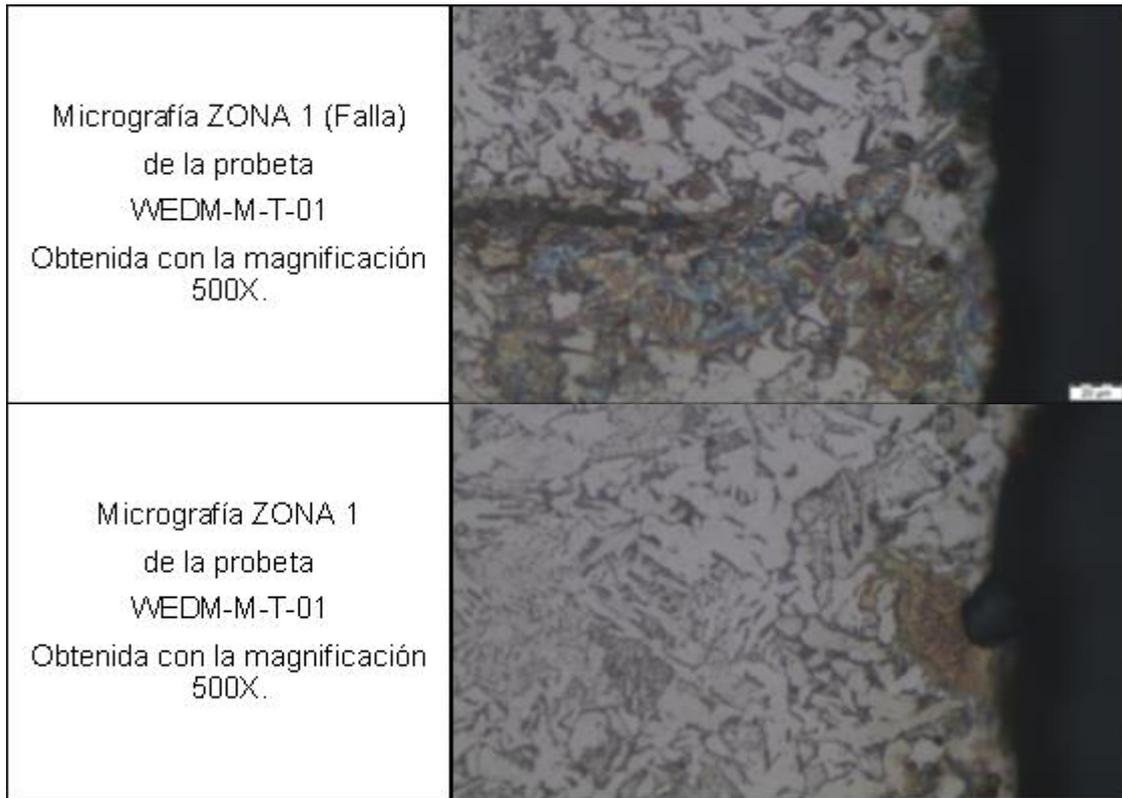
Probeta obtenida por Oxicorte (OFC):

| | |
|--|--|
| <p>Micrografía Vista General de la probeta OFC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 50X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA 1 de la probeta OFC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 100X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA 1 de la probeta OFC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA de transición 1 a 2 de la probeta OFC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |

| | |
|--|--|
| <p>Micrografía ZONA 2 de la probeta OFC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA de transición 2 a 3 de la probeta OFC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA 3 de la probeta OFC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |
| <p>Probeta obtenida por corte Plasma (PAC):</p> | |
| <p>Micrografía Vista General de la probeta PAC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 50X.</p> |  |

| | |
|--|--|
| <p>Micrografía ZONA 1 de la probeta PAC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 100X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA 1 de la probeta PAC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA 2 de la probeta PAC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA de transición 2 a 3 de la probeta PAC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |

| | |
|---|--|
| <p>Micrografía ZONA 3 de la probeta PAC-M-T-01 Obtenida con la magnificación 500X.</p> |  |
| <p>Probeta obtenida por corte con Electrohilo (WEDM):</p> | |
| <p>Micrografía Vista General de la probeta WEDM-M-T-01 Obtenida con la magnificación 50X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA 1 (Falla) de la probeta WEDM-M-T-01 Obtenida con la magnificación 100X.</p> |  |
| <p>Micrografía ZONA 1 de la probeta WEDM-M-T-01 Obtenida con la magnificación 100X.</p> |  |



(Fuente: Propia)

3.1.5. Valores obtenidos de microdureza

Los datos obtenidos a partir de la ejecución del ensayo de microdureza en escala Vickers, se muestran en la Tabla 3.5. Tabla 3.6. Tabla 3.7. y Tabla 3.8. efectuados en la probetas de sierra manual, probetas sometidas a corte OCF, PAC y WEDM respectivamente.

Tabla 3.5. Valores obtenidos de dureza en probeta corte con sierra manual.

| Número de medida | Dureza [HV] |
|------------------|-------------|
| S-D01 | 147,72 |
| S-D02 | 146,89 |
| S-D03 | 147,34 |
| S-D04 | 147,43 |
| S-D05 | 146,59 |
| S-D06 | 147,78 |
| S-D07 | 147,24 |
| S-D08 | 165,76 |

(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Valores obtenidos de dureza en probeta con corte OFC.

| Número de medida | Dureza [HV] |
|-------------------------|--------------------|
| OFC-D01 | 165,95 |
| OFC-D02 | 169,03 |
| OFC-D03 | 164,62 |
| OFC-D04 | 164,60 |
| OFC-D05 | 158,97 |
| OFC-D06 | 166,26 |
| OFC-D07 | 178,82 |
| OFC-D08 | 181,92 |
| OFC-D09 | 174,72 |
| OFC-D10 | 178,79 |
| OFC-D11 | 179,42 |
| OFC-D12 | 201,19 |
| OFC-D13 | 212,02 |
| OFC-D14 | 213,20 |
| OFC-D15 | 216,98 |
| OFC-D16 | 225,29 |
| OFC-D17 | 223,72 |
| OFC-D18 | 229,36 |
| OFC-D19 | 226,47 |
| OFC-D20 | 232,73 |
| OFC-D21 | 236,64 |
| OFC-D22 | 260,81 |

(Fuente: Propia)

Tabla 3.7. Valores obtenidos de dureza en probeta con corte PAC.

| Número de medida | Dureza [HV] |
|-------------------------|--------------------|
| PAC-D01 | 161,14 |
| PAC-D02 | 165,47 |
| PAC-D03 | 178,72 |
| PAC-D04 | 210,31 |
| PAC-D05 | 234,07 |
| PAC-D06 | 260,04 |
| PAC-D07 | 288,18 |
| PAC-D08 | 361,24 |
| PAC-D09 | 473,01 |
| PAC-D10 | 477,60 |

(Fuente: Propia)

Tabla 3.8. Valores obtenidos de dureza en probeta con corte WEDM.

| Número de medida | Dureza [HV] |
|-------------------------|--------------------|
| WEDM-D01 | 152,72 |
| WEDM-D02 | 155,99 |
| WEDM-D03 | 153,15 |
| WEDM-D04 | 157,56 |
| WEDM-D05 | 161,49 |
| WEDM-D06 | 161,61 |
| WEDM-D07 | 162,95 |
| WEDM-D08 | 167,74 |

(Fuente: Propia)

3.1.6. Valores obtenidos de resistencia a la tracción.

Los resultados obtenidos tras el ensayo de resistencia a la tracción, para las probetas cortadas por sierra, OFC, PAC y WEDM, se indican en la Tabla 3.9. la cual es un compendio del ANEXO V.

Tabla 3.9. Valores obtenidos del Ensayo de Tracción en las probetas cortadas por sierra, OFC, PAC y WEDM.

| Id. | Ancho promedio | Espesor promedio | Carga máxima Registrada | | Resistencia a la Tracción | | % elongación en 50 [mm] |
|-------------|----------------|------------------|-------------------------|-------|---------------------------|-------|-------------------------|
| | mm | mm | lbf | N | ksi | MPa | |
| WEDM-T-L-01 | 12.46 | 10.09 | 13266 | 59010 | 68.1 | 469.4 | 39.2 |
| WEDM-T-L-02 | 12.43 | 10.07 | 13359 | 59424 | 68.9 | 474.7 | 38.5 |
| PAC-T-L-01 | 13.89 | 10.09 | 16854 | 74970 | 77.6 | 534.9 | 32.9 |
| PAC-T-L-02 | 13.57 | 10.08 | 16291 | 72466 | 76.8 | 529.8 | 32.1 |
| S-T-L-01 | 12.67 | 10.08 | 13281 | 59076 | 67.1 | 462.0 | 36.5 |
| S-T-L-02 | 12.70 | 10.05 | 13402 | 59614 | 67.7 | 466.5 | 35.2 |
| OFC-T-L-01 | 15.14 | 10.28 | 15883 | 70651 | 65.8 | 453.8 | 27.3 |
| OFC-T-L-02 | 14.87 | 10.15 | 15671 | 69710 | 67.0 | 461.7 | 26.8 |

(Fuente: Propia)

3.1.7. Rendimiento de los procesos de corte

a. Tasa de remoción de material

Tomando en cuenta uno de los conceptos de eficiencia en un proceso de corte, como la relación entre la cantidad de material cortado y el producto de la densidad del material, con el tiempo de maquinado tomado para cada proceso, la Ecuación (1) utilizada para el cálculo del MRR, Material Removal Rate, por sus siglas en inglés, se detalla a continuación. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.10.

$$mrr = \frac{peso_{inicial} - peso_{final}}{\rho_{acero A36} * t_{maquinado}} \quad (1)$$

Tabla 3.10. Tasa de remoción de material en proceso de corte.

| Proceso de corte | Tasa de remoción de material $\left[\frac{mm^3}{min}\right]$ |
|------------------|--|
| OFC | 8,17 |
| PAC | 5,01 |
| WEDM | 0,13 |

(Fuente: Propia)

Con estos valores de MRR, se adiciona otra característica inherente a cada proceso realizado para la separación de material, el ancho de corte o kerf. La Tabla 3.11. muestra los valores obtenidos para esta característica. Con estos valores de MRR, se adiciona otra característica inherente a cada proceso realizado para la separación de material, el ancho de corte o kerf. Valores obtenidos al medir el grosor de la brecha que deja cada operación de corte realizada. La Tabla 3.11. muestra los valores obtenidos para esta característica.

Tabla 3.11. Ancho de corte "kerf".en procesos de corte.

| Proceso de corte | Ancho de corte kerf. [mm] |
|------------------|---------------------------|
| OFC | 2,70 |
| PAC | 2,60 |
| WEDM | 0,20 |

(Fuente: Propia)

b. Velocidad de corte

De acuerdo con la distancia total cortada, para la obtención de las probetas de este estudio y el tiempo de operación registrado en el ANEXO III. Se obtiene la velocidad de corte para los tres procesos mostrado en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Velocidad de corte obtenida.

| Proceso de corte | Velocidad $\left[\frac{mm}{min}\right]$ |
|------------------|---|
| OFC | 515,69 |
| PAC | 1213,72 |
| WEDM | 241,22 |

(Fuente: Propia)

3.1.8. Datos obtenidos para costeo operacional

Con la información registrada de los procesos de corte ejecutados, que consta en el ANEXO III. para los procesos OFC, PAC y WEDM respectivamente, se obtiene la información relevante para la estimación de costos operacional. Las tablas que se presentan a continuación, muestran de manera resumida estos datos.

a. Tiempos de operación de corte

Se describe de manera cuantitativa, los tiempos de preparación de equipo, tiempos de operación, para cada proceso y cada probeta obtenida. En la Tabla 3.13. se indica estos resultados.

Tabla 3.13. Tiempos de operación de los procesos de corte OFC, PAC y WEDM.

| OFC | |
|--|---------------------------|
| Tiempo de preparación del equipo [min]: 12 | |
| Nomenclatura de la probeta | Tiempo de operación [min] |
| OFC-T-L-01 | 3,76 |
| OFC-T-T-02 | 3,68 |
| OFC-M-L-01 | 0,47 |
| OFC-M-T-02 | 0,52 |
| OFC-D-T-01 | 0,49 |
| Total | 8,92 |

| PAC | |
|--|----------------------------------|
| Tiempo de preparación del equipo [min]: 25 | |
| Nomenclatura de la probeta | Tiempo de operación [min] |
| PAC-T-L-01 | 1,33 |
| PAC-T-T-02 | 1,36 |
| PAC-M-L-01 | 0,38 |
| PAC-M-T-02 | 0,42 |
| PAC-D-T-01 | 0,30 |
| Total | 3,79 |
| WEDM | |
| Tiempo de preparación del equipo [min]: 30 | |
| Nomenclatura de la probeta | Tiempo de operación [min] |
| WEDM-T-L-01 | 6,20 |
| WEDM-T-T-02 | 6,50 |
| WEDM-M-L-01 | 2,30 |
| WEDM-M-T-02 | 2,00 |
| WEDM-D-T-01 | 2,07 |
| Total | 19,07 |

(Fuente: Propia)

b. Consumo y costeo de insumos en operaciones de corte

La Tabla 3.14. muestra las cantidades de insumos utilizados durante los procesos de corte, así como también, los costos reflejados por estos consumos.

Tabla 3.14. Consumo y costeo de insumos en operaciones de corte.

| OFC | | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------|--------------------|
| Insumo | Cantidad consumida | Unidad | Costo [USD] |
| Oxígeno | 440,8 | l | 2,06 |
| Acetileno | 55,1 | l | 1,01 |
| Boquilla | 1 | Un | 13,44 |
| Total: | | | 16,51 |
| PAC | | | |
| Insumo | Cantidad consumida | Unidad | Costo [USD] |
| Boquilla Hypertherm 220816 | 1 | Un | 7,35 |
| Electrodo Hypertherm 220842 | 1 | Un | 9,69 |
| Total: | | | 20,05 |

| WEDM | | | |
|------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|
| Insumo | Cantidad consumida | Unidad | Costo [USD] |
| Fluido refrigerante | 308 | cm ³ | 5,99 |
| Electrodo de Tungsteno | 77,2 | g | 14,86 |
| Total: | | | 20,85 |

(Fuente: Propia)

c. Consumo de material base

Para la determinación del consumo de material base, se parte de los pesos tomados durante las operaciones de corte del material base antes y después de su ejecución, así como también, el peso de la escoria obtenida. La Tabla 3.15. se resume estos valores obtenidos.

Tabla 3.15. Consumo de material base en procesos de corte.

| Proceso de corte | Peso inicial [kg] | Peso final [kg] | Peso desperdicio (escoria) [kg] |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|--|
| OFC | 9,97 | 9,52 | 0,45 |
| PAC | 10 | 9,81 | 0,22 |
| WEDM | 9,6 | 9,58 | 0,02 |

(Fuente: Propia)

d. Layout de costos operacionales de corte

El esquema de cálculo, o layout de costos, que se presenta para los procesos de corte con Oxígeno, Plasma y Electrohilo, en la Tabla 3.16. muestra los costos totales compuestos por la sumatoria de costos variables y fijos tomando en consideración, que para los costos fijos tanto en el proceso PAC Y WEDM, se incurre la utilización de mano de obra indirecta a una persona encargada de desempeñar las actividades de dibujante y programador de CNC con un sueldo de 424,15 USD. Para la determinación de costos variables, se toma en cuenta la mano de obra directa correspondiente a un operador, que percibe el sueldo correspondiente a 408,95 USD, sueldo que igual que el de la mano de obra indirecta, fueron determinados de acuerdo al acuerdo ministerial MDT-2019-395, consumo de energía para el caso de los procesos de corte con Plasma y Electrohilo y consumo de insumos. Todo

este layout toma como referencia la longitud total lineal cortada para la obtención de las probetas, correspondiente a 4,60 m y el tiempo total de operación de cada proceso.

Tabla 3.16. Consumo de material base en procesos de corte.

| OFC | | PAC | | WEDM | |
|-------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Costos Fijos | | | | | |
| Origen | Valor [USD] | Origen | Valor [USD] | Origen | Valor [USD] |
| Mano de obra indirecta | 0,00 | Mano de obra indirecta | 0,07 | Mano de obra indirecta | 0,29 |
| Costos Variables | | | | | |
| Origen | Valor [USD] | Origen | Valor [USD] | Origen | Valor [USD] |
| Insumos de operación | 16,51 | Insumos de operación | 17,04 | Insumos de operación | 20,85 |
| Energía red eléctrica | 0,00 | Energía red eléctrica | 1,29 | Energía red eléctrica | 0,09 |
| Mano de obra directa | 0,09 | Mano de obra directa | 0,07 | Mano de obra directa | 0,27 |
| Total C.V | 16,60 | Total C.V | 18,40 | Total C.V | 21,21 |
| Costos T. | 16,60 | Costos T. | 18,47 | Costos T. | 21,50 |

(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

3.2.1. Análisis de la calidad de corte y tipo de acabado superficial

Como se observa en la Tabla 3.2. la calidad en la superficie de corte obtenida en las probetas, difiere y se ve afectada debido a las características propias de cada proceso. Las valoraciones presentadas a continuación en la Tabla 3.17. se basan en la inspección visual de las probetas, obteniendo criterios una vez concluido cada proceso de corte, con los parámetros señalados en el ANEXO III. y contrastando esta inspección, con las condiciones presentadas en los manuales de ASM Metals Handbooks (Black & Auburn University, 1999), Manual del operador (Hypertherm, 2019) y Complete EDM Handbook (Sommer, 2012).

Tabla 3.17. Calidad en la superficie de corte tras los procesos OFC, PAC y WEDM.

| Proceso | Probeta | Criterio de Afectación | Tipo de Borde | Apariencia Superficial | Discontinuidades Superficiales |
|---------|-------------|---|--|---|---|
| OFC | OFC-D-T-01 | Proceso manual. Desviación en parámetros operativos. La temperatura del proceso oscila los 3000 °C. | Afectado por socavamientos en la parte superior e inferior. Bordes derretidos (rebabas). Excavaciones notables. | Irregular. Existen líneas de arrastre pronunciadas, fisuras y ondulaciones. Cantidades excesivas de escoria adherida. | a) Inclusiones. b) Cráteres. c) Porosidad. d) Rebabas. |
| | OFC-M-T-01 | | | | |
| | OFC-M-L-02 | | | | |
| | OFC-T-L-01 | | | | |
| | OFC-T-L-02 | | | | |
| PAC | PAC-D-T-01 | Proceso automático. Desviación en parámetros operativos. La temperatura del proceso oscila los 30 000 °C. | Cuadrado, bisel de ángulos positivos y negativos de corte. Salpicaduras en la parte superior y mínima cantidad de escoria. | Plana, con surcos cóncavos orientados en dirección normal al trazado de la superficie. | Ninguno. |
| | PAC-M-T-01 | | | | |
| | PAC-M-L-02 | | | | |
| | PAC-T-L-01 | | | | |
| | PAC-T-L-02 | | | | |
| WEDM | WEDM-D-T-01 | Proceso automático. Desviación en parámetros operativos. La temperatura del proceso oscila los 10000 °C. | Cuadrado y con límites definidos. No existe presencia de escoria. | Plana, con pseudo surcos rectos orientados en la dirección normal al trazado de la superficie. | Ninguno. |
| | WEDM-M-T-01 | | | | |
| | WEDM-M-L-02 | | | | |
| | WEDM-T-L-01 | | | | |
| | WEDM-T-L-02 | | | | |

(Fuente: Propia)

Según las características observadas en la Tabla 3.17. y la investigación del acabado superficial tras el mecanizado, por parte de (El-Hofy, 2005), el proceso de corte OFC se asocia con una rugosidad entre 50 a 100 μm , tras el proceso de corte PAC de 12 a 16 μm

y tras el proceso de corte WEDM de 3,6 a 6,6 μm . Donde, según la norma DIN 4769-1 (DIN, 2002), se presenta el grado de rugosidad, como lo indica la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Aplicación de los procesos OFC, PAC y WEDM, respecto al grado de rugosidad.

| Proceso | Grado de rugosidad | Exigencia de calidad superficial | Indicación en Diseño | Ejemplos de aplicación |
|---------|--------------------|----------------------------------|---|--|
| OFC | N12 | Sin exigencia particular |  | Superficies desbastadas y fundidas a presión. |
| PAC | N10 | Baja |  | Superficies sin mecanizado, ajustes leves. |
| WEDM | N8 | Media |  | Superficies fatigadas por flexión o torsión, ajustes normales. |

Fuente: (DIN, 2002)

3.2.2. Interpretación metalográfica

En los procesos por corte térmico, el principal parámetro a evaluar es la microestructura de la aleación, y su variación respecto a la temperatura del proceso a la cual se ve sometida. Durante los procesos considerados en este estudio, al obtener las probetas, el acero de bajo contenido de carbono se calienta y se enfría; el mismo que experimenta en diversas proporciones un tratamiento térmico. Al observar las temperaturas de los procesos en Tabla 3.17. y la composición del acero de bajo carbono en la Tabla 3.1. se analiza las microestructuras presentes en el material base y en la zona afectada térmicamente, descritas a continuación.

Para el presente trabajo, el término “afectación” se relaciona cuantitativamente con la extensión longitudinal de la zona afectada por el calor, experimentada tras los procesos de corte térmico, y cualitativamente con el cambio microestructural ocasionado en dicha zona. Los resultados presentados en este apartado se encuentran avalados por ILPM Engineering (Estupiñan & Estupiñan, 2020), Informes técnicos presentes en el ANEXO VI.

3.2.2.1. Microestructura presente en las probetas de material base

Tomando en cuenta la composición de la plancha de acero presente en la Tabla 3.1. el acero utilizado se define como hipoeutectoide (0,12 % C), según el Diagrama Fe-C presente en el ANEXO IX. Al observar las micrográficas del material base presentes en la

Tabla 3.4. y tomando en cuenta el Diagrama TTT (tiempo, temperatura, transformación) para el acero hipoeutectoide AISI 1010, presente en el ANEXO X. es posible identificar que los componentes microestructurales son ferrita y perlita. Estos componentes se observan en Figura 3.2.a. (Fuente: Propia) y se pueden contrastar con la Figura 3.2.b. la cual presenta una microestructura ferrítica perlítica extraída del ASM Handbook Vol.9 Metallography and Microstructures (Vander Voort & Baldwin, 2004).

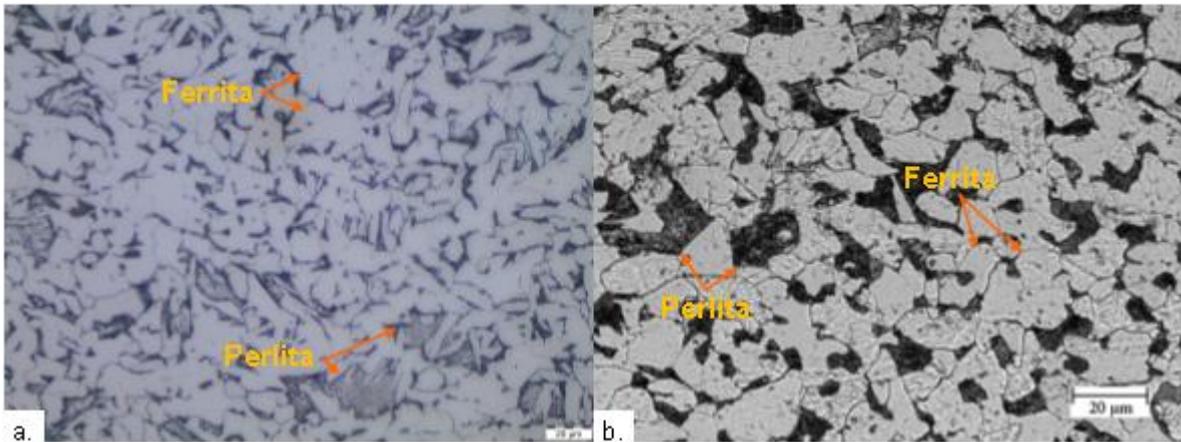


Figura 3.2. a) Micrografía de S-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%. b) Micrografía estructura ferrítica perlítica a 500X con ataque químico de Nital al 5%.

Fuente: (Vander Voort & Baldwin, 2004).

En el área evaluada de la micrografía (100 x 100 μm) de la Figura 3.3.a se obtiene 79,5 % de Ferrita y 20,50 % de Perlita. Al observar la misma con un aumento de 500X, como indica la Figura 3.3.b. se identifica la presencia de ferrita acicular. La ferrita se encuentra alargada, característica de un enfriamiento rápido. Mediante el método de medición de grano por comparación descrito en la norma ASTM - E112-13 (ASTM, 2013), se obtiene que el tamaño de grano ASTM es 8.

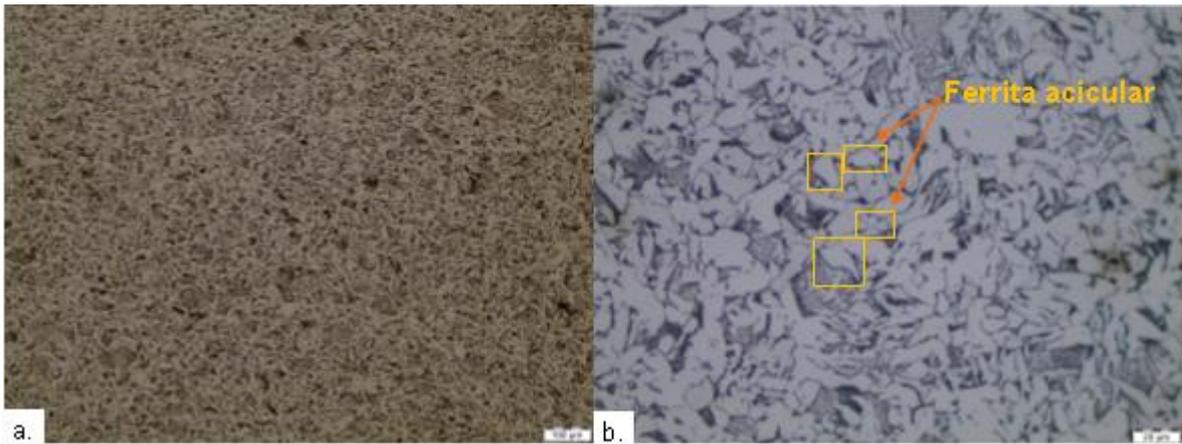


Figura 3.3. a) Micrografía de S-M-T-01 a 100X con ataque químico de Nital al 10%. b) Micrografía de S-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%.

(Fuente: Propia)

3.2.2.2. Zona afectada por el calor

Al observar las macrografías presentes en la Tabla 3.3 y las micrografías de las probetas OFC-M-T-01, PAC-M-T-01 y WEDM-M-T-01 presentes en la Tabla 3.4. se evidencia la zona afectada por el calor tras los procesos de corte. De manera cuantitativa, en la sección transversal de probeta evaluada (3000 μm), la zona afectada por el calor es 26,60 % para OFC, 12,67 % para PAC y 0,03 % para WEDM. En la Figura 3.4. se observan estas cifras estimadas en micras (μm), mientras que en la Tabla 3.19. el equivalente en porcentajes de las diferentes zonas evaluadas.

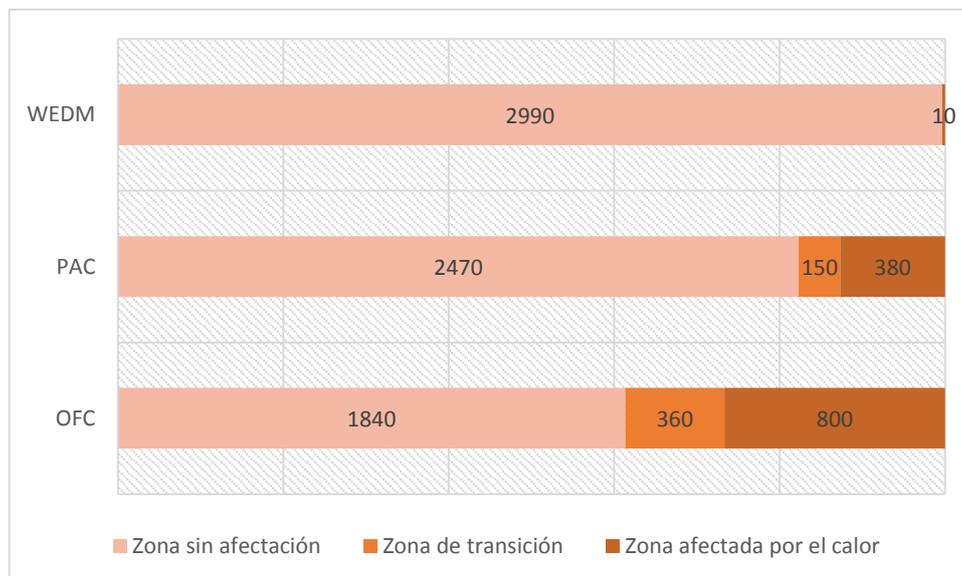


Figura 3.4. Transición de microestructura en la longitud transversal al corte para OFC, PAC y WEDM.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.19. Porcentajes de la zona afectada por el calor para los procesos OFC, PAC y WEDM.

| Probeta | Zona sin afectación (ZSA) | Zona de transición (ZT) | Zona afectada por el calor (ZAC) |
|-------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| WEDM-M-T-01 | 99,97 % | 0 % | 0,03 % |
| PAC-M-T-01 | 82,33 % | 5 % | 12,67 % |
| OFC-M-T-01 | 61,40 % | 12 % | 26,60 % |

(Fuente: Propia)

3.2.2.3. Cambio microestructural presente en ZAC de las probetas de OFC

Como se observa en la Figura 3.5.a. existe una zona de afectación por calor en el acero tras el proceso de oxicorte. Desde el borde de corte, hasta la extensión de la probeta ensayada (3000 μm de longitud estimada como el 100 % del área de análisis con microestructura ferrítica perlítica), se obtiene un 26,60 % correspondiente a la zona afectada por el calor, en la cual, se denota un gran crecimiento del tamaño de grano, como se indica en la Figura 3.5.b. En este porcentaje se observa la presencia de ferrita acicular gruesa, la cual disminuye su tamaño conforme se aleja del borde de corte.

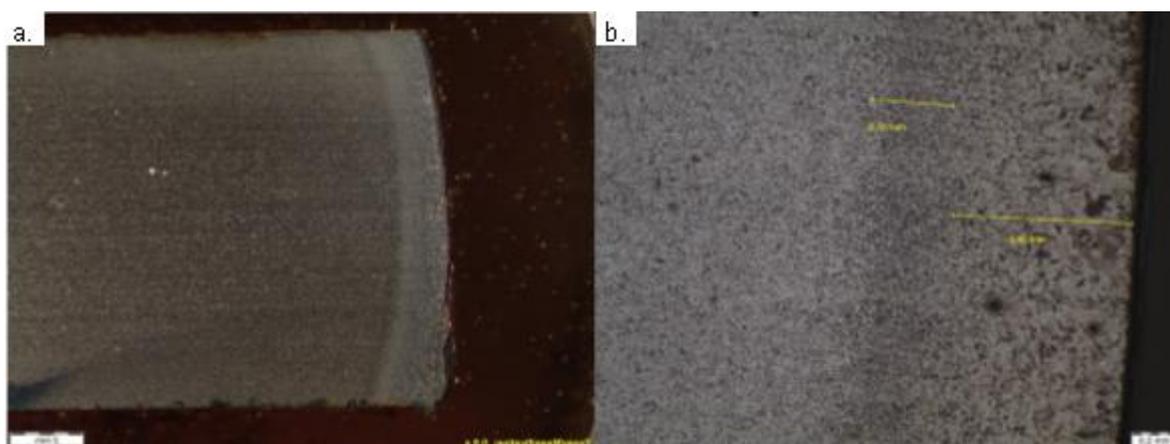


Figura 3.5. a) Macrografía de la probeta OFC-M-T-01. b) Micrografía de la ZAC en probeta OFC-M-T-01.

(Fuente: Propia)

Evaluando el área de la Figura 3.6.a. donde se obtiene un 75,05 % de ferrita y un 24,93 % de perlita, se observa la presencia de ferrita acicular gruesa. Una vez identificada esta característica, mediante el método de medición de grano por comparación descrito en la norma ASTM - E112, se denota que el tamaño de grano ASTM es 2, donde su forma se muestra en la Figura 3.6.b.

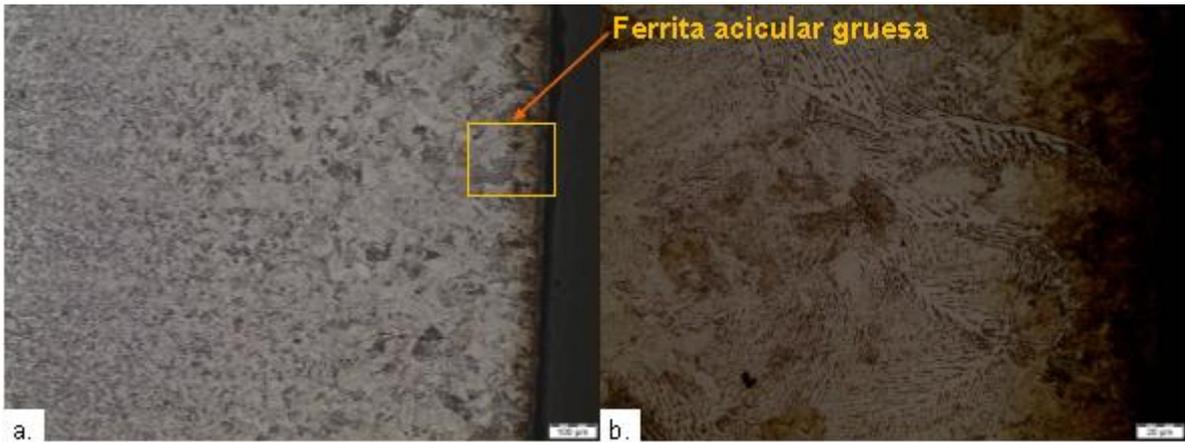


Figura 3.6. a) Micrografía de la probeta OFC-M-T-01 a 100X con ataque químico de Nital al 10%.
 b) Micrografía de la probeta OFC-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%.

(Fuente: Propia)

3.2.2.4. Cambio microestructural presente en ZAC de las probetas de PAC

Al observar la Figura 3.7.a se identifica la zona de afectación de calor en el acero tras el proceso de corte por plasma. Desde el borde de corte, se obtiene un 12,67 % correspondiente a la ZAC, como se indica en la Figura 3.7.b. En este porcentaje se observa la presencia de ferrita acicular fina, la cual tras una pequeña zona de transición del 5 %, retoma las características del material base.

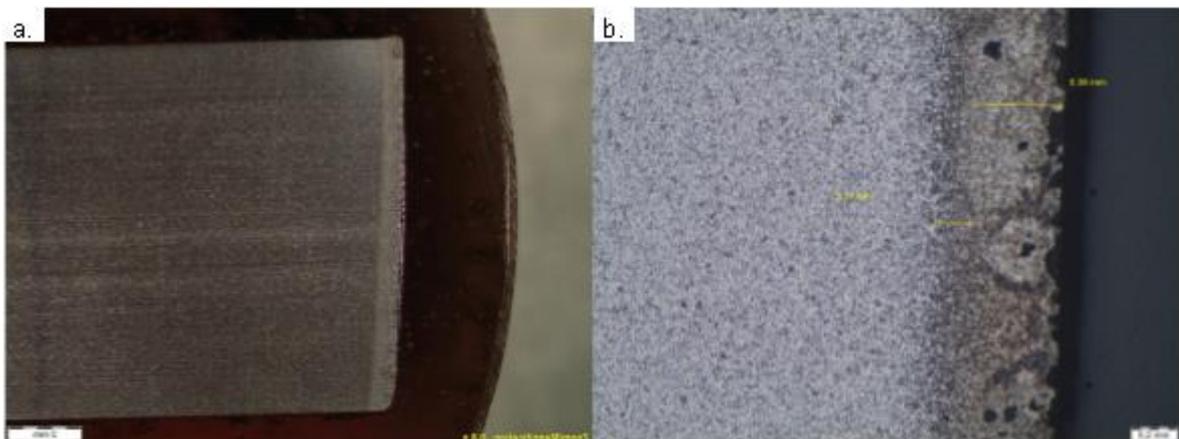


Figura 3.7. a) Macrografía de la probeta PAC-M-T-01. b) Micrografía de la ZAC en probeta PAC-M-T-01.

(Fuente: Propia)

En el área de la Figura 3.8.a. se determinó un 66,86 % de ferrita y un 33,14 % de perlita. La presencia de ferrita acicular fina se caracteriza por la formación de triángulos equiláteros, como se indica en la Figura 3.8.b. Al identificar esta característica, mediante el método de medición de grano por comparación descrito en la norma ASTM - E112, se observa que el tamaño de grano ASTM es 4.

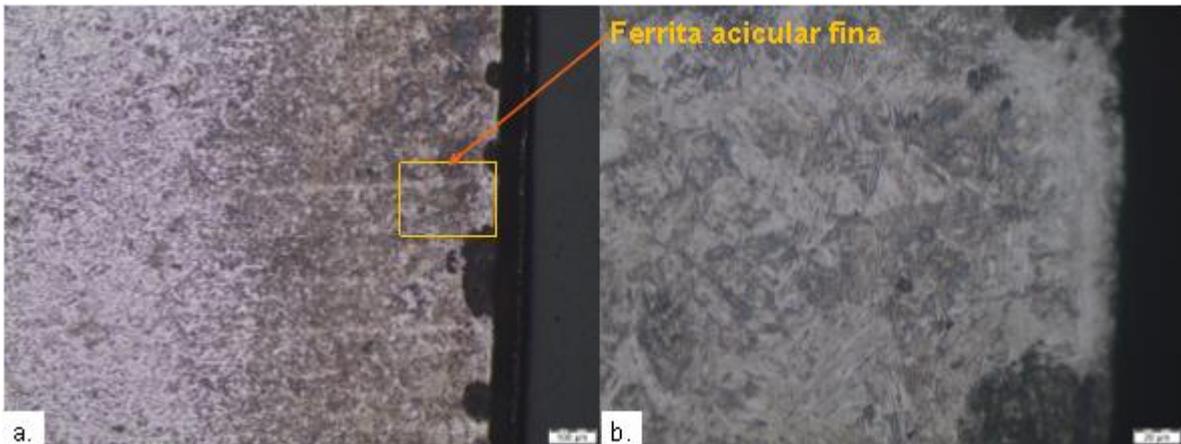


Figura 3.8. a) Micrografía de la probeta PAC-M-T-01 a 100X con ataque químico de Nital al 10%.
 b) Micrografía de la probeta PAC-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%.
 (Fuente: Propia)

3.2.2.5. Cambio microestructural presente en ZAC de probetas WEDM

En la Figura 3.9.a no se evidencia una zona de afectación de calor en el acero tras el proceso de corte por electrohilo. Sin embargo, al observar la Figura 3.9.b se identifica que la zona afectada por el calor es 0,03 %.

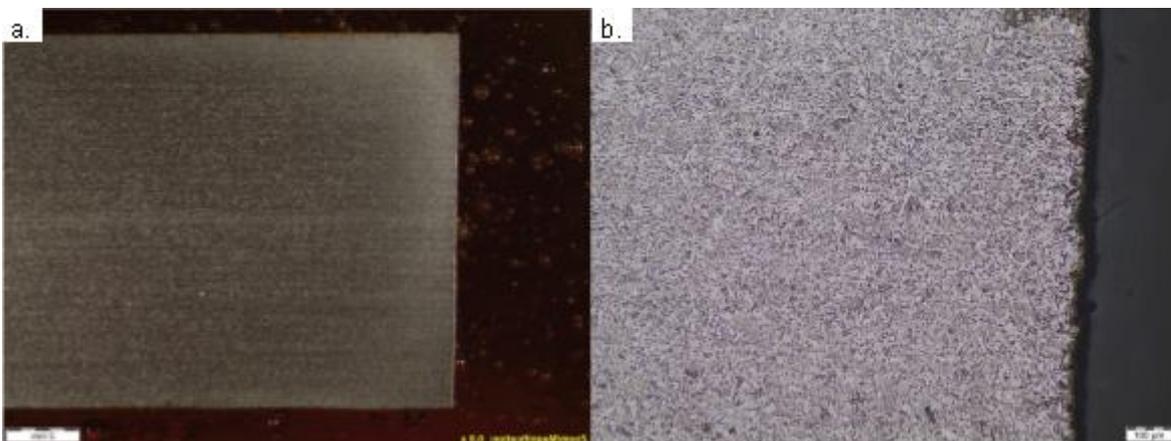


Figura 3.9. a) Macrografía de probeta WEDM-M-T-01. b) Micrografía de la ZAC en probeta WEDM-M-T-01.
 (Fuente: Propia)

Evaluando el área de la Figura 3.10.a. donde se obtiene un 77,50 % de ferrita y un 22,50 % de perlita, se observa en el borde la presencia de ferrita acicular alargada con un mínimo crecimiento de grano. Una vez identificada esta característica, mediante el método de medición de grano por comparación descrito en la norma ASTM - E112, se denota que el tamaño de grano ASTM es 7, donde su forma se muestra en la Figura 3.10.b.



Figura 3.10. a) Micrografía de la probeta WEDM-M-T-01 a 100X con ataque químico de Nital al 10%. b) Micrografía de la probeta WEDM-M-T-01 a 500X con ataque químico de Nital al 10%.

(Fuente: Propia)

3.2.2.6. Análisis comparativo microestructural entre procesos

Los componentes microestructurales de la plancha de acero, son aproximadamente 75% de ferrita y 25% de perlita. La característica fundamental de la microestructura es la ferrita acicular, la cual es producto de un enfriamiento rápido, experimentado en el proceso de laminado en caliente y terminado en frío, al contacto con los rodillos de laminación, los cuales se encontrarían a una temperatura inferior a la temperatura de recristalización del acero experimentada entre 400 °C a 700 °C según (Dorfman, 2005). Al realizar el corte mediante el proceso de OFC, en el cual se obtiene temperaturas cercanas a los 3000 °C, en un área amplia donde ocurre la transferencia de calor, existe la fundición del material al punto de corte y posteriormente un enfriamiento progresivo. Lo cual se traduce, en términos microestructurales, a un gran crecimiento del grano obteniendo así ferrita acicular gruesa. El grano pasa desde su tamaño original ASTM 8 a incrementar sus dimensiones hasta ASTM 2, como se observa en la Tabla 3.20.

En el proceso PAC, se denota la presencia de ferrita acicular fina, producto de un incremento de temperatura (arco plasma alrededor de 30000 °C) en un área equivalente a la mitad de la zona afectada por el calor en OFC (26,60 % ZAC de oxicorte a 12,67 % ZAC de corte por arco plasma). La diferencia entre estos procesos de corte, es que en el proceso de OFC existe una alta transferencia de calor en una zona más grande, entonces crea un crecimiento de grano más pronunciado que en el proceso PAC, como se indica en la Tabla 3.20. En el proceso de corte por arco plasma, existe un corte más enfocado, donde entrega una mayor cantidad de calor, pero en una zona más específica, por lo tanto esta zona se

caliente y se enfría mucho más rápido, aumentando las propiedades mecánicas como se denota en las siguientes secciones. Tras la obtención de las probetas con el proceso de corte por electrohilo, se obtiene un crecimiento de grano en el extremo de corte. La microestructura revelada en este extremo, corresponde a ferrita acicular, con un leve aumento del tamaño de grano en relación a la del material base, como se indica en la Tabla 3.20. La extensión de la afectación de calor de este proceso es mínima (menor a 10 μm según Figura 3.4.) y despreciable en comparación a los procesos de OFC y PAC.

Tabla 3.20. Tamaño de grano ASTM y microestructura de las probetas obtenidas ante los procesos de corte.

| Proceso | Microestructura | Tamaño de grano ASTM |
|---------------|-------------------------|----------------------|
| Material Base | Ferrita acicular | 8 |
| OFC | Ferrita acicular gruesa | 2 |
| PAC | Ferrita acicular fina | 4 |
| WEDM | Ferrita acicular | 7 |

(Fuente: Propia)

3.2.3. Análisis de microdureza

Con los datos de la Tabla 3.5. Tabla 3.6. Tabla 3.7. y Tabla 3.8. se obtiene una gráfica comparativa de dureza en función a la distancia de indentación, de las probetas sometidas a los procesos de corte por sierra, OFC, PAC y WEDM, como se indica en la Figura 3.11.

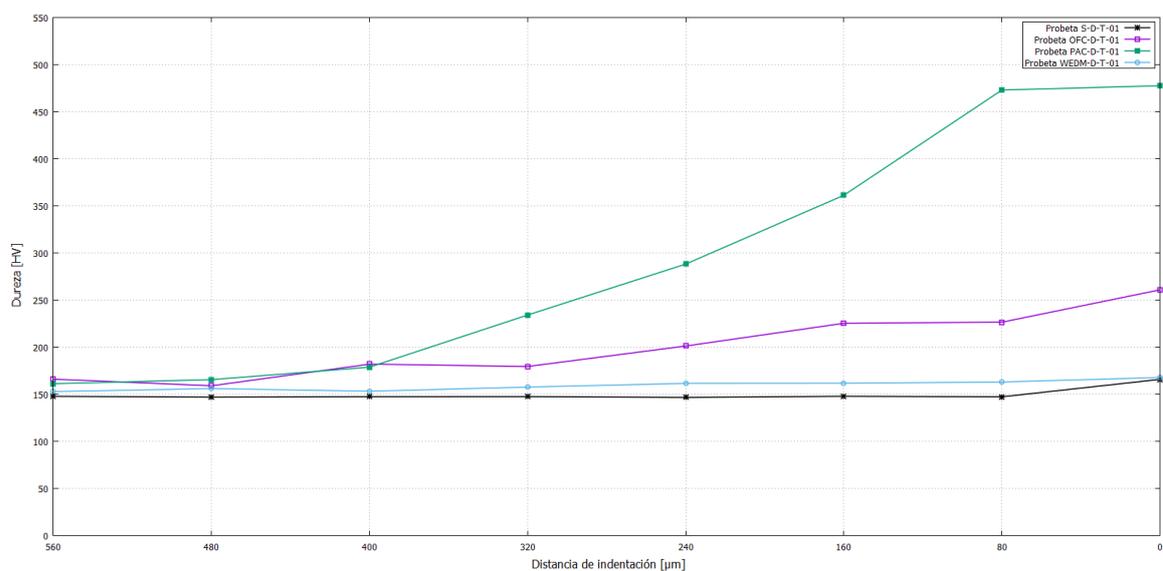


Figura 3.11. Valores de microdureza en superficie transversal de corte de las probetas obtenidas mediante sierra, OFC, PAC y WEDM.

(Fuente: Propia)

3.2.3.1. Microdureza presente en probetas de material base

El gráfico de microdureza en función a la distancia de indentación del material base, presente en la Figura 3.11. y en el ANEXO VII. representa el punto de partida en el análisis de microdureza, en el acero AISI 1010, la mayoría de especificaciones técnicas del material, muestran un valor promedio de 108 HV (Tingaev et al., 2016). Como se evidenció en la micrografía del material base de la Figura 3.2. el acero utilizado fue laminado en caliente y terminado en frío, lo cual produjo un endurecimiento del material, que se traduce en los valores de dureza obtenidos para esta probeta tabulados en la Tabla 3.5. ligeramente superiores, con un promedio de 149,59 HV, una desviación estándar de 6,54 y un coeficiente de variación de 4,37 %.

Debido a que el proceso de obtención para la caracterización del material base no tiene aportación de calor, la dureza no tiene variaciones significativas, tal como la Figura 3.11. muestra una línea recta con variaciones de pendiente despreciables.

3.2.3.2. Microdureza presente en probetas de OFC

Tomando en cuenta la disposición para el montaje de la probeta OFC-D-T-01, el resultado de las indentaciones, muestra la variación de los valores de dureza en la superficie adyacente a la cara de corte, desde el punto más cercano posible a la arista entre estas superficies, hacia el punto medio de la probeta. Con estos datos se pueden identificar tres zonas, tal como se esquematiza en la Figura 3.12. la primera, zona sin afectación, donde los valores de dureza son cercanos a los obtenidos en la probeta de material base, la segunda, que muestra un aumento en la dureza progresivo con valores intermedios, hasta llegar a la zona afectada por el calor, donde se encuentran los valores más altos registrados.

Para esta probeta, el valor máximo obtenido de 260,81 HV, presenta un incremento de 174 % con respecto al promedio de dureza de la probeta evaluada del material base. Esto responde a la transferencia de calor durante el proceso de corte, con un enfriamiento posterior a temperatura ambiente una vez que la operación de corte culminó, causando este endurecimiento.

Los valores de dureza dentro de esta zona afectada por el calor, se extienden una distancia de 800 μm que representa un 47,62 % de la distancia total de las indentaciones realizadas. La Tabla 3.21. resume los valores relevantes para cada zona identificada.

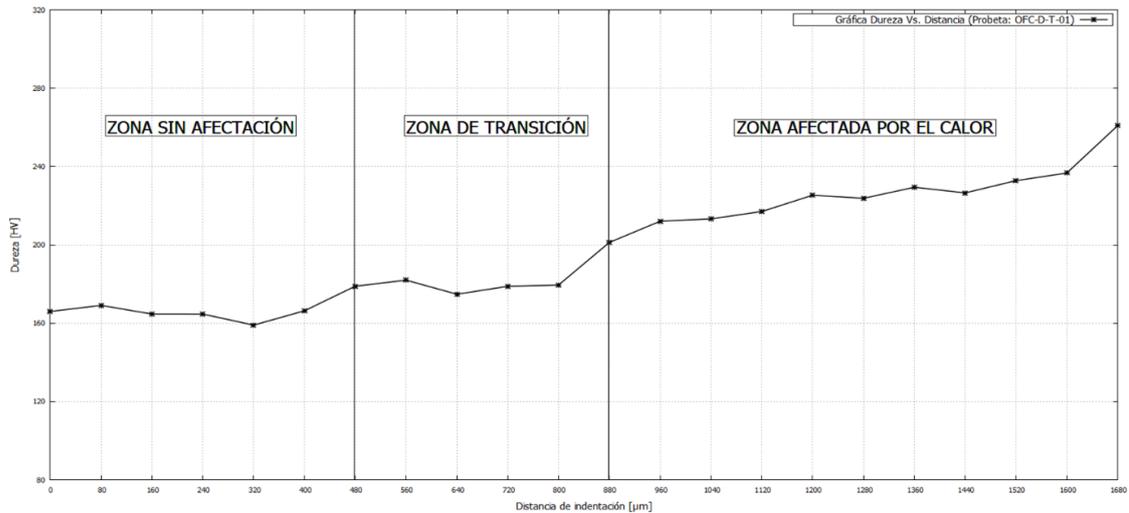


Figura 3.12. Gráfica dureza vs. distancia (zonas) OFC.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.21. Valores de dureza por zonas. Proceso OFC.

| Zona | Valor mínimo [HV] | Valor máximo [HV] | Valor promedio [HV] | Desviación estándar | Coficiente de variación [%] | Distancia[μm] |
|------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|
| ZSA | 158,97 | 169,03 | 164,90 | 3,33 | 2,01 | 480 |
| ZT | 174,72 | 181,92 | 178,73 | 2,59 | 1,45 | 400 |
| ZAC | 201,19 | 260,81 | 225,31 | 15,61 | 6,93 | 800 |

(Fuente: Propia)

3.2.3.3. Microdureza presente en probetas de PAC

Para la probeta PAC-D-T-01, al igual que en la probeta obtenida con el proceso de oxicorte, se distinguen tres zonas que son presentadas en la Figura 3.13. En la zona afectada por el calor, se encuentra el valor más alto de dureza correspondiente a 477,60 HV. El incremento con respecto al valor de dureza promedio del material base es del 317 %, la magnitud de este valor se debe a que tal como se expone en el apartado de variantes de proceso de corte con plasma de (Węglowski & Pfeifer, 2014), el arco de plasma alcanza temperaturas cercanas a los 30000 °C, además, el arco actúa sobre la superficie a cortarse de manera puntual, por lo que el enfriamiento ocurre rápidamente, endureciendo considerablemente la superficie.

Los valores de dureza que pertenecen a la zona afectada por el calor, se extienden en una distancia de 240 μm , valor que representa el 14,29 % de la distancia total entre las indentaciones realizadas. La información restante de las zonas identificadas para esta probeta se encuentra detallada en la Tabla 3.22.

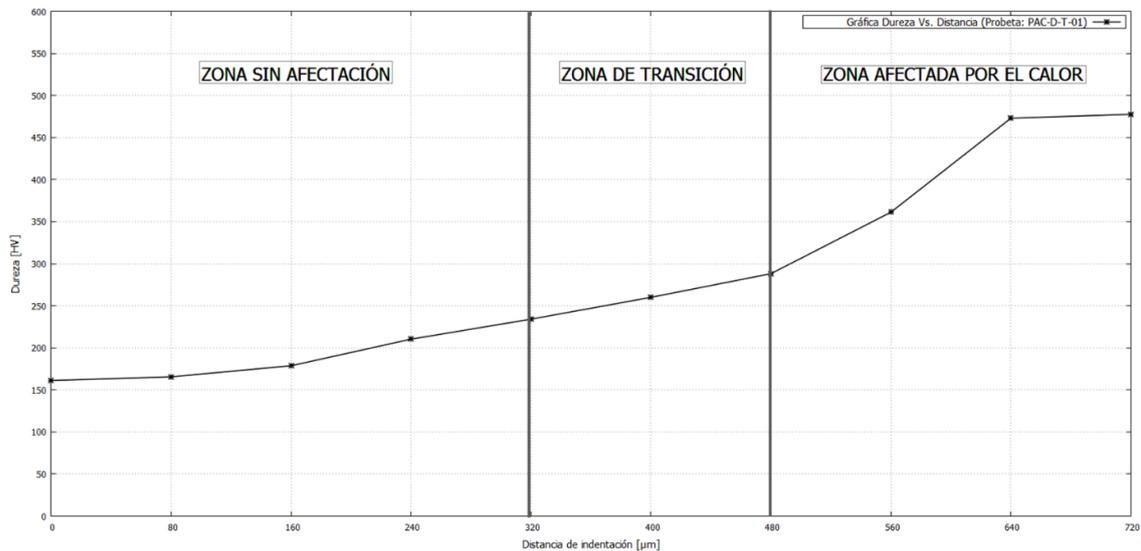


Figura 3.13. Gráfica dureza vs. distancia (zonas) PAC.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.22. Valores de dureza por zonas del proceso PAC.

| Zona | Valor mínimo [HV] | Valor máximo [HV] | Valor promedio [HV] | Desviación estándar | Coficiente de variación [%] | Distancia [μm] |
|------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ZSA | 161,14 | 178,72 | 168,44 | 5,43 | 5,44 | 320 |
| ZT | 210,31 | 288,18 | 248,15 | 13,51 | 13,51 | 160 |
| ZAC | 361,24 | 477,60 | 437,28 | 15,06 | 15,07 | 240 |

(Fuente: Propia)

3.2.3.4. Microdureza presente en probetas de WEDM

Las indentaciones realizadas en la probeta WEDM-D-T-01, que son representadas en la gráfica dureza en función de la distancia del ANEXO VII. a diferencia de las gráficas de las probetas de OFC y PAC, no presentan variaciones significativas en sus valores, por lo que, no se delimitan zonas. En este proceso, no es apreciable una zona afectada por el calor, pese a que existe calor generado por la chispa entre la pieza y el electrodo de tungsteno. El área por la que se transfiere el calor es muy pequeña, por lo que rápidamente éste se disipa a lo largo de la probeta, por ende, la dureza superficial no tiene cambios

significativos. El promedio de las mediciones corresponde a 157,92 HV, con una variación estándar de 5,20 y un coeficiente de variación del 3,30 %.

3.2.3.5. Análisis comparativo de dureza entre procesos de corte

Los resultados que arrojan las mediciones realizadas de probetas OFC-D-T-01, PAC-D-T-01 y WEDM-D-T-01 en términos de dureza, pueden compararse partiendo de la evidencia del cambio en los valores de esta propiedad, conforme las indentaciones son más próximas al filo de corte. Bajo esta premisa, el proceso de corte WEDM no altera la dureza superficial debido a que, el aporte de calor es despreciable, consecuencia de que no se puedan delimitar zonas de variación. Sin embargo, para los procesos de corte con oxígeno y plasma, la aportación de calor al material hace que la dureza experimente cambios en grandes magnitudes.

Tomando en cuenta los valores promedio en las zonas sin afectación, transición y afectada por el calor, de las Tablas 3.21. y 3.22. con respecto al valor promedio de las mediciones registradas en la probeta cortada con electrohilo, se construye el diagrama de barras de la Figura 3.14. en el cual esquematiza la comparación de valores promedio en las diferentes zonas determinadas.

Para el promedio de la zona sin afectación, los tres procesos muestran valores similares que representan la dureza promedio del material base. En la zona de transición, el valor promedio más alto de dureza, se presenta en la probeta cortada con plasma, con una diferencia porcentual respecto a la obtenida cortada con oxígeno de 27,98%. Para la zona afectada por el calor, la probeta cortada con plasma, tiene el valor promedio superior, siendo un 48,48 % mayor que el valor promedio de la probeta cortada con oxígeno.

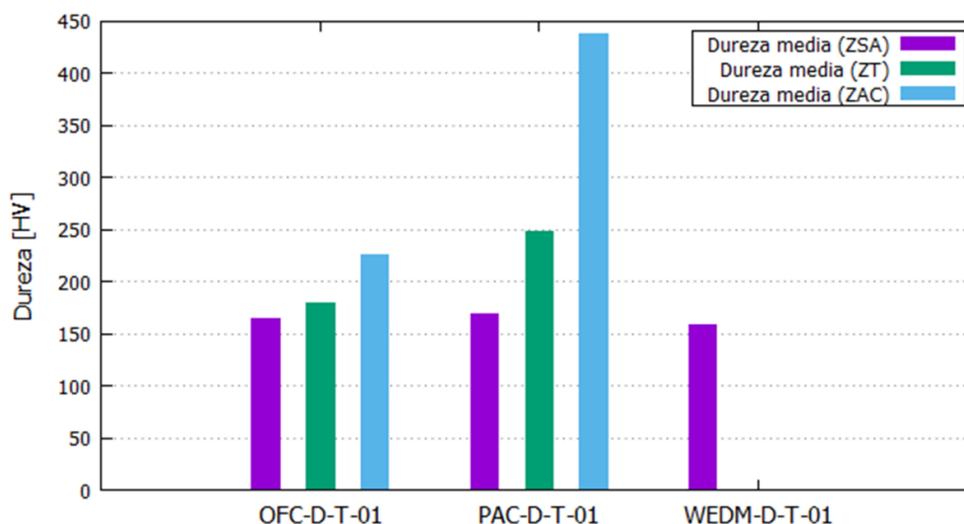


Figura 3.14. Gráfica comparativa de dureza media por zonas.

(Fuente: Propia)

3.2.4. Análisis de resistencia a la tracción

Como se observa en la Tabla 3.9. los valores de carga máxima, resistencia a la tracción y porcentaje de elongación, varían dependiendo del corte térmico aplicado. En general, para los procesos de corte térmico en placas de acero, al considerar que el aporte de calor tiene una influencia en la microestructura, también existirá dicha influencia en la distribución de los esfuerzos residuales que determina las propiedades mecánicas y el desempeño de las piezas cortadas con estos procesos (Martín-Meizoso et al., 2014). En la Figura 3.15. se observa que el mayor valor de carga máxima registrada, es para el proceso de corte por arco plasma, siendo este 73718 N. De igual manera, para este proceso se registra el mayor valor de resistencia a la tracción, 532,35 MPa, como se observa en la Figura 3.16. Estos valores, revelan que tras el proceso de corte por PAC, existe un incremento en las propiedades mecánicas del material base. Esto se debe a las características del borde de corte, en la cual existe una elevada transferencia de calor en una longitud de 360 μm .

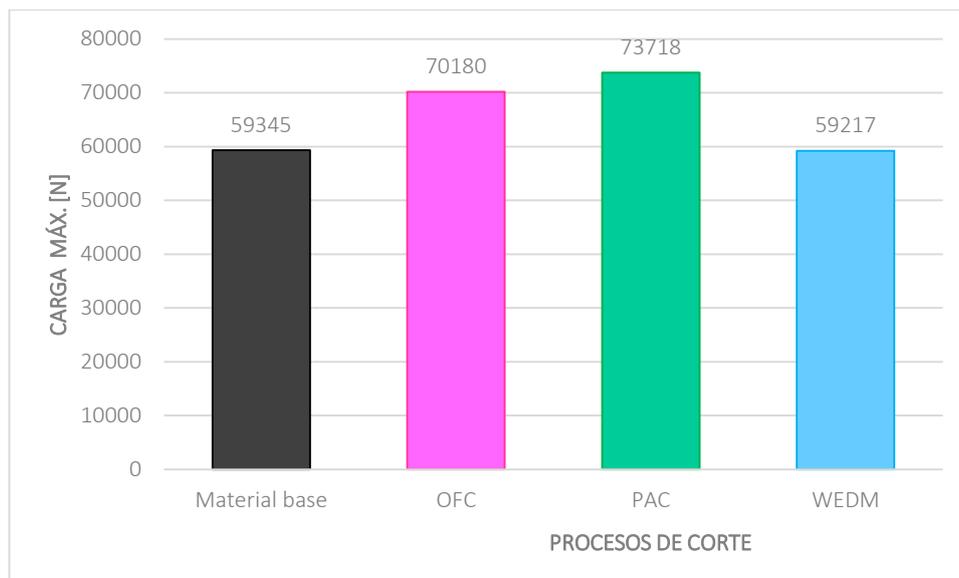


Figura 3.15. Carga máxima registrada para los procesos de corte bajo el ensayo de tracción según la norma ASTM-E8.

(Fuente: Propia)

Tomando como referencia, el promedio de la resistencia a la tracción del material base (464,25 MPa), existe un ligero incremento en la resistencia a la tracción, para las probetas ensayadas, tras el proceso de WEDM (472,75 MPa). Sin embargo, como se observa en la Figura 3.16. para el proceso de OFC este valor disminuye (457,75 MPa). Una consideración para este decremento, es la existencia de una superficie irregular, con valles y crestas en el borde de las probetas, lo que se estima como una concentración de esfuerzos causada por estas imperfecciones.

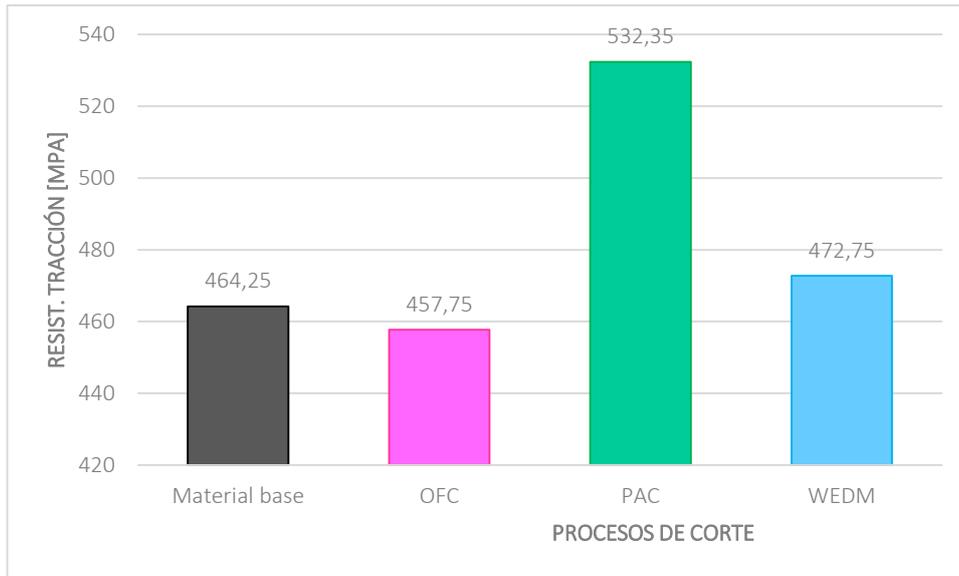


Figura 3.16. Resistencia a la tracción para los procesos de corte bajo el ensayo de tracción según la norma ASTM-E8.
(Fuente: Propia)

Tras el ensayo de resistencia a la tracción, el aumento de longitud que se evidencia en la zona calibrada de 50 mm, es mayor en el proceso de corte por electrohilo con un 38,85 %, como se indica en la Figura 3.17. En este proceso de corte, la zona de deformación plástica es mayor, puesto que, no existe afectación de calor considerable por parte del electrodo de tungsteno.

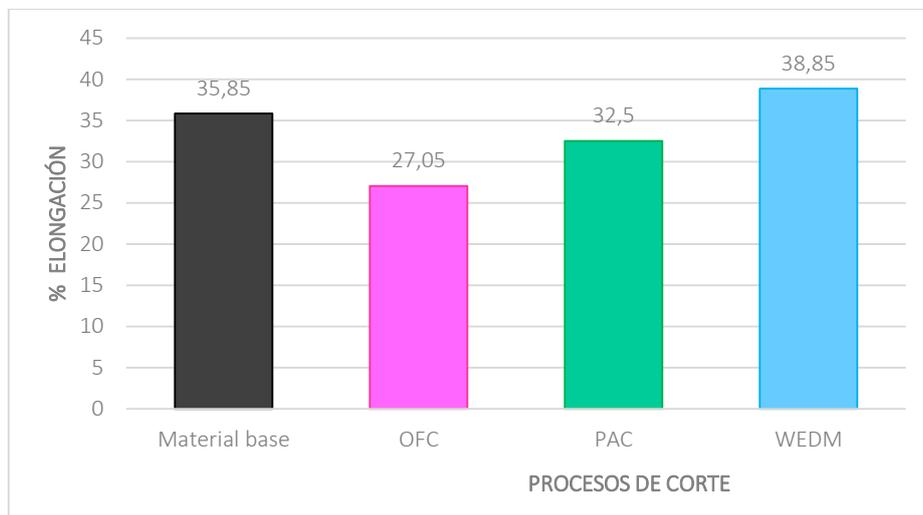


Figura 3.17. Porcentaje de elongación en 50 mm de zona calibrada para los procesos de corte bajo el ensayo de tracción según la norma ASTM-E8.
(Fuente: Propia)

Con los valores mencionados en la Tabla 3.9. se obtiene la gráfica comparativa de esfuerzo en función del desplazamiento del cabezal, de las probetas sometidas a los procesos de corte por sierra, OFC, PAC y WEDM, como se indica en la Figura 3.18.

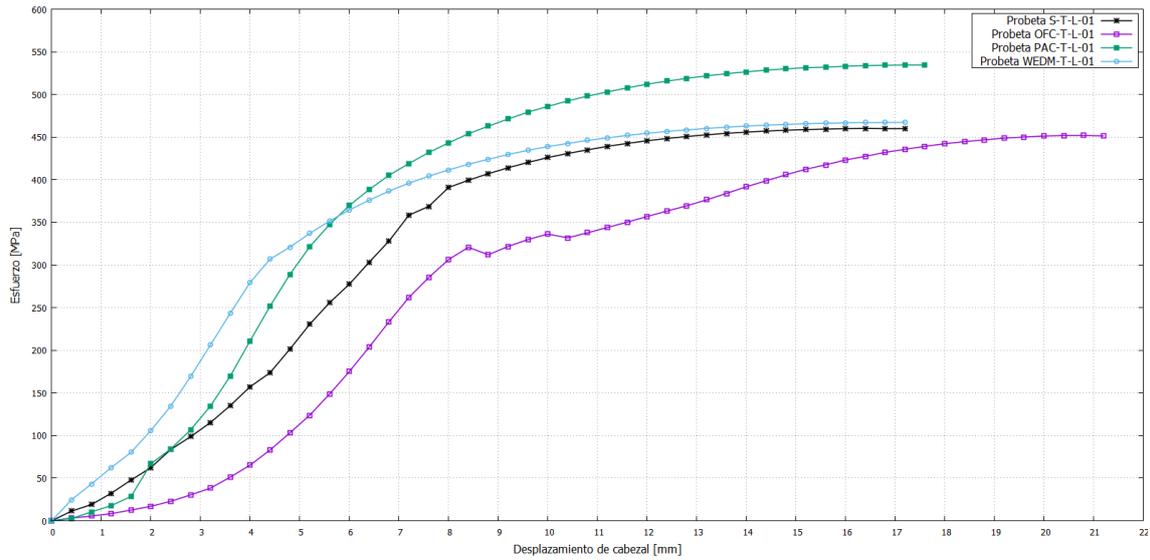


Figura 3.18. Valores de esfuerzo en función del desplazamiento del cabezal de las probetas obtenidas mediante sierra, OFC, PAC y WEDM.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.18. y en el ANEXO VIII. se observan las curvas del esfuerzo en función del desplazamiento del cabezal móvil, para el material base y para los procesos por corte térmico implementados en este estudio. De ese compendio, resaltan las propiedades mecánicas del proceso de corte PAC, la cual presenta una mayor zona elástica en relación a los procesos de OFC y WEDM.

3.2.5. Análisis de rendimiento en los procesos de corte

Para este análisis, es necesario relacionar los resultados de la tasa de remoción de material, ancho de corte, velocidad de la operación y la escoria producida, para obtener un enfoque integrado acerca del rendimiento de los procesos de corte.

Comenzando por la tasa de remoción, la capacidad de remover material en volumen por minuto, que, como se evidencia en la Figura 3.19. tiene su valor más alto en el proceso de corte con oxígeno. Asociado directamente con esta característica en un proceso de corte, se encuentra el ancho o brecha, de igual manera, con un valor mayor en el proceso OFC. Para la velocidad de corte, que mide los milímetros cortados por segundo, PAC, es superior en esta característica frente a los demás procesos. Por último, la escoria producida durante las operaciones de corte, en menor cantidad, se obtiene en el proceso WEDM.

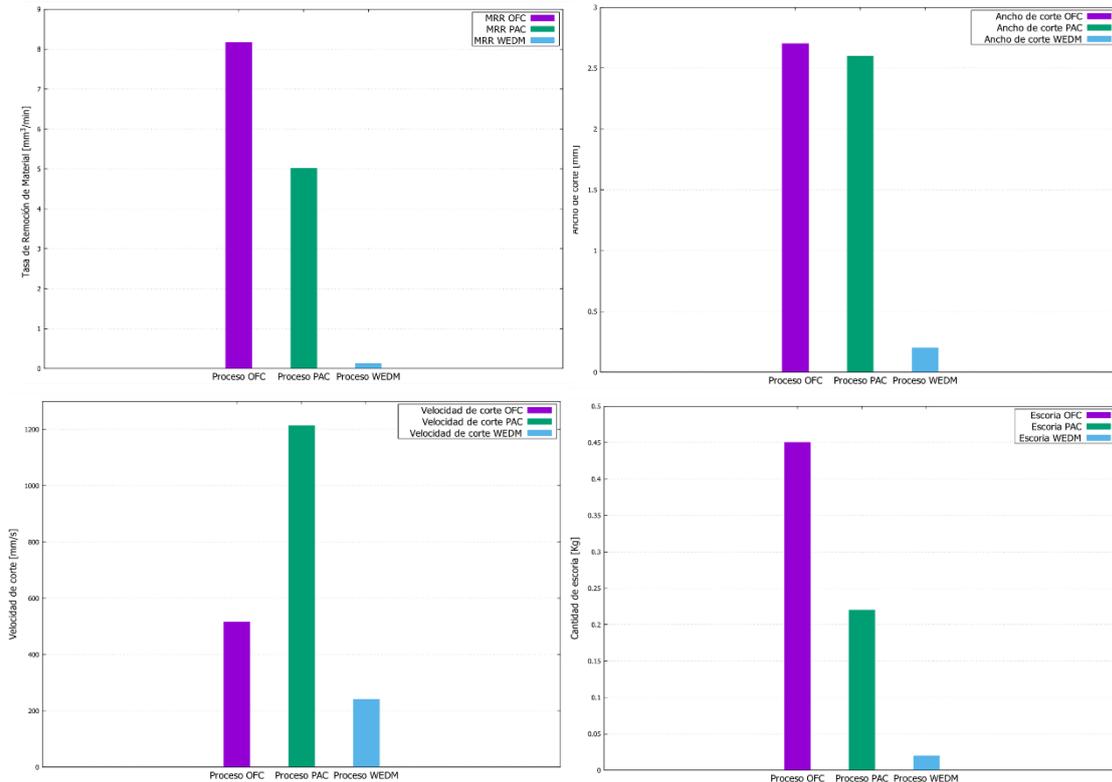


Figura 3.19. Parámetros de rendimiento en procesos de corte.

(Fuente: Propia)

Si bien, se puede observar una capacidad de remover material mayor en OFC, el ancho de corte que deja a su paso a través del material, es más amplio que en los procesos restantes, lo que se refleja también en la mayor generación de escoria, que, en términos de producción, su rendimiento debe condicionarse con la cantidad de desperdicio que genera, además de no ser el proceso más rápido.

Para el proceso de corte con Plasma, si bien no es el proceso que remueve más material, es el que más rápido se desplaza a través él, dejando una brecha menor que se evidencia en una producción de escoria menor que en OFC, siendo, desde el punto de vista productivo, el que mejor rendimiento ofrecería en operaciones de corte.

Por último, el proceso de corte con Electrohilo, en términos de rendimiento, posee las características que lo dejan por debajo de los procesos OFC y PAC. Dentro de estos parámetros, el único que destaca es la producción mínima de desperdicio.

3.2.6. Análisis de costos de operación entre procesos de corte

Partiendo de los costos fijos, este valor, únicamente se presenta en los procesos de corte con Plasma y Electrohilo, debido a que, en el estudio, el proceso OFC fue llevado a cabo de manera manual, por lo que el recurso de un dibujante y programador no se utilizó. Dentro de los costos totales, esta mano de obra indirecta, representa un 0,38 % para el para el proceso PAC y 1,35 % para el proceso WEDM.

Para los costos de insumos, valores en los que, para todos los procesos, coinciden en ser el rubro más relevante de la operación, el proceso de corte con electrohilo presenta el costo más alto, correspondiendo el 96,98 % del total de costos incurridos, para el proceso PAC, un 92,26 %, y en el proceso OFC un 99,46 %.

Con una menor participación, se encuentra el consumo de energía eléctrica, para el corte con arco plasma, representa el 6,98 % de los costos totales, en el corte con electrohilo representa el 0,24 %. El costo de mano de obra, en el proceso OFC, incurre en un 0,54 %, para el proceso PAC en un 0,38 % y para el proceso WEDM, en un 1,25 %. El resumen de estos costos es mostrado en la Figura 3.20.

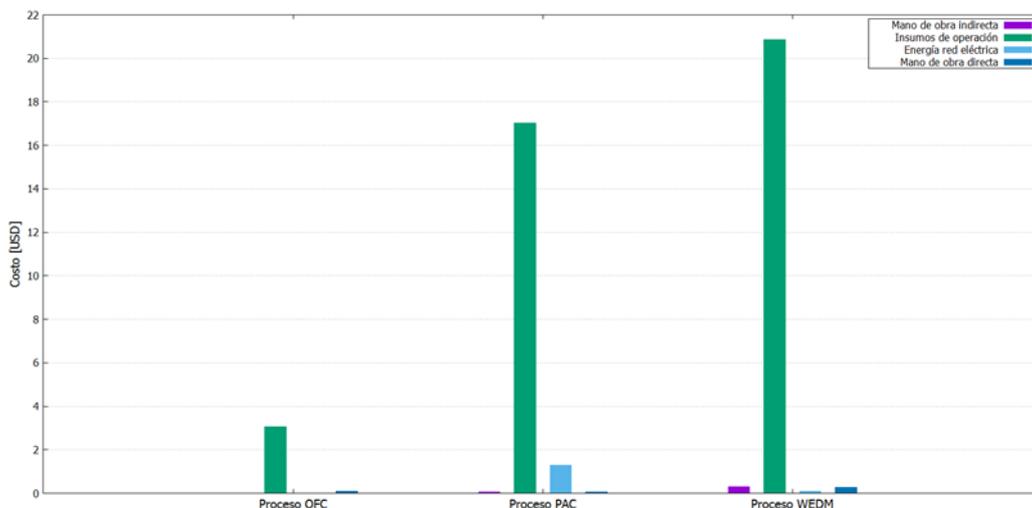


Figura 3.20. Costos fijos y variables en los procesos de corte.

(Fuente: Propia)

a. Costos asociados a la inversión

El análisis de la sección 3.2.6, está limitado a los resultados de la obtención de las probetas del estudio, sin embargo, para presentar un enfoque más amplio, partiendo desde la adquisición de los equipos de corte, es necesario definir los costos asociados a la inversión,

para adicionarlos con los operativos. La Tabla 3.23. resume los costos de inversión para los proceso de corte.

Estos datos muestran que la inversión de mayor valor le corresponde al corte con arco plasma, seguido, se encuentra el corte con electrohilo, la diferencia con el primero es de 360,64 USD. La inversión de menor valor se presenta en el corte con oxígeno, tomando en cuenta, que se evaluó este rubro para realizar la operación manualmente.

Tabla 3.23. Costos de inversión en procesos de corte.

| Proceso de corte | Descripción de inversión | Costo [USD] | |
|-------------------------|--|--------------------|----------|
| OFC | Tanque de Oxígeno 6 m ³ | 260,47 | |
| | Tanque de Acetileno 6 m ³ | 260,49 | |
| | Antorcha con reguladores y mangueras incluidas | 750,00 | |
| | | Total: | 1270,96 |
| PAC | Compresor 5HP | 1354,39 | |
| | Mesa de corte 1,50 X 3 m | 25000,86 | |
| | Equipo de corte con Plasma con antorcha para mecanizado incluida | 6228,96 | |
| | | Total: | 32484,20 |
| WEDM | Máquina para corte con hilo, sistema de refrigeración, tablero CNC incluidos | 32123,56 | |
| | | Total: | 32123,56 |

(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones

- Se han cumplido los objetivos planteados en esta investigación, analizando los efectos producidos ante la aplicación de los procesos de corte OFC, PAC y WEDM, donde se han determinado los cambios microestructurales y variaciones en las propiedades mecánicas a través de los ensayos realizados de resistencia de tracción, microdureza y análisis metalográfico.
- Con los resultados obtenidos en el ensayo de tracción y en la caracterización mecánica, se determina la resistencia última a la tracción y la variación de esta propiedad con respecto al material base, siendo las probetas cortadas con plasma, donde se reporta el valor más alto.
- Los valores registrados en el ensayo de dureza, para las probetas obtenidas bajo los procesos de corte PAC y OFC, muestran la afectación producida por la adición de calor durante el corte y el enfriamiento que ocurre seguido a esta operación, siendo en el proceso PAC donde se obtienen los valores más altos, en OFC la mayor extensión de la afectación, mientras que, para el proceso WEDM se mantienen los valores de dureza originales.
- El análisis de costos, muestra que los valores a los que se incurre durante la operación, son mayores para el proceso WEDM. La inversión de mayor valor le corresponde al proceso PAC. Pese a esto, es la opción que presenta un mayor número de milímetros cortados por minuto, característica que hace al proceso más rentable en escenarios a gran escala de servicio de corte y producción de piezas en acero.
- En términos de aprovechamiento de material a cortarse, el proceso OFC muestra las condiciones menos favorables, pues es el que mayor ancho de corte presenta y el de mayor generación de escoria.
- El tipo de acabado superficial tras el proceso de WEDM, presenta mejores características a diferencia de los procesos PAC y OFC, siendo oxicorte el proceso que necesariamente requiere un posterior proceso de desbaste para mejorar la calidad superficial.
- Para el acero de bajo carbono, la afectación térmica cuantitativa, en la sección perpendicular a la dirección de corte, tras el proceso de OFC es mayor en comparación a los procesos de PAC y WEDM. En este estudio se registró 26,60 % para OFC, 12,67 % para PAC y 0,03 % para WEDM.

- En la ZAC para los aceros de bajo contenido de carbono, se produce un crecimiento de grano en la ferrita acicular, experimentado por la cantidad de calor transferida en función del área de incidencia.
- Para los aceros de bajo contenido de carbono, en la ZAC, tras el proceso de OFC se obtiene micro estructuralmente ferrita acicular gruesa, para el proceso de PAC ferrita acicular fina y para WEDM no existe alteración microestructural, en función al material base.
- El tamaño de grano microestructural obtenido tras el proceso de OFC es ASTM 2, para el proceso de PAC es ASTM 4 y para el proceso de WEDM es ASTM 7, contrastando del tamaño ASTM 8 característico del material base.
- Ante la aplicación de los cortes térmicos, existe un incremento de las propiedades mecánicas originales del material base, en la ZAC por los procesos de PAC y WEDM. Sin embargo, para OFC la evaluación se ve afectada por la irregularidad de la superficie, reduciendo estas propiedades con relación a los originales.
- Las propiedades mecánicas y microestructurales se encuentran ligadas, puesto que, al variar la microestructura por los procesos de corte térmico, en los aceros de bajo contenido de carbono, varía la microdureza y la resistencia a la tracción.

4.2. Recomendaciones

- Para realizar estudios de caracterización de las propiedades mecánicas de un acero, se debe garantizar la adquisición de un material base sin afectación de calor adherida por los procesos de producción.
- Realizar los procesos de corte térmico considerando las especificaciones técnicas emitidas por los manuales del operador o del fabricante de los equipos.
- Para realizar un análisis comparativo entre procesos de corte térmico, aplicar procedimientos de corte automatizados, evitando en lo posible, parámetros distorsionados mediante el uso de técnicas manuales.
- Para la obtención de la variación microestructural en la ZAC, preparar la superficie perpendicular a la dirección de corte mediante un proceso de separación de la muestra en frío, evitando posteriores procesos de desbaste.
- En el ensayo de microdureza, se debe percatar la distancia restante desde la última indentación realizada al filo de corte, para evitar mediciones que aumenten la dispersión de los datos obtenidos.
- Al realizar el ensayo de resistencia a la tracción, se recomienda el uso de un extensómetro en la zona calibrada de la probeta, para obtener valores reales de

deformación y evitar lecturas falsas debido al deslizamiento existente entre la mordaza de los cabezales y la probeta.

- No se recomienda el uso del proceso OFC para la obtención de probetas según la norma ASTM-E8, debido a su acabado superficial irregular.
- Previo al análisis microestructural, se recomienda realizar una espectrometría del acero para evidenciar su composición química y así obtener una lectura adecuada de los componentes microestructurales que lo caracterizan.
- Para el análisis de resistencia a la tracción en la ZAC, se recomienda extraer la probeta en el área del filo de corte, en sentido longitudinal, para la obtención de sub especímenes mencionados en la sección 6. de la norma ASTM-E8.
- Al efectuar el análisis de costos en los procesos de corte térmico, se recomienda añadir la relación existente entre la duración y reemplazo de los consumibles utilizados en cada proceso.
- Para un estudio futuro, se recomienda incluir al presente análisis, el estudio del proceso de corte por chorro de agua a presión y los efectos producidos que ocasiona al material.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ALACERO. (2018). Producción de Acero de América Latina. *Artículo de La Asociación Latinoamericana Del Acero*, 0, 20. <https://www.alacero.org>.
- ASTM. (2013). *ASTM E112 - 13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. ASTM International.
- ASTM. (2016). *ASTM E8 / E8M-16: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
- ASTM. (2017a). *ASTM E3 - 11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. ASTM International.
- ASTM. (2017b). *ASTM E415-17: Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*. ASTM International.
- ASTM. (2017c). *ASTM E92-17: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. ASTM International.
- Black, J. T., & Auburn University. (1999). Machining. *ASM Metals Handbook*, 16, 368.
- BOC. (2012). BOC Guidelines for Welding and Cutting. *BOC*, 0, 4–58. <http://www.boc.com.au>.
- DIN. (2002). *DIN 4769-1: Roughness Comparison Specimens; Technical Condition Of Delivery, Application*.
- Dorfman, M. R. (2005). Thermal spray coatings. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 405–422.
- EI-Hofy, H. A. (2005). *Advanced Machining Processes* (McGraw-Hill).
- ESAB. (2006). Factors affecting quality in oxy-fuel cutting. *ESAB*, 0(2), 21. <http://www.esabna.com>.
- Estupiñan, P., & Estupiñan, I. (2020). *ILPM Engineering*.
- Harish, M., & Babu, P. K. (2017). Analysis Of Oxy-Fuel Cutting Process Parameters Using Grey-Taguchi Technique For Mild Steel HRE350. *International Journal of Innovative Technology and Research*, 5(2), 5777–5783. <http://www.ijitr.com>.
- Hypertherm. (2016). Machine-side reference guide 803640. *Plasma Cutting Process*, 1, 6–8.
- Hypertherm. (2019). Powermax65/85 Operator Manual (Plasma Arc Cutting Systems). *Arc, Plasma Systems, Cutting Manual, Operator*, 2, 24–32.
- Linde Specialist Plasma Arc. (2011). Facts about plasma technology and plasma cutting. *BOC*, 2, 12. <https://www.boc-gas.co>.
- Martín-Meizoso, A., Aldazabal, J., Pedrejón, J. L., & Moreno, S. (2014). Resilience and ductility of Oxy-fuel HAZ cut. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 30, 14–22.
- Patel, J. D., & Maniya, K. D. (2018). A Review on: Wire cut electrical discharge machining process for metal matrix composite. *Procedia Manufacturing*, 20, 253–258. <https://doi.org>.
- S. Alsoufi, M., & K. Suker, D. (2018). Experimental Investigation of Wire-EDM Process Parameters for Surface Roughness in the Machining of Carbon Steel 1017 and Aluminum Alloy 6060. *American Journal of Mechanical Engineering*, 6(3), 132–147.
- Sharma, N. (2011). *Study of Process Parameters in Plasma Arc* (Issue July).
- Sommer, C. (2012). Wire EDM Fundamentals. *Complete EDM Handbook*, 0, 41–43.
- Tingaev, A. K., Gubaydulín, R. G., & Ilin, I. A. (2016). Study of the Effect of Thermal Cutting on the Microstructure and Chemical Composition. *Procedia Engineering*, 150(December), 1783–1790.
- Tušek, J., & Šraj, M. (2007). Oxy-hydrogen flame for cutting of steels. *Metalurgija - Pregledni Rad*, 0, 211–215.
- TWI Ltd. (2020). *Oxyfuel Cutting - Process and Fuel Gases*. <https://www.twi-global.com>.
- Vander Voort, & Baldwin, W. (2004). Metallography and Microstructures Handbook. *ASM Metals Handbook*, 9, 2733. <http://www.worldcat.org>.
- Węglowski, M. S., & Pfeifer, T. (2014). Influence on Properties of the Cut Edges. *Advances in Manufacturing*, 38(2), 11.

6. ANEXOS

6.1. ANEXO I. Certificado de calidad de la plancha de acero

| 订购单位 CUSTOMER | | 新沙国际有限公司 | | 用户代码CUSTOMER CODE | | R00023 <th colspan="2">签发日期 DATE OF ISSUE</th> <td colspan="2">20140617 </td> | | 签发日期 DATE OF ISSUE | | 20140617 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------|--|-------------|----------------------|----------|--|--------------|----------------------------|----|----------|----|----------------|----|------|----|------|--------|-------|-------|-------------|-------------|------|----------|------|----------------|--------|--------------|-------------|----------------|--|--|
| 产品名称 PRODUCT | | Carbon Structural Steel | | 合同号CONTRACT NO. | | HES0910006 | | 交货日期 DATE OF DELIVERY | | 20140615 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 牌号 STEEL GRADE | | A36-B | | 原证书号CERTIFICATE NO. | | R0841207HES040005 | | 出库单号 DELIVERY ID. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 标准 SPECIFICATION | | ASTM A 36/A 36M-08 | | 许可证号 LICENSE NO. | | | | 交货状态 *7CONDITION OF SUPPLY | | AR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 序号 NO | 钢卷号 COIL NO. | 生产日期 DATE OF PRODUCTION | 炉号 HEAT NO. | 尺寸及重量 | | 化学成分 | | | | | | | | | | 拉伸试验 | | | | | 冲击试验 | | | 洛氏试验 | | | 弯曲 BEND TEST | 硬度 Hardness | 晶粒度 Grain Size | | |
| | | | | 厚度 THICKNESS | 宽度 WIDTH | 数量 QTY | 重量 MASS (kg) | C | Si | Mn | P | S | B | Cu | Al | 位置方向 | 屈服 ReL | 抗拉 Rm | 伸长 EL | 断后伸长率 YR *4 | 断面收缩率 RA *5 | 位置方向 | 冲击功 2mmV | 位置方向 | 温度 TEMPERATURE | 硬度 HRC | | | | | |
| 1 | C466947200 | 20140610 | 0472005477 | 10.00 | 1,5001 | 25490 | L | 15 | 20 | 46 | 17 | 5 | 12 | 4 | 3 | B,C | 365 | 490 | 38 | 0.74 | | | | | | | | | | | |
| 2 | C466947300 | 20140610 | 0472005477 | 10.00 | 1,5001 | 25570 | L | 15 | 20 | 46 | 17 | 5 | 12 | 4 | 3 | B,C | 365 | 490 | 38 | 0.74 | | | | | | | | | | | |
| 合计 Total | | 2 PIECE(S) | | 51060 KG | | 外观及尺寸 VISUAL AND DIMENSIONS | | ACCEPTABLE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 备注 REMARK | | 1. 兹证明此材料系用氧气顶吹转炉方法冶炼,并经炉外精炼,符合执行标准要求,并经检验合格。 We hereby certify that the material has been made to the applicable specification by the BASIC OXYGEN(LD)+SECONDARY REFINE process and has been satisfactorily tested in accordance with SPECIFICATION for Classification. 2. 本产品不含有害元素。It is guaranteed that the products don't contain radiochemical. | | | | | | | | | | 超声波探伤 T.: 承诺符合 | | 中 标准 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 注释 NOTES | | *1分析成分ANALYSIS; *2熔体分析PRODUCT ANALYSIS; *3位置方向LOCATION AND ORIENTATION; B-尾部BOTTOM, T=头部TOP, C-纵向TRANS., L-纵向LONGI, A-30 TO ROLLING DIRECTION, D=45 TO ROLLING DIRECTION, Z-板厚方向THROUGH-THICK, *4标距 L = GAUGE LENGTH; 矩形试样片 RECTANGULAR L1=5.65*SQRT(S0), L2=50mm(2"), L3=80mm, L4=200mm(8"), L5=1.38*SQRT(S0), L6=70mm; 圆形试样片 ROUND L7=50mm(2"), L8=5D 1.9*50mm(2"), *4屈服比YIELD RATIO *5断面收缩率REDUCTION OF AREA *6 试样厚度SAMPLE THICKNESS *7交货状态 CONDITION OF SUPPLY; N-正火 NORMALIZED, NT-正火+回火 NORMALIZED AND TEMPERED, N=正火NORMALIZED, QT-淬火+回火 QUENCHED AND TEMPERED, CR-控制轧制CONTROLLED ROLLED, TM-Thermo-Mechanical Controlled processing(TMCP) AR-普通轧制AS ROLLED *T(S), A1-TOTAL(SOLUBLE) A1 *SF 脆性断口之比 SHEAR FRACTION, *SA 剪切面积之比 SHEAR AREA. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 合格 PASS | | 质检印信 SEAL (1) VISA | | 注意事项 ATTENTIVE ITEMS | | 质量证明书复印件不作有效证明文件除非盖章。 The copy of this Certificate is not valid except stamped. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

6.2. ANEXO II. Informe técnico de la espectrometría por chispa

|  |  |  | | | | | | |
|---|---|--|--------|------------------------------|------------------------|------------------|-----------|--|
| ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE MATERIALES LABORATORIO DE FUNDICIÓN | | | | | | | | |
| INFORME TÉCNICO | | | | | | | | |
| Solicitado por: Ing. Galo Homero Barragán Msc. | | | | | | | | |
| Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa | | | | | | | | |
| Fecha: 11 de noviembre del 2019 | | | | | | | | |
| Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca | | | | | | | | |
| Descripción: Muestra de material metálico | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 1. ANTECEDENTES. | | | | | | | | |
| Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de material metálico. | | | | | | | | |
| Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada. | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA. | | | | | | | | |
| La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación: | | | | | | | | |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th style="width: 33%;">Nombre</th><th style="width: 33%;">Identificación de la probeta</th><th style="width: 33%;">Identificación Gráfica</th></tr></thead><tbody><tr><td style="text-align: center; vertical-align: middle;">MUESTRA METÁLICA</td><td style="text-align: center; vertical-align: middle;">Sample M1</td><td style="text-align: center; vertical-align: middle;"></td></tr></tbody></table> | | | Nombre | Identificación de la probeta | Identificación Gráfica | MUESTRA METÁLICA | Sample M1 |  |
| Nombre | Identificación de la probeta | Identificación Gráfica | | | | | | |
| MUESTRA METÁLICA | Sample M1 |  | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 3. ANTECEDENTES TÉCNICOS | | | | | | | | |
| 3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry | | | | | | | | |
| 3.2. Método: Fe 110 Low Alloy | | | | | | | | |

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 4 mediciones en distintos puntos del espécimen y finalmente se promedió su valor.

| | | Muestra M1 |
|--------------|------|---------------|
| Elemento | | Valor [%] |
| Carbono | [C] | 0,121 |
| Silicio | [Si] | 0,112 |
| Manganeso | [Mn] | 0,229 |
| Fósforo | [P] | 0,010 |
| Cromo | [Cr] | 0,378 |
| Niquel | [Ni] | 0,034 |
| Cobre | [Cu] | 0,017 |
| Aluminio | [Al] | 0,012 |
| Hierro | [Fe] | 99,08 |
| Total | | 99,99 |



Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de
Fundición.



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report



Sample: Muestra M1

Analysis Time: 08.11.2019 13:57:57

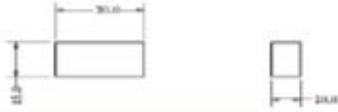
Method: Fe110

| | | | | | |
|---|--------|---------|---------|---------|---------|
| | C [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] |
| ∅ | 0,121 | 0,112 | 0,229 | 0,010 | <0,0030 |
| | Cr [%] | Mo [%] | Ni [%] | Cu [%] | Al [%] |
| ∅ | 0,378 | <0,0050 | 0,034 | 0,017 | 0,012 |
| | Co [%] | Nb [%] | Ti [%] | V [%] | W [%] |
| ∅ | 0,0074 | <0,0050 | <0,0020 | <0,0030 | <0,020 |
| | B [%] | Sn [%] | Fe [%] | | |
| ∅ | 0,0012 | <0,0020 | 99,08 | | |



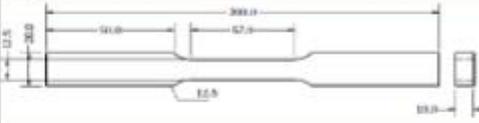
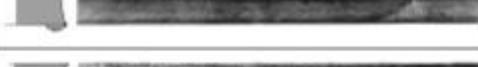
x

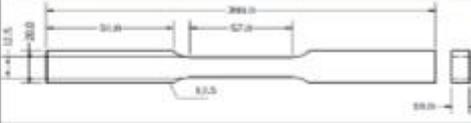
6.3. ANEXO III. Registro de operaciones de corte

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON OXICORTE (OFC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Metalografía. |
| No. Probeta: OFC-D-T-01 | Fecha: 07 de Noviembre del 2019 |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7.83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Victori Modelo: Ca-1350 Fecha de Fabricación: no disponible. Tanque de oxígeno: ENOX S.A. - 99 % gas Tanque de acetileno: LINDE S.A. - 99.09 % acetileno disuelto. | Presión de oxígeno [psi]: 25 Presión de acetileno [psi]: 5 Flujo de oxígeno de corte [l/min]: 40 Flujo de oxígeno precalentamiento [l/min]: <40 Flujo de gas combustible [l/min]: 5 Tamaño de boquilla [mm]: 2 |
| PERFIL DE CORTE | PROCESO |
|  | Tiempo de precalentamiento [min]: 0' 4" Tiempo de corte [min]: 0' 15" Ancho de corte [mm]: 15 Longitud de corte [mm]: 30 Arrastre [mm]: 1 Velocidad de corte [mm/s]: 8.2 |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9.97 Peso final material cortado [kg]: 9.52 Peso material desperdicio [kg]: 0.45 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 12' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 0' 15" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas OFC). |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Técnica correcta de corte en una placa de 1 pulg, el borde es cuadrado y las líneas de arrastre son prácticamente verticales y no demasiado pronunciadas. <input type="checkbox"/> |
|  | (2) La velocidad de corte fue demasiado baja, por lo que las irregularidades de las líneas de arrastre quedaron más marcadas. <input type="checkbox"/> |
|  | (3) La velocidad de corte fue demasiado alta, por lo que hay una ruptura pronunciada en la línea de arrastre y el borde cortado es irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (4) Boquilla demasiado lejos de la superficie. El recorrido del soplete fue bamboleante, por lo que el borde cortado quedó ondulado e irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (5) Boquilla demasiado cerca de la superficie. La presión de oxígeno fue demasiado baja, por lo que el borde superior se dentó debido a la baja velocidad de corte. <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | (6) Exceso de oxígeno en el corte y el tamaño de la boquilla demasiado pequeño, haciendo que se perdiera el control del corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (7) Exceso de llama de precalentamiento, por lo que la superficie superior se dentó, el borde del corte quedó irregular y hubo cantidades excesivas de escoria adherida. <input type="checkbox"/> |
|  | (8) Se usó una boquilla sucia en el corte produciendo interrupciones y no se tuvo cuidado para limpiarla, produciendo excavaciones notables en el punto de inicio. <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input checked="" type="checkbox"/> | Piano <input type="checkbox"/> Irregular <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Inclusiones. 2) Cráteres. 3) Porosidades. | Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|---|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON OXICORTE (OFC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Metalografía. |
| No. Probeta: OFC-M-L-01 | Fecha: 07 de Noviembre del 2019 |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7.83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Victori Modelo: Ca-1350 Fecha de Fabricación: no disponible. Tanque de oxígeno: ENOX S.A. - 99 % gas Tanque de acetileno: LINDE S.A. - 99.09 % acetileno disuelto. | Presión de oxígeno [psi]: 25 Presión de acetileno [psi]: 5 Flujo de oxígeno de corte [l/min]: 40 Flujo de oxígeno precalentamiento [l/min]: <40 Flujo de gas combustible [l/min]: 5 Tamaño de boquilla [mm]: 2 |
| PERFIL DE CORTE | PROCESO |
|  | Tiempo de precalentamiento [min]: 0' 4" Tiempo de corte [min]: 0' 17" Ancho de corte [mm]: 15 Longitud de corte [mm]: 30 Arrastre [mm]: 1 Velocidad de corte [mm/s]: 6.2 |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9,97 Peso final material cortado [kg]: 9,52 Peso material desperdicio [kg]: 0,45 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 12' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 0' 17" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas OFC) |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Técnica correcta de corte en una placa de 1 pulg. el borde es cuadrado y las líneas de arrastre son prácticamente verticales y no demasiado pronunciadas. <input type="checkbox"/> |
|  | (2) La velocidad de corte fue demasiado baja, por lo que las irregularidades de las líneas de arrastre quedaron más marcadas. <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | (3) La velocidad de corte fue demasiado alta, por lo que hay una ruptura pronunciada en la línea de arrastre y el borde cortado es irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (4) Boquilla demasiado lejos de la superficie. El recorrido del soplete fue bamboleante, por lo que el borde cortado quedó ondulado e irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (5) Boquilla demasiado cerca de la superficie. La presión de oxígeno fue demasiado baja, por lo que el borde superior se derribó debido a la baja velocidad de corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (6) Exceso de oxígeno en el corte y el tamaño de la boquilla demasiado pequeño, haciendo que se perdiera el control del corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (7) Exceso de llama de precalentamiento, por lo que la superficie superior se derribó, el borde del corte quedó irregular y hubo cantidades excesivas de escoria adherida. <input type="checkbox"/> |
|  | (8) Se usó una boquilla sucia en el corte produciendo interrupciones y no se tuvo cuidado para reiniciarlo, produciendo excavaciones notables en el punto de reinicio. <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input type="checkbox"/> Irregular <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Inclusiones. 2) Cráteres. 3) Bolsas. | Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|---|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON OXICORTE (OFC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Metalografía. |
| No. Probeta: OFC-M-T-01 | Fecha: 07 de Noviembre del 2019 |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Victori Modelo: Ca-1350 Fecha de Fabricación: no disponible. Tanque de oxígeno: ENOX S.A. - 99 % gas Tanque de acetileno: LINDE S.A. - 99.09 % acetileno disuelto. | Presión de oxígeno [psi]: 25 Presión de acetileno [psi]: 5 Flujo de oxígeno de corte [l/min]: 40 Flujo de oxígeno precalentamiento [l/min]: <40 Flujo de gas combustible [l/min]: 5 Tamaño de boquilla [mm]: 2 |
| PERFIL DE CORTE | PROCESO |
|  | Tiempo de precalentamiento [min]: 0' 4" Tiempo de corte [min]: 0' 16" Ancho de corte [mm]: 15 Longitud de corte [mm]: 30 Arrastre [mm]: 1 Velocidad de corte [mm/s]: 7.5 |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9.97 Peso final material cortado [kg]: 9.52 Peso material desperdicio [kg]: 0.45 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 12' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 0' 16" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas OFC) |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Técnica correcta de corte en una placa de 1 pulg. el borde es cuadrado y las líneas de arrastre son prácticamente verticales y no demasiado pronunciadas. <input type="checkbox"/> |
|  | (2) La velocidad de corte fue demasiado baja, por lo que las irregularidades de las líneas de arrastre quedaron más marcadas. <input type="checkbox"/> |
|  | (3) La velocidad de corte fue demasiado alta, por lo que hay una ruptura pronunciada en la línea de arrastre y el borde cortado es irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (4) Boquilla demasiado lejos de la superficie. El recorrido del soplete fue bamboleante, por lo que el borde cortado quedó ondulado e irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (5) Boquilla demasiado cerca de la superficie. La presión de oxígeno fue demasiado baja, por lo que el borde superior se deritió debido a la baja velocidad de corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (6) Exceso de oxígeno en el corte y el tamaño de la boquilla demasiado pequeño, haciendo que se perdiera el control del corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (7) Exceso de llama de precalentamiento, por lo que la superficie superior se deritió, el borde del corte quedó irregular y hubo cantidades excesivas de escoria adherida. <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | (8) Se usó una boquilla sucia en el corte produciendo interrupciones y no se tuvo cuidado para limpiarla, produciendo excavaciones notables en el punto de rescio. <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input checked="" type="checkbox"/> | Plano <input type="checkbox"/> Irregular <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Inclusiones. 2) Cráteres. | Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

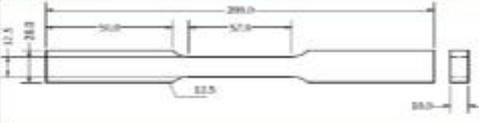
| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON OXICORTE (OFC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Tracción. |
| No. Probeta: OFC-T-L-01 | Fecha: 07 de Noviembre del 2019 |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 200 x 20 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Victori Modelo: Ca-1350 Fecha de Fabricación: no disponible. Tanque de oxígeno: ENOX S.A. - 99 % gas Tanque de acetileno: LINDE S.A. - 99.09 % acetileno disuelto. | Presión de oxígeno [psi]: 25 Presión de acetileno [psi]: 5 Flujo de oxígeno de corte [l/min]: 40 Flujo de oxígeno precalentamiento [l/min]: <40 Flujo de gas combustible [l/min]: 5 Tamaño de boquilla [mm]: 2 |
| PERFIL DE CORTE | PROCESO |
|  | Tiempo de precalentamiento [min]: 0' 8" Tiempo de corte [min]: 3' 10" Ancho de corte [mm]: 20 Longitud de corte [mm]: 200 Arrastre [mm]: 1 Velocidad de corte [mm/s]: 6.8 |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9.97 Peso final material cortado [kg]: 9.52 Peso material desperdicio [kg]: 0.45 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 12' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 3' 10" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas OFC). |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Técnica correcta de corte en una placa de 1 pulg., el borde es cuadrado y las líneas de arrastre son prácticamente verticales y no demasiado pronunciadas. <input type="checkbox"/> |
|  | (2) La velocidad de corte fue demasiado baja, por lo que las irregularidades de las líneas de arrastre quedaron más marcadas. <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | (3) La velocidad de corte fue demasiado alta, por lo que hay una ruptura pronunciada en la línea de arrastre y el borde cortado es irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (4) Boquilla demasiado lejos de la superficie. El recorrido del soplete fue bamboleante, por lo que el borde cortado quedó ondulado e irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (5) Boquilla demasiado cerca de la superficie. La presión de oxígeno fue demasiado baja, por lo que el borde superior se deritió debido a la baja velocidad de corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (6) Exceso de oxígeno en el corte y el tamaño de la boquilla demasiado pequeño, haciendo que se perdiera el control del corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (7) Exceso de llama de precalentamiento, por lo que la superficie superior se deritió, el borde del corte quedó irregular y hubo cantidades excesivas de escoria adherida. <input type="checkbox"/> |
|  | (8) Se usó una boquilla sucia en el corte produciendo interrupciones y no se tuvo cuidado para limpiarla, produciendo excavaciones notables en el punto de reinicio. <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input type="checkbox"/> Irregular <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Porosidades. 2) Cráteres. 3) Inclusiones. | Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON OXICORTE (OFC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Tracción. |
| No. Probeta: OFC-T-L-02 | Fecha: 07 de Noviembre del 2019 |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 200 x 20 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Victori Modelo: Ca-1350 Fecha de Fabricación: no disponible. Tanque de oxígeno: ENOX S.A. - 99 % gas Tanque de acetileno: LINDE S.A. - 99.09 % acetileno disuelto. | Presión de oxígeno [psi]: 25 Presión de acetileno [psi]: 5 Flujo de oxígeno de corte [l/min]: 40 Flujo de oxígeno precalentamiento [l/min]: <40 Flujo de gas combustible [l/min]: 5 Tamaño de boquilla [mm]: 2 |
| PERFIL DE CORTE | PROCESO |
|  | Tiempo de precalentamiento [min]: 0' 7" Tiempo de corte [s]: 3' 03" Ancho de corte [mm]: 20 Longitud de corte [mm]: 200 Arrastre [mm]: 1 Velocidad de corte [mm/s]: 6,9 |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9,97 Peso final material cortado [kg]: 9,52 Peso material desperdicio [kg]: 0,45 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 12' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 3' 03" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas OFC). |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Técnica correcta de corte en una placa de 1 pulg, el borde es cuadrado y las líneas de arrastre son prácticamente verticales y no demasiado pronunciadas. <input type="checkbox"/> |
|  | (2) La velocidad de corte fue demasiado baja, por lo que las irregularidades de las líneas de arrastre quedaron más marcadas. <input type="checkbox"/> |
|  | (3) La velocidad de corte fue demasiado alta, por lo que hay una ruptura pronunciada en la línea de arrastre y el borde cortado es irregular. <input type="checkbox"/> |
|  | (4) Boquilla demasiado lejos de la superficie. El recorrido del soplete fue bamboleante, por lo que el borde cortado quedó ondulado e irregular. <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | (5) Boquilla demasiado cerca de la superficie. La presión de oxígeno fue demasiado baja, por lo que el borde superior se deformó debido a la baja velocidad de corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (6) Exceso de oxígeno en el corte y el tamaño de la boquilla demasiado pequeño, haciendo que se perdiera el control del corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (7) Exceso de llama de precalentamiento, por lo que la superficie superior se deformó, el borde del corte quedó irregular y hubo cantidades excesivas de escoria adherida. <input type="checkbox"/> |
|  | (8) Se usó una boquilla sucia en el corte produciendo interrupciones y no se tuvo cuidado para reiniciarla, produciendo excavaciones notables en el punto de reinicio. <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input type="checkbox"/> Irregular <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Porosidades. 2) Cráteres. 3) Inclusiones. | Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

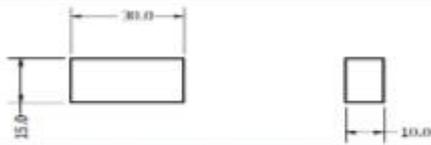
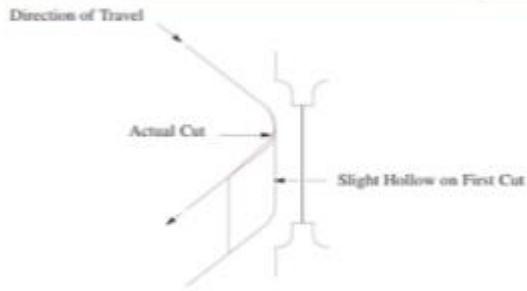
| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | | |
|--|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | | |
| PROCESO: CORTE CON PLASMA (PAC) | | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | | |
| No. Probeta: PAC-D-T-01 | Ensayo asociado: Dureza. Fecha: 14 de Noviembre de 2019. | |
| 2. MATERIAL BASE | | |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 | Esquema:  | |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES | |
| Marca: Hypertherm. Modelo: Powermax 85. Fecha de Fabricación: 2017. Voltaje de alimentación [V]: 220 - VAC - 3 PH. Corriente de alimentación [A]: 58 Software de corte: FastCAM-V5.1. | Frecuencia [Hz]: 60 Voltaje de salida nominal [V]: 143 VDC Corriente de salida [A]: 25 - 85 Voltaje en vacío [V]: 270 VDC Presión de gas [psi]: 100 Altura inicial de pinchado [mm]: 4 Tiempo de pinchado [s]: 0,5 Distancia antorcha-pieza de trabajo [mm]: 1,5 Corriente [A]: 85 Voltaje de arco [V]: 128 Velocidad de corte [mm/s]: 30 Boquilla: Código 220816 Electrodo: Código 220842 | |
| PERFIL DE CORTE | | |
|  | | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 10 Peso final material cortado [kg]: 9,81 Peso material desperdicio [kg]: 0,22 Costo de la boquilla: 8,65 USD Costo del electrodo: 11,40 USD | Tiempo de preparación de equipo [min]: 25' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 0' 36" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas PAC). | |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | | |
|  | (1) Ángulo positivo de corte La cantidad de material removido en la parte superior es mayor que en la parte inferior. <input type="checkbox"/> | |
|  | (2) Ángulo negativo de corte La cantidad de material removido en la parte inferior es mayor que en la parte superior. <input type="checkbox"/> | |
|  | (3) Filo superior redondeado Presencia de un ligero redondeo en la parte superior de la superficie de corte. <input checked="" type="checkbox"/> | |
|  | (4) Escoria por alta velocidad Una cantidad pequeña de material fundido se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, la escoria se presenta a manera de líneas en forma de "s", difíciles de remover. <input type="checkbox"/> | |
|  | (5) Escoria por baja velocidad Una cantidad pequeña de material fundido de forma globular se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, son de fácil remoción. <input type="checkbox"/> | |
|  | (6) Salpicado en la parte superior Una cantidad pequeña de material fundido a manera de salpicaduras se alojan en la parte superior del extremo de la superficie de corte. <input type="checkbox"/> | |
| 5.1 Tipo de Borde | | |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> | 5.2 Apariencia Superficial | |
| Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> | Irregular <input type="checkbox"/> |
| Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | | |
| 5.3 Defectos Superficiales | | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | | Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

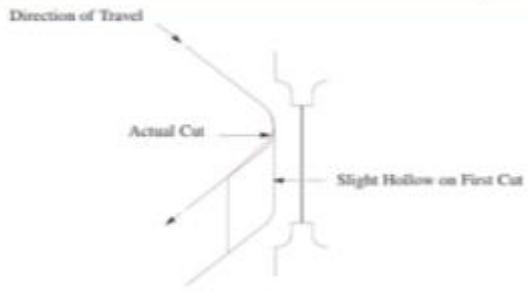
| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON PLASMA (PAC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Metalografía. |
| No. Probeta: PAC-M-L-02 | Fecha: 14 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7.83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Hypertherm. Modelo: Powermax 85. Fecha de Fabricación: 2017. Voltaje de alimentación [V]: 220 - VAC - 3 PH. Corriente de alimentación [A]: 58 Software de corte: FastCAM-V5.1. | Frecuencia [Hz]: 60 Voltaje de salida nominal [V]: 143 VDC Corriente de salida [A]: 25 - 85 Voltaje en vacío [V]: 270 VDC Presión de gas [psi]: 100 Altura inicial de pinchado [mm]: 4 Tiempo de pinchado [s]: 0.5 Distancia antorcha-pieza de trabajo [mm]: 1,5 Corriente [A]: 85 Voltaje de arco [V]: 128 Velocidad de corte [mm/s]: 35 Boquilla: Código 220816 Electrodo: Código 220842 |
| PERFIL DE CORTE | |
|  | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 10 Peso final material cortado [kg]: 9.81 Peso material desperdicio [kg]: 0.22 Costo de la boquilla: 8,65 USD Costo del electrodo: 11,40 USD | Tiempo de preparación de equipo [min]: 25' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 0' 23" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas PAC). |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Ángulo positivo de corte La cantidad de material removido en la parte superior es mayor que en la parte inferior. <input type="checkbox"/> |
|  | (2) Ángulo negativo de corte La cantidad de material removido en la parte inferior es mayor que en la parte superior. <input type="checkbox"/> |
|  | (3) Filo superior redondeado Presencia de un ligero redondeo en la parte superior de la superficie de corte. <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | (4) Escoria por alta velocidad Una cantidad pequeña de material fundido se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, la escoria se presenta a manera de líneas en forma de "s", difíciles de remover. <input type="checkbox"/> |
|  | (5) Escoria por baja velocidad Una cantidad pequeña de material fundido de forma globular se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, son de fácil remoción. <input type="checkbox"/> |
|  | (6) Salpicado en la parte superior Una cantidad pequeña de material fundido a manera de salpicaduras se alojan en la parte superior del extremo de la superficie de corte. <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> | |
| Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

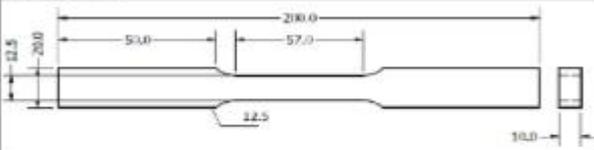
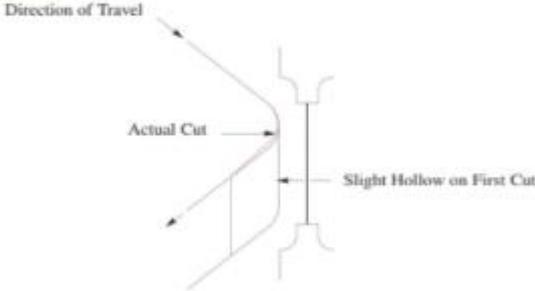
| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON PLASMA (PAC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Metalografía. |
| No. Probeta: PAC-M-T-01 | Fecha: 14 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Hypertherm. Modelo: Powermax 85. Fecha de Fabricación: 2017. Voltaje de alimentación [V]: 220 - VAC - 3 PH. Corriente de alimentación [A]: 58 Software de corte: FastCAM-V5.1. | Frecuencia [Hz]: 60 Voltaje de salida nominal [V]: 143 VDC Corriente de salida [A]: 25 - 85 Voltaje en vacío [V]: 270 VDC Presión de gas [psi]: 100 Altura inicial de pinchado [mm]: 4 Tiempo de pinchado [s]: 0,5 Distancia antorcha-pieza de trabajo [mm]: 1,5 Corriente [A]: 85 Voltaje de arco [V]: 128 Velocidad de corte [mm/s]: 30 Boquilla: Código 220816 Electrodo: Código 220842 |
| PERFIL DE CORTE | |
|  | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 10 Peso final material cortado [kg]: 9,81 Peso material desperdicio [kg]: 0,22 Costo de la boquilla: 8,65 USD Costo del electrodo: 11,40 USD | Tiempo de preparación de equipo [min]: 25' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 0' 31" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas PAC). |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Ángulo positivo de corte La cantidad de material removido en la parte superior es mayor que en la parte inferior. <input checked="" type="checkbox"/> |
|  | (2) Ángulo negativo de corte La cantidad de material removido en la parte inferior es mayor que en la parte superior. <input type="checkbox"/> |
|  | (3) Filo superior redondeado Presencia de un ligero redondeo en la parte superior de la superficie de corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (4) Escoria por alta velocidad Una cantidad pequeña de material fundido se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, la escoria se presenta a manera de líneas en forma de "s", difíciles de remover. <input type="checkbox"/> |
|  | (5) Escoria por baja velocidad Una cantidad pequeña de material fundido de forma globular se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, son de fácil remoción. <input type="checkbox"/> |
|  | (6) Salpicado en la parte superior Una cantidad pequeña de material fundido a manera de salpicaduras se alojan en la parte superior del extremo de la superficie de corte. <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

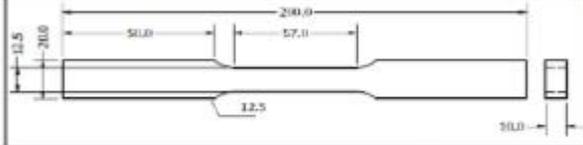
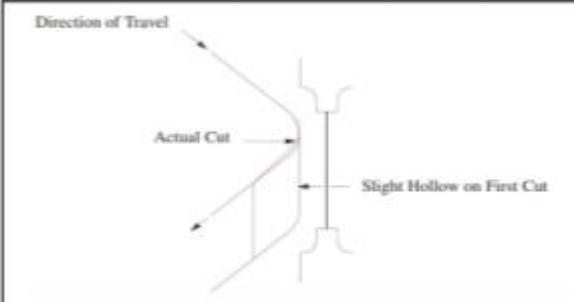
| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|---|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON PLASMA (PAC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Tracción. |
| No. Probeta: PAC-T-L-01 | Fecha: 14 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 200 x 20 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Hypertherm. Modelo: Powermax 85. Fecha de Fabricación: 2017. Voltaje de alimentación [V]: 220 - VAC - 3 PH. Corriente de alimentación [A]: 58 Software de corte: FastCAM-V5.1. | Frecuencia [Htz]: 60 Voltaje de salida nominal [V]: 143 VDC Corriente de salida [A]: 25 - 85 Voltaje en vacío [V]: 270 VDC Presión de gas [psi]: 100 Altura inicial de pinchado [mm]: 4 Tiempo de pinchado [s]: 0,5 Distancia antorcha-pieza de trabajo [mm]: 1,5 Corriente [A]: 85 Voltaje de arco [V]: 128 Velocidad de corte [mm/s]: 34 Boquilla: Código 220816 Electrodo: Código 220842 |
| PERFIL DE CORTE | |
|  | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 10 Peso final material cortado [kg]: 9,81 Peso material desperdicio [kg]: 0,22 Costo de la boquilla: 8,65 USD Costo del electrodo: 11,40 USD | Tiempo de preparación de equipo [min]: 25' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 1' 38" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas PAC) |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Ángulo positivo de corte La cantidad de material removido en la parte superior es mayor que en la parte inferior. <input type="checkbox"/> |
|  | (2) Ángulo negativo de corte La cantidad de material removido en la parte inferior es mayor que en la parte superior. <input type="checkbox"/> |
|  | (3) Filo superior redondeado Presencia de un ligero redondeo en la parte superior de la superficie de corte. <input type="checkbox"/> |
|  | (4) Escoria por alta velocidad Una cantidad pequeña de material fundido se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, la escoria se presenta a manera de líneas en forma de "s", difíciles de remover. <input type="checkbox"/> |
|  | (5) Escoria por baja velocidad Una cantidad pequeña de material fundido de forma globular se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, son de fácil remoción. <input type="checkbox"/> |
|  | (6) Salpicado en la parte superior Una cantidad pequeña de material fundido a manera de salpicaduras se alojan en la parte superior del extremo de la superficie de corte. <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

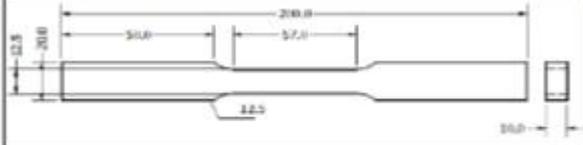
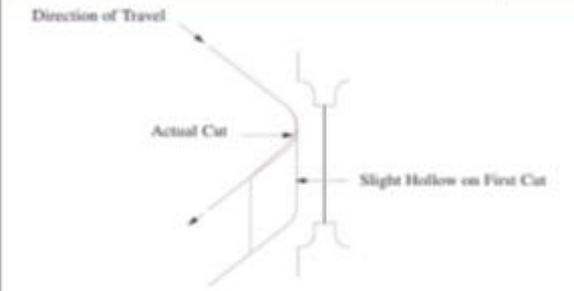
| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON PLASMA (PAC) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Tracción. |
| No. Probeta: PAC-T-L-02 | Fecha: 14 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 200 x 20 Composición: 0,12 % C. Espesor [mm]: 10 | |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Hypertherm. Modelo: Powermax 85. Fecha de Fabricación: 2017. Voltaje de alimentación [V]: 220 - VAC - 3 PH. Corriente de alimentación [A]: 58 Software de corte: FastCAM-V5.1. | Frecuencia [Hz]: 60 Voltaje de salida nominal [V]: 143 VDC Corriente de salida [A]: 25 - 85 Voltaje en vacío [V]: 270 VDC Presión de gas [psi]: 100 Altura inicial de pinchado [mm]: 4 Tiempo de pinchado [s]: 0,5 Distancia antorcha-pieza de trabajo [mm]: 1,5 Corriente [A]: 85 Voltaje de arco [V]: 128 Velocidad de corte [mm/s]: 32 Boquilla: Código 220816 Electrodo: Código 220842 |
| PERFIL DE CORTE | |
| | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 10 Peso final material cortado [kg]: 9,81 Peso material desperdicio [kg]: 0,22 Costo de la boquilla: 8,65 USD Costo del electrodo: 11,40 USD | Tiempo de preparación de equipo [min]: 25' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 1' 42" Personal operativo involucrado [un]: 1 Detalle: Estos datos fueron obtenidos para una superficie de 30 cm ² (todas las probetas PAC). |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
| | (1) Ángulo positivo de corte La cantidad de material removido en la parte superior es mayor que en la parte inferior. <input type="checkbox"/> |
| | (2) Ángulo negativo de corte La cantidad de material removido en la parte inferior es mayor que en la parte superior. <input type="checkbox"/> |
| | (3) Filo superior redondeado Presencia de un ligero redondeo en la parte superior de la superficie de corte. <input type="checkbox"/> |
| | (4) Escoria por alta velocidad Una cantidad pequeña de material fundido se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, la escoria se presenta a manera de líneas en forma de "s", difíciles de remover. <input checked="" type="checkbox"/> |
| | (5) Escoria por baja velocidad Una cantidad pequeña de material fundido de forma globular se adhiere en la parte inferior del extremo de la superficie de corte, son de fácil remoción. <input type="checkbox"/> |
| | (6) Salpicado en la parte superior Una cantidad pequeña de material fundido a manera de salpicaduras se alojan en la parte superior del extremo de la superficie de corte. <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON ELECTROHILO (WEDM) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Dureza. |
| No. Probeta: WEDM-D-T-01 | Fecha: 12 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12% Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Gold San Modelo: 5063T6H50 Fecha de Fabricación: 2011 Voltaje de alimentación [V]: 220 Corriente de salida [A]: 5 Software de corte: HL mult. wire cutting aut. V752-R. | Velocidad de carrete [rpm]: 50 Velocidad de alimentación [mm/min]: 5 Presión de bombeo F. Dieléc. [kgf/cm ²]: 3 Tensión de hilo [N]: 11 Voltaje pico de chispa en brecha [V]: 40 Corriente Pico [A]: 7 Pulso ON TIME [μs]: 6 Pulso OFF TIME [μs]: 12 Ancho de corte KERF [mm]: 0,20 Fluido dieléctrico: aceite de corte. Velocidad de corte [mm/s]: 8 Composición de Insumo: 70% W - 30% Cu Diámetro de Insumo [mm]: 0,18 |
| PERFIL DE CORTE | |
|  | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9,6 Peso final material cortado [kg]: 9,58 Volumen inicial fluido dieléctrico [cm ³]: 3500 Volumen final fluido dieléctrico [cm ³]: 3192 Peso material desperdicio [kg]: 0,02 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 30' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 2' 4" Personal operativo involucrado [un]: 1 Peso carrete hilo inicial [g]: 336 Peso carrete hilo final [g]: 258,8 |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Existe un espacio entre 0,05 a 0,76mm entre el hilo y la pieza de trabajo. En esta brecha, la generación de chispas controlada tiene su lugar, la fuerza explosiva de las chispas hace que los gases generados tralen de escaparse causando un ligero desplazamiento del hilo cuando éste se encuentra mecanizando una esquina redondeada, además de incrementar la velocidad durante esta operación. El resultado es una variación en el ángulo del redondeado que puede salir de la tolerancia establecida para la pieza resultante. Sí <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Sí <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> |

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON ELECTROHILO (WEDM) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Metalografía. |
| No. Probeta: WEDM-M-L-02 | Fecha: 12 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12% Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Gold San Modelo: 5063T6H50 Fecha de Fabricación: 2011 Voltaje de alimentación [V]: 220 Corriente de salida [A]: 5 Software de corte: HL mult. wire cutting aut. V752-R. | Velocidad de carrete [rpm]: 50 Velocidad de alimentación [mm/min]: 5 Presión de bombeo F. Dieléct. [kgf/cm ²]: 3 Tensión de hilo [N]: 11 Voltaje pico de chispa en brecha [V]: 40 Corriente Pico [A]: 7 Pulso ON TIME [μs]: 6 Pulso OFF TIME [μs]: 12 Ancho de corte KERF [mm]: 0,20 Fluido dieléctrico: aceite de corte. Velocidad de corte [mm/s]: 7,8 Composición de Insumo: 70% W - 30% Cu Diámetro de Insumo [mm]: 0,18 |
| PERFIL DE CORTE | |
|  | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9,6 Peso final material cortado [kg]: 9,58 Volumen inicial fluido dieléctrico [cm ³]: 3500 Volumen final fluido dieléctrico [cm ³]: 3192 Peso material desperdicio [kg]: 0,02 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 30' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 2' 18" Personal operativo involucrado [un]: 1 Peso carrete hilo inicial [g]: 336 Peso carrete hilo final [g]: 258,8 |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Existe un espacio entre 0,05 a 0,76mm entre el hilo y la pieza de trabajo. En esta brecha, la generación de chispas controlada tiene su lugar, la fuerza explosiva de las chispas hace que los gases generados traten de escaparse causando un ligero desplazamiento del hilo cuando éste se encuentra mecanizando una esquina redondeada, además de incrementar la velocidad durante esta operación. El resultado es una variación en el ángulo del redondeado que puede salir de la tolerancia establecida para la pieza resultante. Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> |

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON ELECTROHILO (WEDM) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Tracción. |
| No. Probeta: WEDM-T-L-01 | Fecha: 12 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 30 x 15 Composición: 0,12% Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Gold San Modelo: 5063T6H50 Fecha de Fabricación: 2011 Voltaje de alimentación [V]: 220 Corriente de salida [A]: 5 Software de corte: HL mult. wire cutting aut. V752-R. | Velocidad de carrete [rpm]: 50 Velocidad de alimentación [mm/min]: 5 Presión de bombeo F. Dieléct. [kgf/cm ²]: 3 Tensión de hilo [N]: 11 Voltaje pico de chispa en brecha [V]: 40 Corriente Pico [A]: 7 Pulso ON TIME [μs]: 6 Pulso OFF TIME [μs]: 12 Ancho de corte KERF [mm]: 0,20 Fluido dieléctrico: aceite de corte. Velocidad de corte [mm/s]: 8,3 Composición de Insumo: 70% W - 30% Cu Diámetro de Insumo [mm]: 0,18 |
| PERFIL DE CORTE | |
|  | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9,6 Peso final material cortado [kg]: 9,58 Volumen inicial fluido dieléctrico [cm ³]: 3500 Volumen final fluido dieléctrico [cm ³]: 3192 Peso material desperdicio [kg]: 0,02 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 30' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 2' 0" Personal operativo involucrado [un]: 1 Peso carrete hilo inicial [g]: 336 Peso carrete hilo final [g]: 258,8 |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Existe un espacio entre 0,05 a 0,76mm entre el hilo y la pieza de trabajo. En esta brecha, la generación de chispas controlada tiene su lugar, la fuerza explosiva de las chispas hace que los gases generados traten de escaparse causando un ligero desplazamiento del hilo cuando éste se encuentra mecanizando una esquina redondeada, además de incrementar la velocidad durante esta operación. El resultado es una variación en el ángulo del redondeado que puede salir de la tolerancia establecida para la pieza resultante. Sí <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Sí <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> |

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON ELECTROHILO (WEDM) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Tracción. |
| No. Probeta: WEDM-T-L-01 | Fecha: 12 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 200 x 20 Composición: 0,12% Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Gold San Modelo: 5063T6H50 Fecha de Fabricación: 2011 Voltaje de alimentación [V]: 220 Corriente de salida [A]: 5 Software de corte: HL mult. wire cutting aut. V752-R. | Velocidad de carrete [rpm]: 50 Velocidad de alimentación [mm/min]: 5 Presión de bombeo F. Dieléct. [kgf/cm ²]: 3 Tensión de hilo [N]: 11 Voltaje pico de chispa en brecha [V]: 40 Corriente Pico [A]: 7 Pulso ON TIME [μs]: 6 Pulso OFF TIME [μs]: 12 Ancho de corte KERF [mm]: 0,20 Fluido dieléctrico: aceite de corte. Velocidad de corte [mm/s]: 8,1 Composición de Insumo: 70% W - 30% Cu Diámetro de Insumo [mm]: 0,18 |
| PERFIL DE CORTE | |
|  | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9,6 Peso final material cortado [kg]: 9,58 Volumen inicial fluido dieléctrico [cm ³]: 3500 Volumen final fluido dieléctrico [cm ³]: 3192 Peso material desperdicio [kg]: 0,02 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 30' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 6' 12" Personal operativo involucrado [un]: 1 Peso carrete hilo inicial [g]: 336 Peso carrete hilo final [g]: 258,8 |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Existe un espacio entre 0,05 a 0,76mm entre el hilo y la pieza de trabajo. En esta brecha, la generación de chispas controlada tiene su lugar, la fuerza explosiva de las chispas hace que los gases generados traten de escaparse causando un ligero desplazamiento del hilo cuando éste se encuentra mecanizando una esquina redondeada, además de incrementar la velocidad durante esta operación. El resultado es una variación en el ángulo del redondeado que puede salir de la tolerancia establecida para la pieza resultante. Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> |

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE POR OXICORTE (OFC), PLASMA (PAC) Y ELECTROHILO (WEDM), EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO. | |
|--|--|
| REGISTRO DE DATOS PARA OPERACIONES DE CORTE | |
| PROCESO: CORTE CON ELECTROHILO (WEDM) | |
| 1. IDENTIFICACIÓN | Ensayo asociado: Tracción. |
| No. Probeta: WEDM-T-L-02 | Fecha: 12 de Noviembre de 2019. |
| 2. MATERIAL BASE | Esquema: |
| Material: Acero de bajo carbono. Densidad [g/cm ³]: 7,83 Dimensiones [mm]: 200 x 20 Composición: 0,12% Espesor [mm]: 10 |  |
| 3. DATOS OPERACIONALES DE CORTE | |
| EQUIPO | PARÁMETROS OPERACIONALES |
| Marca: Gold San Modelo: 5063T6H50 Fecha de Fabricación: 2011 Voltaje de alimentación [V]: 220 Corriente de salida [A]: 5 Software de corte: HL mult. wire cutting aut. V752-R. | Velocidad de carrete [rpm]: 50 Velocidad de alimentación [mm/min]: 5 Presión de bombeo F. Dieléct. [kgf/cm ²]: 3 Tensión de hilo [N]: 11 Voltaje pico de chispa en brecha [V]: 40 Corriente Pico [A]: 7 Pulso ON TIME [μs]: 6 Pulso OFF TIME [μs]: 12 Ancho de corte KERF [mm]: 0,20 Fluido dieléctrico: aceite de corte. Velocidad de corte [mm/s]: 7,7 Composición de Insumo: 70% W - 30% Cu Diámetro de Insumo [mm]: 0,18 |
| PERFIL DE CORTE | |
|  | |
| 4. DATOS OPERACIONALES PARA ESTIMACIÓN DE COSTOS | |
| Peso inicial material a cortar [kg]: 9,6 Peso final material cortado [kg]: 9,58 Volumen inicial fluido dieléctrico [cm ³]: 3500 Volumen final fluido dieléctrico [cm ³]: 3192 Peso material desperdicio [kg]: 0,02 | Tiempo de preparación de equipo [min]: 30' 0" Tiempo de operación de corte [min]: 6' 30" Personal operativo involucrado [un]: 1 Peso carrete hilo inicial [g]: 336 Peso carrete hilo final [g]: 258,8 |
| 5. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE CORTE (Marcar con una "x") | |
|  | (1) Existe un espacio entre 0,05 a 0,76mm entre el hilo y la pieza de trabajo. En esta brecha, la generación de chispas controlada tiene su lugar, la fuerza explosiva de las chispas hace que los gases generados traten de escaparse causando un ligero desplazamiento del hilo cuando éste se encuentra mecanizando una esquina redondeada, además de incrementar la velocidad durante esta operación. El resultado es una variación en el ángulo del redondeado que puede salir de la tolerancia establecida para la pieza resultante. Sí <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> |
| 5.1 Tipo de Borde | 5.2 Apariencia Superficial |
| Cuadrado <input checked="" type="checkbox"/> Socavamiento borde inferior <input type="checkbox"/> Socavamiento borde superior <input type="checkbox"/> | Plano <input checked="" type="checkbox"/> Irregular <input type="checkbox"/> |
| 5.3 Defectos Superficiales | 5.4 Escoria |
| 1) Ninguno. | Sí <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> |

6.5. ANEXO V. Informe del ensayo de tracción



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES
F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M20.019

Quito, 4 de febrero de 2020

Solicitado por: M.Sc. Galo Barragán
Persona de contacto: Fernando Gutiérrez, Álvaro Reinoso
Teléfono: 0991445043
Correo: Fernando.gutierrez@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 03/02/2020
Fecha de ejecución: 03/02/2020

ORDEN DE TRABAJO N°: DM-OTI0010-2020

- MUESTRAS:** Diez (10) probetas metálicas para ensayo de tracción.
- GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS ANTE LA APLICACIÓN DE PROCESOS DE CORTE OFC, PAC Y WEDM EN PROBETAS DE ACERO DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

| Id. cliente | Id. del LAEV | Observaciones |
|-------------|--------------|--|
| WEDM 1 | M20.019.01 | Ninguna |
| WEDM 2 | M20.019.02 | |
| DISCO 1 | M20.019.03 | |
| DISCO 2 | M20.019.04 | |
| PAC 1 | M20.019.05 | |
| PAC 2 | M20.019.06 | |
| BASE 1 | M20.019.07 | |
| BASE 2 | M20.019.08 | |
| OFC 1 | M20.019.09 | Los bordes de las probetas no han sido maquinados y son bastante irregulares |
| OFC 2 | M20.019.10 | |



Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)

Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716

Correo: laev@epn.edu.ec



Página 1 de 2

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $22,7 \pm 1,9^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $42,7 \pm 4,1\%$

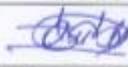
4. ENSAYO DE TRACCIÓN

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 2. Resistencia a la tracción.

| Id. | Ancho promedio | Espesor Promedio | Carga máxima registrada | | Resistencia a la tracción | | % elongación en 50 mm |
|------------|----------------|------------------|-------------------------|--------|---------------------------|-------|-----------------------|
| | mm | mm | lbf | N | ksi | MPa | |
| M20.019.01 | 12,46 | 10,09 | 13 266 | 59 010 | 68,1 | 469,4 | 39,2 |
| M20.019.02 | 12,43 | 10,07 | 13 359 | 59 424 | 68,9 | 474,7 | 38,5 |
| M20.019.03 | 14,33 | 10,26 | 15 458 | 68 761 | 67,8 | 467,7 | 31,6 |
| M20.019.04 | 15,45 | 10,39 | 16 379 | 72 857 | 65,8 | 453,9 | 33,0 |
| M20.019.05 | 13,89 | 10,09 | 16 854 | 74 970 | 77,6 | 534,9 | 32,9 |
| M20.019.06 | 13,57 | 10,08 | 16 291 | 72 466 | 76,8 | 529,8 | 32,1 |
| M20.019.07 | 12,67 | 10,08 | 13 281 | 59 076 | 67,1 | 462,0 | 36,5 |
| M20.019.08 | 12,70 | 10,05 | 13 402 | 59 614 | 67,7 | 466,5 | 35,2 |
| M20.019.09 | 15,14 | 10,28 | 15 883 | 70 651 | 65,8 | 453,8 | 27,3 |
| M20.019.10 | 14,87 | 10,15 | 15 671 | 69 710 | 67,0 | 461,7 | 26,8 |

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

| | REVISADO POR: | APROBADO POR: |
|---------|---|--|
| Firma: |  |  |
| Nombre: | Ing. Jonathan Castro, M.Sc. | Ph.D. Wilson Guachamin |
| Cargo: | ESPECIALISTA DE LABORATORIO | JEFE |

LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



6.6. ANEXO VI. Resultados de ensayo metalográfico

ILPM-RT-35 Rev 1

ILPM ENGINEERING CIA LTDA
Ingeniería Líder en Proyectos y Materiales



| | | | |
|--------------|---|--------------|--------|
| Equipo: | ENS-07 Microscopio Metalográfico Micros | Temperatura: | 21±3°C |
| Calibración: | 17/4/2018 | Humedad: | 60±10% |

ILPM 2020-158

REGISTRO DE RESULTADOS DEL ENSAYO METALOGRAFICO

| Metalografía 100X | |
|-------------------|--------------------|
| FECHA: | 04/16/20 |
| Titulo | MB100X |
| Muestra # | SMT01 |
| Cliente | FERNANDO GUTIERREZ |
| Trabajo | METALOGRAFIAS |
| Informe | ILPM 2020-158 |
| Aumento | 100X Micros Canon |
| Reactivo | Titul 2 |



Fotografía A1. Metalografía 100X.

| Porcentajes de Fases | |
|----------------------|------------|
| Area de Perlita | 1120765,00 |
| Area de Ferrita | 8627871,00 |
| Pearlite % | 20,50% |
| Ferrite % | 79,50% |
| Area total de Imagen | 9.748.636 |

| Tamaño de Grano | |
|-----------------------|-------------|
| Metodo de deteccion | COMPARACION |
| Número de interceptos | NA |
| Tamaño de Grano ASTM | 8 |



Fotografía A2. Metalografía 500X.

| Metalografía 500X | |
|-------------------|--------------------|
| FECHA: | 04/16/20 |
| Titulo | 500X |
| Muestra # | SMT01 |
| Cliente | FERNANDO GUTIERREZ |
| Trabajo | METALOGRAFIAS |
| Informe | ILPM 2020-158 |
| Aumento | 500X Micros Canon |
| Reactivo | Titul 2 |

Interpretación: La muestra corresponde a acero ferrítico perlítico con la presencia de ferrita acicular, laminado en caliente y terminado en frío, la ferrita se encuentra alargada producto del enfriamiento rápido del proceso de conformado. No se observa la presencia de carburos.

| | | |
|---|---|----------------------------|
| Elaborado por: Ing. Iván Estupiñán ILPM Engineering | Aprobado por: MSc. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio | Cliente / Testificado por: |
|---|---|----------------------------|

| | | | | |
|--------------|---|--------------|--------|---------------|
| Equipo: | ENS-07 Microscopio Metalográfico Micros | Temperatura: | 21±3°C | |
| Calibración: | 17/4/2018 | Humedad: | 60±10% | ILPM 2020-158 |

REGISTRO DE RESULTADOS DEL ENSAYO METALGRÁFICO

Metalografía 100X

| | |
|-----------|--------------------|
| FECHA: | 04/16/20 |
| Titulo | 100X |
| Muestra # | OFC |
| Cliente | FERNANDO GUTIERREZ |
| Trabajo | METALOGRAFÍAS |
| Informe | ILPM 2020-158 |
| Aumento | 100X Micros Canon |
| Reactivo | Nital 2 |



Fotografía A1. Metalografía 100X.

Porcentajes de Fases

| | |
|----------------------|------------|
| Area de Perlita | 2430603,00 |
| Area de Ferrita | 7318033,00 |
| Pearlite % | 24,93% |
| Ferrite % | 75,07% |
| Area total de Imagen | 9.748.636 |

| | |
|------------------------|-------------|
| Tamaño de Grano | |
| Metodo de deteccion | COMPARACION |
| Numero de interceptos | NA |
| Tamaño de Grano ASTM | 2 |

Metalografía 500X

| | |
|-----------|--------------------|
| FECHA: | 04/16/20 |
| Titulo | 500X |
| Muestra # | OFC |
| Cliente | FERNANDO GUTIERREZ |
| Trabajo | METALOGRAFÍAS |
| Informe | ILPM 2020-158 |
| Aumento | 500X Micros Canon |
| Reactivo | Nital 2 |



Fotografía A2. Metalografía 500X.

Interpretación: La muestra corresponde a acero ferrítico perlítico con la presencia de ferrita acicular gruesa, se observa un gran crecimiento del tamaño de grano . No se observa la presencia de carburos.

Elaborado por:

 FERNANDO GUTIERREZ

Ing. Iván Estupiñán
 ILPM Engineering

Aprobado por:

 FERNANDO GUTIERREZ

MSc. Patricio Estupiñán
 Jefe de Laboratorio

Cliente / Testificado por:

| | | | | |
|--------------|---|--------------|--------|---------------|
| Equipo: | ENS-07 Microscopio Metalográfico Micros | Temperatura: | 21±3°C | ILPM 2020-158 |
| Calibración: | 17/4/2018 | Humedad | 60±10% | |

REGISTRO DE RESULTADOS DEL ENSAYO METALOGRAFICO

Metalografía 100X

| | |
|-----------|--------------------|
| FECHA: | 04/16/20 |
| Titulo | 100X |
| Muestra # | PACMT01 |
| Cliente | FERNANDO GUTIERREZ |
| Trabajo | METALOGRAFIAS |
| Informe | ILPM 2020-158 |
| Aumento | 100X Micros Canon |
| Reactivo | Nital 2 |



Fotografía A1. Metalografía 100X.

Porcentajes de Fases

| | |
|----------------------|------------|
| Area de Perlita | 3230541,00 |
| Area de Ferrita | 6518095,00 |
| Pearlite % | 33,14% |
| Ferrite % | 66,86% |
| Area total de imagen | 9.748.636 |

| | |
|------------------------|-------------|
| Tamaño de Grano | |
| Metodo de deteccion | COMPARACION |
| Numero de interceptos | NA |
| Tamaño de Grano ASTM | 4 |

Metalografía 500X

| | |
|-----------|--------------------|
| FECHA: | 04/16/20 |
| Titulo | 500X |
| Muestra # | PACMT01 |
| Cliente | FERNANDO GUTIERREZ |
| Trabajo | METALOGRAFIAS |
| Informe | ILPM 2020-158 |
| Aumento | 500X Micros Canon |
| Reactivo | Nital 2 |

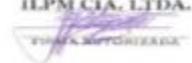


Fotografía A2. Metalografía 500X.

Interpretación: La muestra corresponde a acero ferrítico perlítico con la presencia de ferrita acicular FINA (formación de triángulos equiláteros) junto a la zona afectada, se observa un crecimiento del tamaño de grano . No se observa la presencia de carburos.

Elaborado por:

Ing. Iván Estupiñán
ILPM Engineering

Aprobado por:

MSc. Patricio Estupiñán
Jefe de Laboratorio

Cliente / Testificado por:

| | | | | |
|--------------|---|--------------|--------|---------------|
| Equipo: | ENS-07 Microscopio Metalográfico Micros | Temperatura: | 21±3°C | ILPM 2020-158 |
| Calibración: | 17/4/2018 | Humedad: | 60±10% | |

REGISTRO DE RESULTADOS DEL ENSAYO METALOGRAFICO

Metalografía 100X

| | |
|-----------|--------------------|
| FECHA: | 04/16/20 |
| Titulo | 100X |
| Muestra # | WEDMMT01 |
| Cliente | FERNANDO GUTIERREZ |
| Trabajo | METALOGRAFIAS |
| Informe | ILPM 2020-158 |
| Aumento | 100X Micros Canon |
| Reactivo | Nital 2 |



Fotografía A1. Metalografía 100X.

Porcentajes de Fases

| | |
|----------------------|------------|
| Area de Perlita | 3195950,00 |
| Area de Ferrita | 6552686,00 |
| Pearlite % | 22,50% |
| Ferrite % | 77,50% |
| Area total de imagen | 9.748.636 |

| | |
|------------------------|-------------|
| Tamaño de Grano | |
| Metodo de deteccion | COMPARACION |
| Numero de interceptos | NA |
| Tamaño de Grano ASTM | 7 |

Metalografía 500X

| | |
|-----------|--------------------|
| FECHA: | 04/16/20 |
| Titulo | 500X |
| Muestra # | WEDMMT01 |
| Cliente | FERNANDO GUTIERREZ |
| Trabajo | METALOGRAFIAS |
| Informe | ILPM 2020-158 |
| Aumento | 500X Micros Canon |
| Reactivo | Nital 2 |



Fotografía A2. Metalografía 500X.

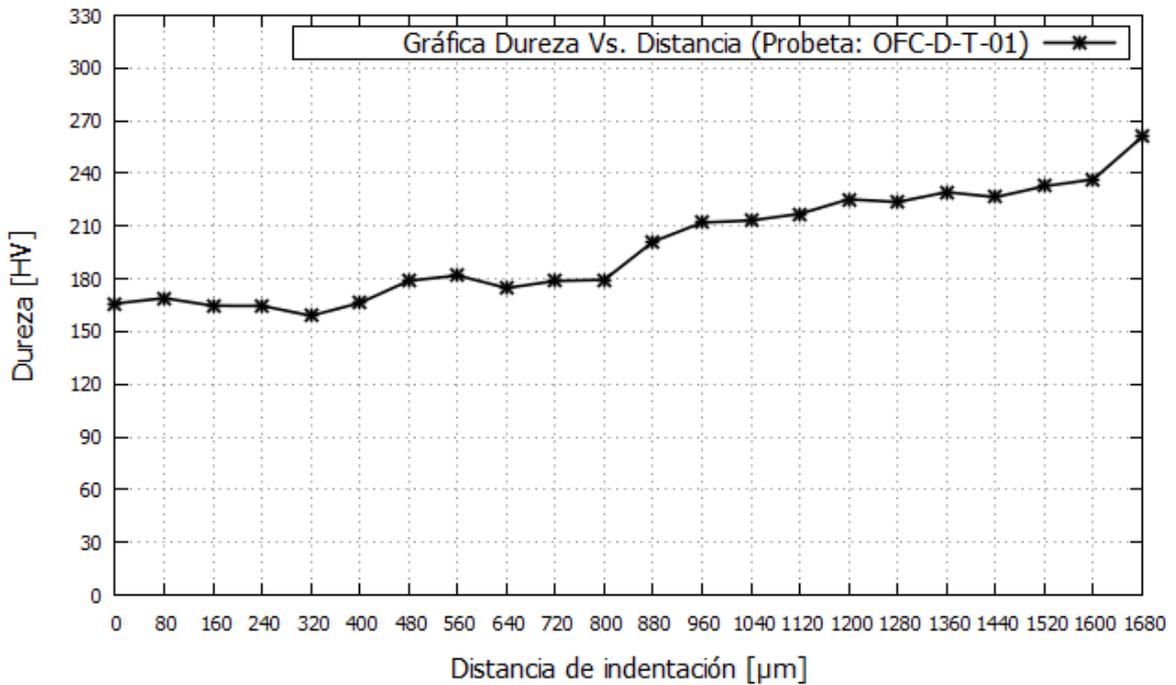
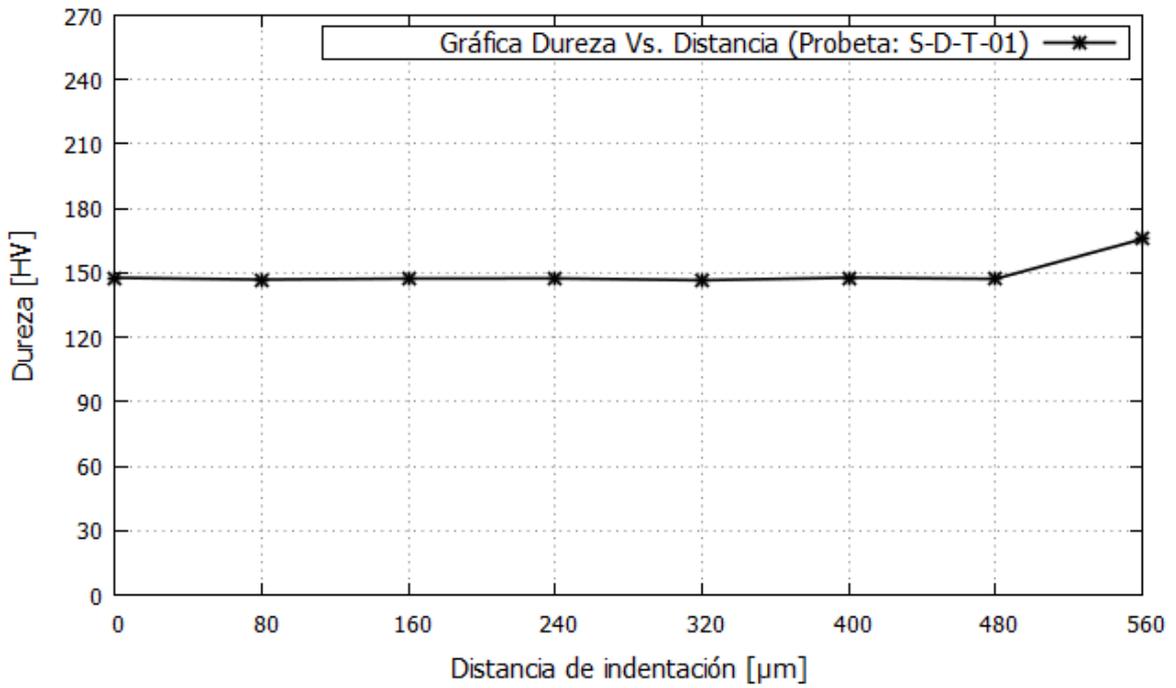
Interpretación: : La muestra corresponde a acero ferrítico perlítico con la presencia de ferrita acicular, laminado en caliente y terminado en frío, la ferrita se encuentra alargada producto del enfriamiento rápido del proceso de conformado. Se observa muy pequeño crecimiento de grano en el extremo de corte. No se observa la presencia de carburos.

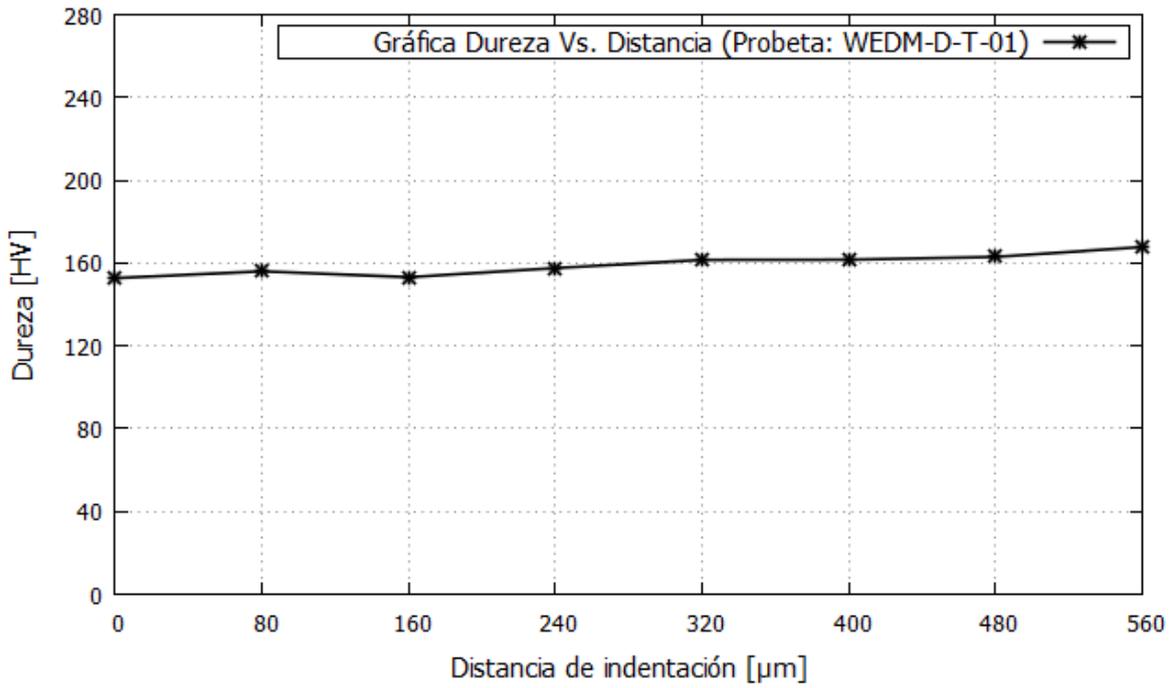
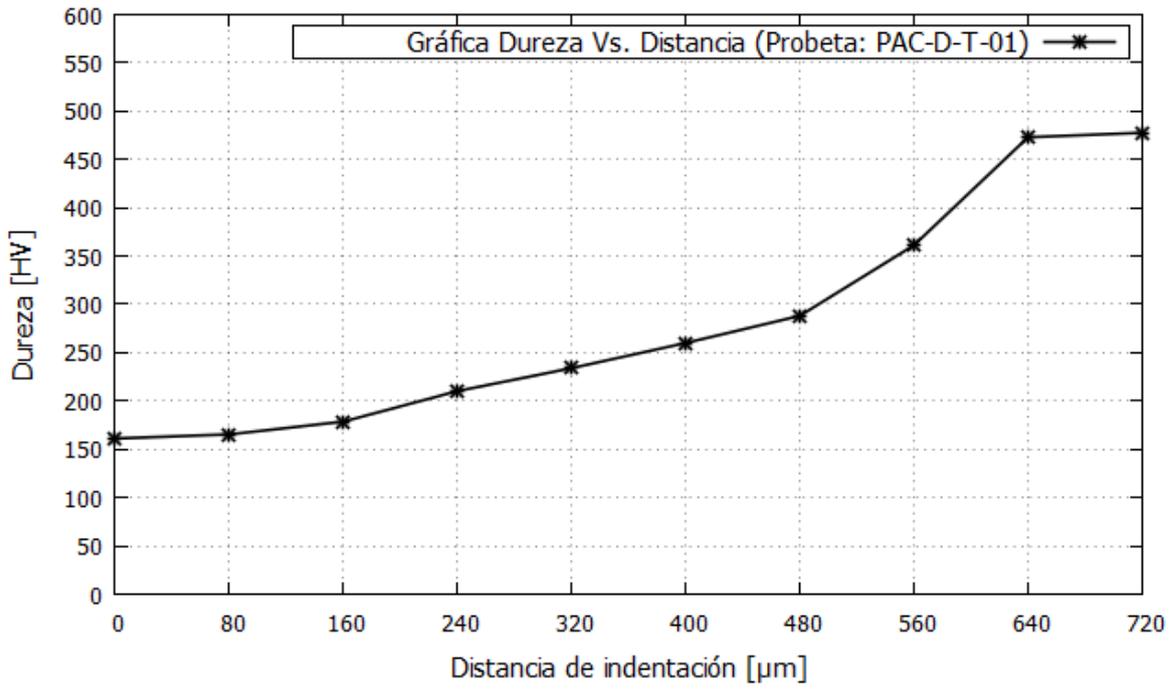
| | | |
|---|---|-----------------------------------|
| <p>Elaborado por:</p>  <p>Ing. Iván Estupiñán ILPM Engineering</p> | <p>Aprobado por:</p>  <p>MSc. Patricio Estupiñán Jefe de Laboratorio</p> | <p>Cliente / Testificado por:</p> |
|---|---|-----------------------------------|

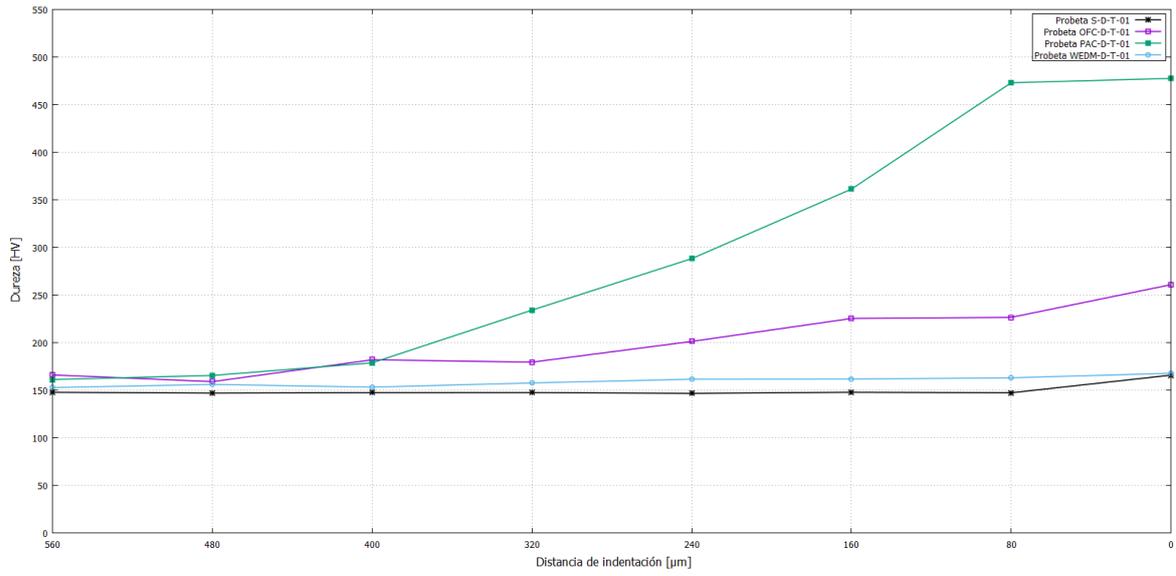
Emilio Estrada NS4-139 y Oruña (Sector La Kennedy) Quito-Ecuador

Teléfono: 02 2812094 Fax 02 2411714 Email: ilpm@ilpm-ec.com Visitenos en la Web: <http://www.ilpm-ec.com>

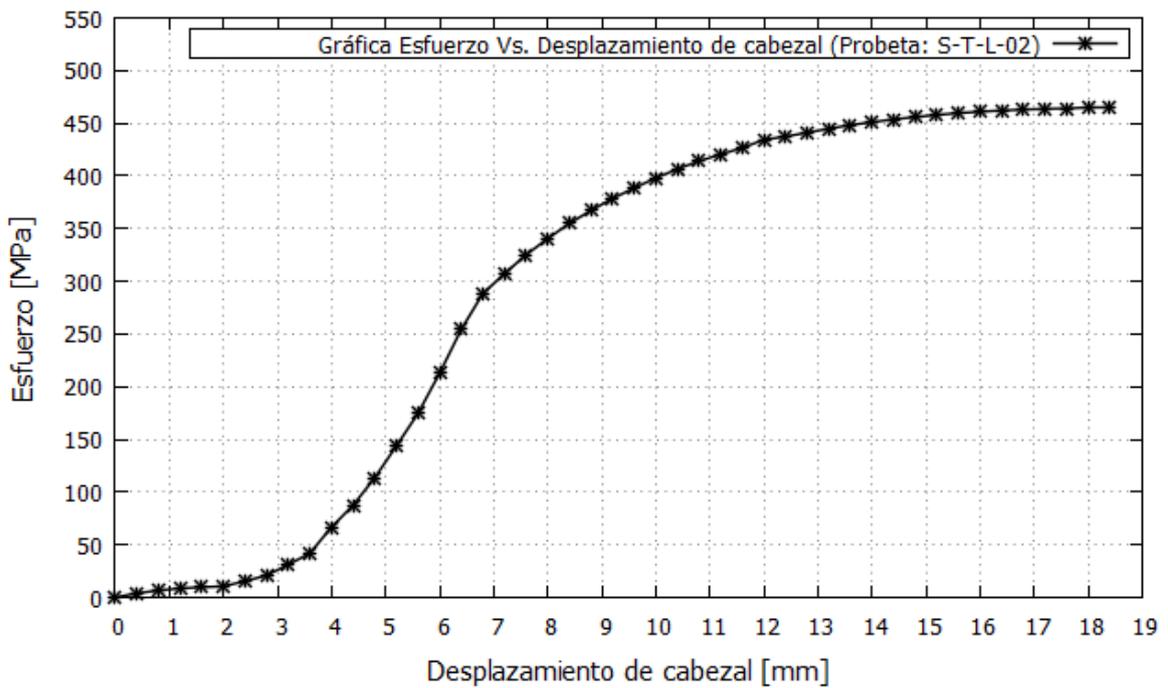
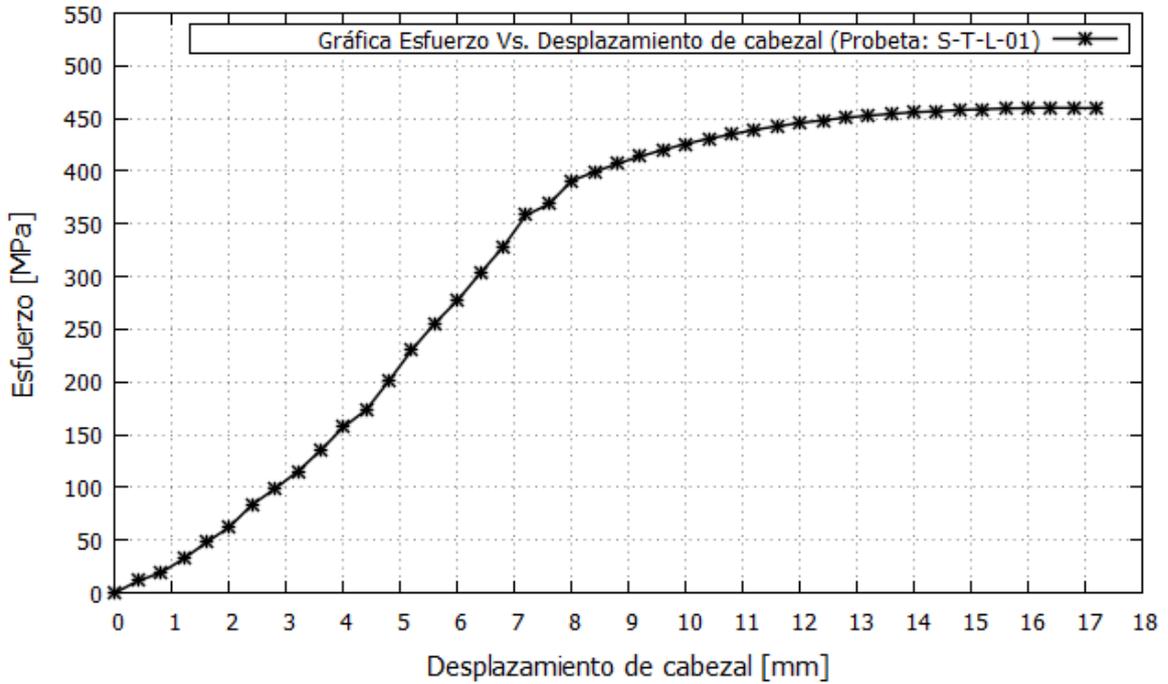
6.7. ANEXO VII. Gráficas de dureza en función de la indentación

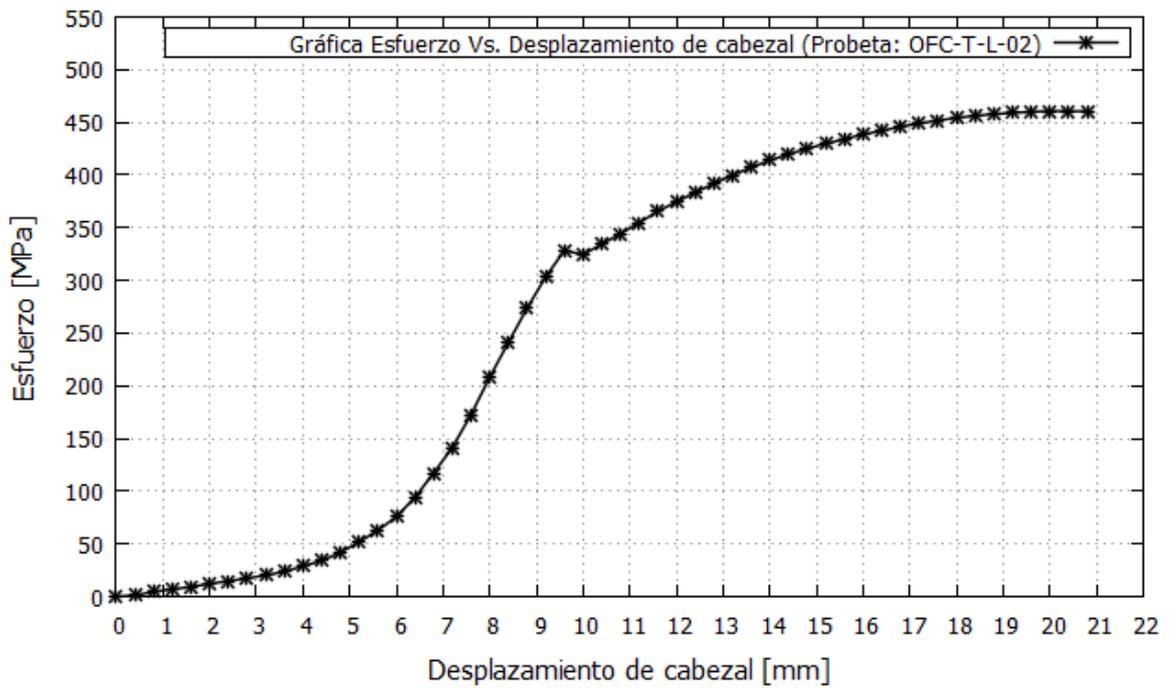
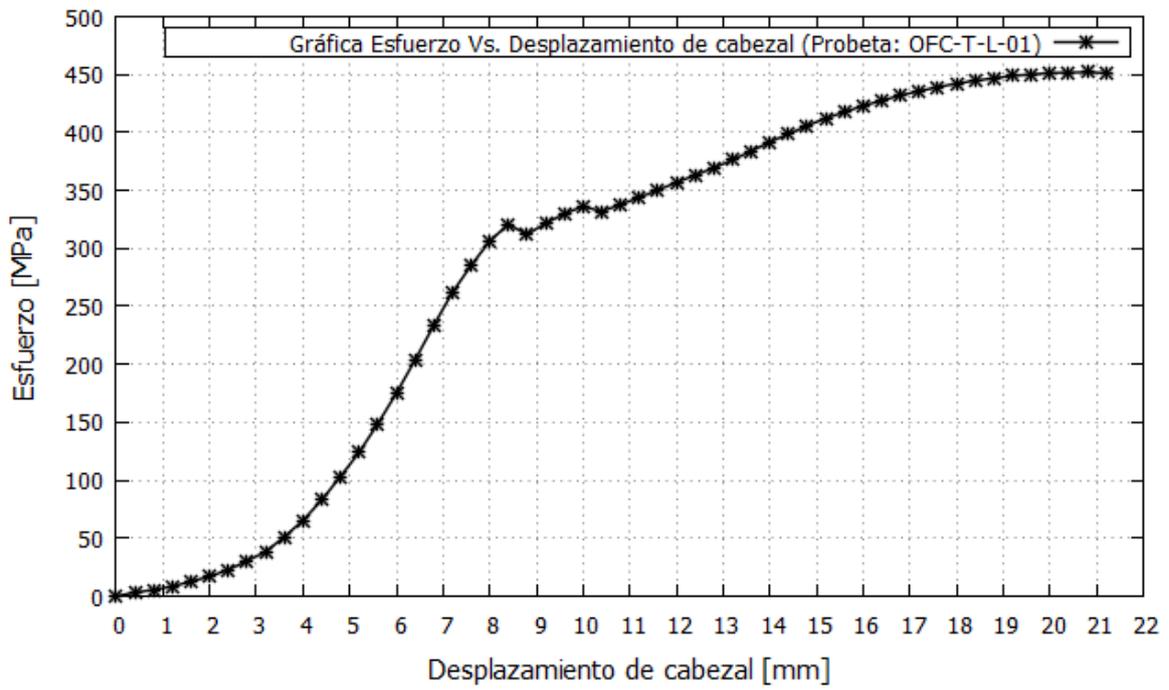


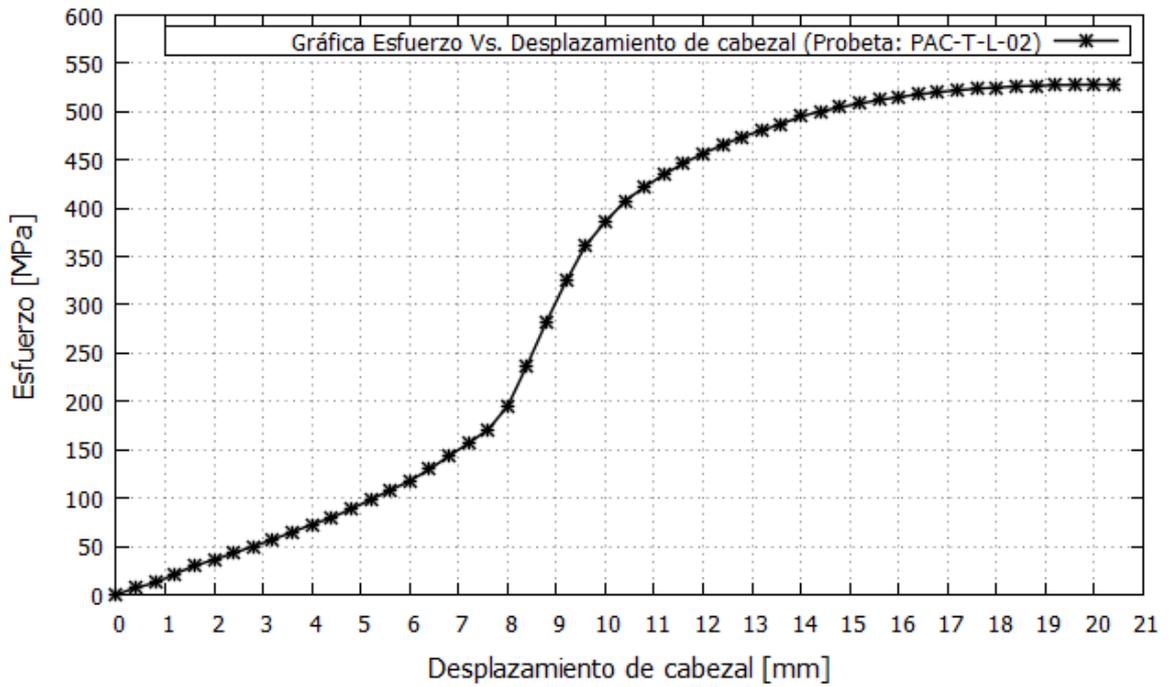
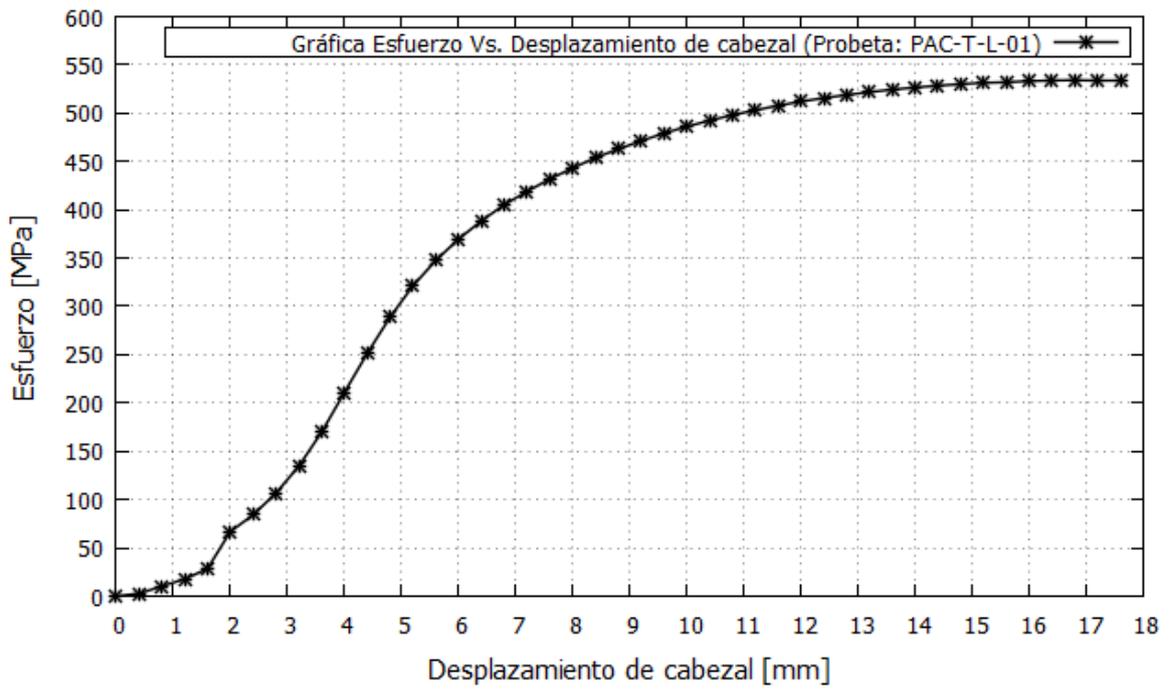


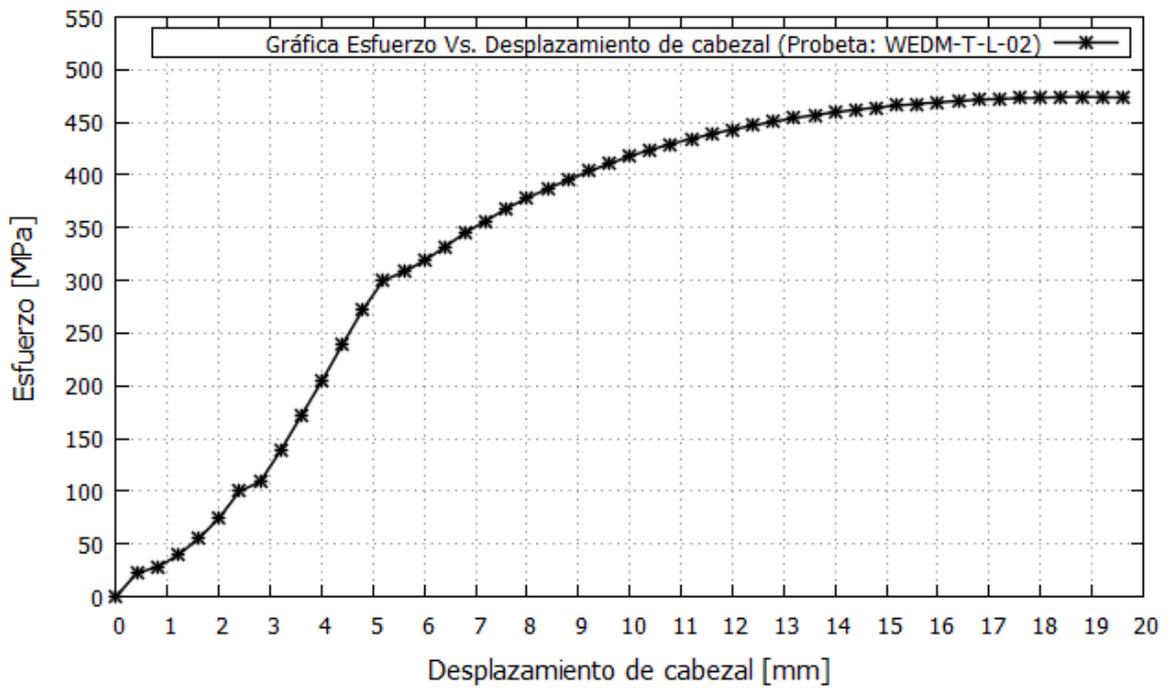
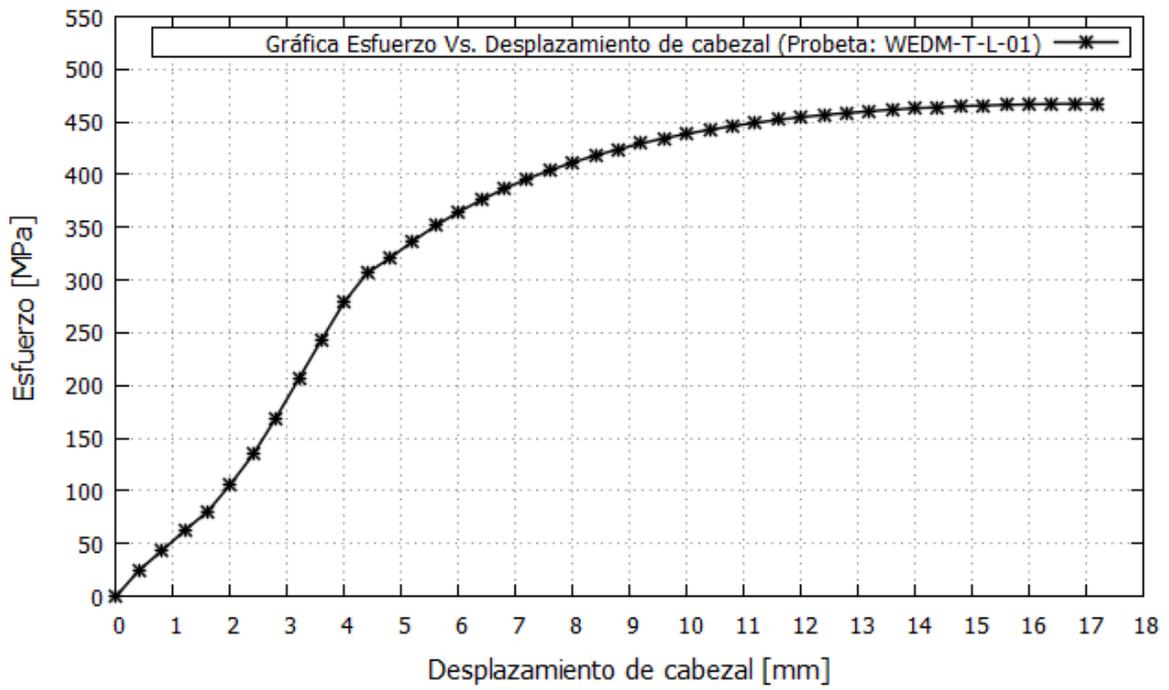


6.8. ANEXO VIII. Gráficas de esfuerzo en función del desplazamiento

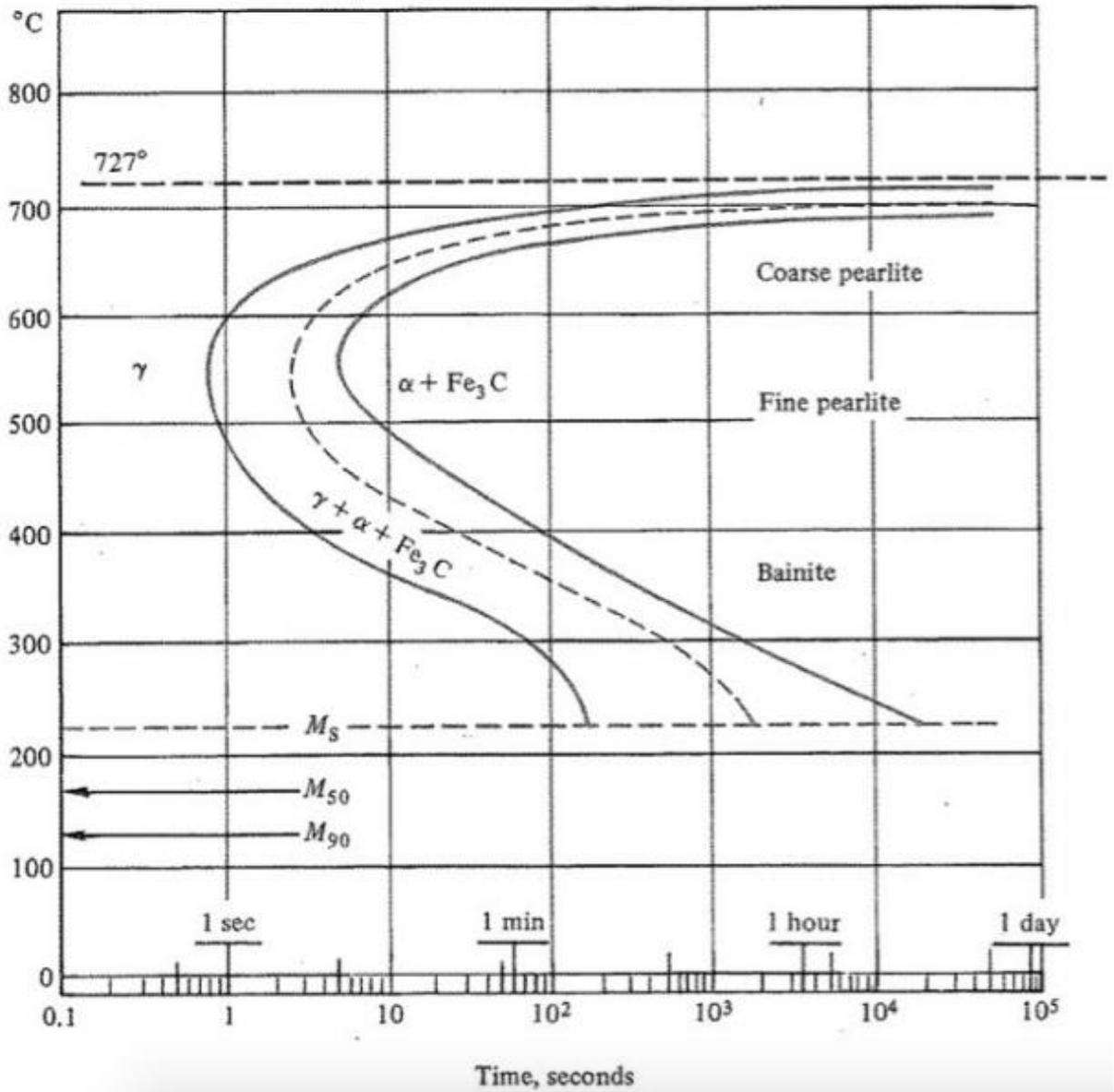








6.10. ANEXO X. Diagrama TTT para acero AISI 1010



ORDEN DE EMPASTADO