

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Dr. "Antonio Núñez Jiménez"

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia

Especialidad: Metalurgia y Materiales

# Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE

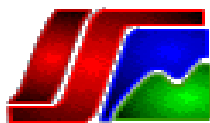
INGENIERÍA EN METALURGIA Y MATERIALES

Análisis microestructural del acero al  
carbono 1 010 después de ser sometido  
un proceso de corte por oxicorte y por  
plasma

Anyel Alejandro Reyna Núñez

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución"



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Dr. "Antonio Núñez Jiménez"

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia

Especialidad: Metalurgia y Materiales

# Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE

INGENIERÍA EN METALURGIA Y MATERIALES

Título: Análisis microestructural del acero al carbono 1 010  
después de ser sometido un proceso de corte por oxicorte y  
por plasma

Autor: Anyel Alejandro Reyna Núñez

Tutor(a): Ing. Aurelia Viada Estévez

Moa, 2019

"Año 61 de la Revolución"

## Pensamiento

---

“El futuro de nuestra patria tiene que ser necesariamente un futuro de ciencia, tiene que ser un futuro de hombres de pensamiento porque precisamente eso es lo que estamos sembrando, lo que estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia”

Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz

## **Dedicatoria**

---

A mi madre Noelvys Lisset Núñez Peña y a mi padre Aristides Reyna Velázquez por su amor, educación a lo largo de mi vida y por siempre creer en mí. A mis hermanos Adrián Reyna, Gabriela Reina y Marcos Alessandro Reyna por apoyo incondicional en mi vida. A mis abuelos por siempre estar presente en todo momento. A mi pareja por siempre darme su apoyo incondicional y estar a mi lado en todo momento y familia en general. A todos los que creyeron y confiaron en mí.

## Agradecimientos

---

Este trabajo es el fruto de mis sacrificios, además de ser una meta lograda, es por eso que quiero agradecerles a todas esas personas que confiaron en mí y creyeron que si podía hacerlo, les agradezco a:

- A mi madre Noelvys Lisset Núñez Peña y a mi padre Aristides Reyna Velázquez que siempre confiaron en mí y toda la educación que me transmitieron, no hay palabras para agradecerle.
- Muy especial al tutor(a) Ing. Aurelia Viada Estévez por todo su apoyo sincero e incondicional en la realización de esta tesis.
- Mi familia por estar siempre presentes en mi vida y haberme apoyado en cada momento.
- Mis compañeros de aula por haberme dado la mano cada vez que los necesité, por haber sido capaces de darle un cambio a mi vida, y aún más importante, por demostrarme que la verdadera amistad si existe.
- A mis amigos por apoyarme en todo momento.
- A mi pareja por creer ciegamente en mí y por estar siempre a mi lado.
- A los profes que me dieron clase y a los que consejos sanos supieron darme; a todos los que de una u otra forma hicieron realidad este sueño y que no los menciono aquí GRACIAS de corazón.

¡Muchísimas Gracias!

## **Declaración de Autoridad**

---

Yo, Anyel Alejandro Reyna Núñez, autor del presente Trabajo de Diploma, por medio de este escrito certifico su propiedad intelectual en favor de la Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez para el uso que la misma estime conveniente".

---

Anyel Alejandro Reyna Núñez

Autor

---

Ing. Aurelia Viada Estévez

Tutor(a)

## RESUMEN

En el presente trabajo se analizó la influencia de los cortes térmicos por plasma y oxicorte sobre la microestructura del acero al carbono 1 010. El material fue sometido a los procesos de cortes térmicos por oxicorte y plasma. Mediante el microscopio óptico se cuantificaron las fases microestructurales obtenidas en 2 probetas, donde en la sometida al proceso de oxicorte se tuvo un promedio de 60,32 % ferrita, 32,68 % perlita y 6,99 % precipitados; luego se analizó la probeta sometida al corte por plasma, y se obtuvo 54,56 % ferrita, 37,55 % perlita y 7,89 % precipitados. Mediante ensayos de microdureza, se determinó que las probetas poseen una mayor dureza en los bordes que en el centro de la pieza, donde la probeta sometida al oxicorte posee en el centro una dureza de 68,51 HV y en los bordes 85,31 HV, y para la sometida al corte por plasma posee una dureza en el centro de 72,20 HV y en los bordes 184,20 HV, respectivamente. Se analizó que para ambos procesos de cortes térmicos existe un predominio de la fase ferrita en la estructura del acero al carbono 1 010 y se encuentra presente la perlita y la formación de precipitados en menor medida, esto explica que como el acero al carbono 1 010 es bajo aleado, es decir, su contenido de carbono es muy pequeño no permite la formación de ningún microconstituyente en la estructura del material y posee un alto contenido de hierro que da lugar a la formación de la ferrita.

Palabras claves: Cortes térmicos, microestructura, microdureza.

## **ABSTRACT**

In the present work, the influence of thermal cuts by plasma and oxyfuel on the microstructure of carbon steel 1 010 was analyzed. The material was subjected to the thermal cutting processes by oxycut and plasma. By means of the optical microscope, the microstructural phases obtained in 2 specimens were quantified, where in the one subjected to the oxyfuel process, an average of 60.32 % ferrite, 32.68 % perlite and 6.99 % precipitates were obtained; then, the test piece subjected to plasma cutting was analyzed, and 54.56 % ferrite, 37.55 % perlite and 7.89 % precipitates were obtained. Using microhardness tests, it was determined that the test pieces have a greater hardness in the edges than in the center of the piece, where the test piece subjected to oxyfuel has a hardness of 68.51 HV in the center and in the edges 85.31 HV, and for the one subjected to plasma cutting, it has a hardness in the center of 72.20 HV and edges 184.20 HV, respectively. It was analyzed that for both processes of thermal cuts there is a predominance of the ferrite phase in the carbon steel structure 1 010 and the perlite is present and the formation of precipitates to a lesser extent, this explains why, as the 1010 carbon steel is low alloy, that is, its carbon content is very small does not allow the formation of any microconstituent in the structure of the material and has a high iron content that leads to the formation of ferrite.

**Keywords:** Thermal cuts, microstructure, microhardness.



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL .....	5
1.1 Características generales de los aceros. ....	5
1.2 Características generales del proceso de corte por chorro .....	8
1.2.1 Proceso de corte de chapa por oxicorte. ....	9
1.2.1.1 Ventajas del oxicorte .....	13
1.2.2 Proceso de corte de chapa por arco de plasma.....	14
1.2.2.1 Ventajas del corte por plasma .....	18
1.2.2.2 Inconvenientes del corte por plasma y comparativa con el Oxicorte .....	18
1.2.2.3 Comparación entre corte por plasma y oxicorte.....	20
1.3 Descripción del taller de corte y conformado de METUNAS de la empresa .....	23
1.3.1 Descripción de la tecnología del taller de corte y conformados .....	23
1.4 Análisis de trabajos precedentes .....	24
Conclusiones del capítulo .....	33
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
2.1 Composición química del acero al carbono 1010.....	34
2.1.1 Análisis microestructural de la muestra patrón .....	34
2.2 Descripción de los procesos de corte térmico por oxicorte y plasma. ....	35
2.2.1 Descripción del software (FASTCAM) utilizado para la realización de los cortes térmicos. ....	40
2.3.2 Lijado grueso y fino .....	43
2.3.3 Ataque de las muestras para su examen microscópico .....	43
2.3.4 Pulidora metalográfica Montasupal.....	44
2.3.5 Microscopio óptico.....	44
2.4 Análisis de microconstituyentes de las muestras metalográficas. ....	45
2.5 Determinación de la microdureza.....	46
Conclusiones del capítulo .....	48
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	49
3.1 Análisis microestructural del acero 1 010 después de ser cortados térmicamente. ....	49
3.1.1 Microestructura del acero 1 010, después del corte térmico por oxicorte.....	49
3.1.2 Microestructura del acero 1 010, después del corte térmico por plasma.....	51

3.2 Determinación del porcentaje de microconstituyentes. ....	52
3.3 Análisis de microdureza.....	56
3.4 Impacto ambiental .....	56
Conclusiones del capítulo .....	57
CONCLUSIONES .....	58
Bibliografía .....	59

## INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos el hombre ha trabajado los metales, desarrollando materiales y herramientas que marcaron el progreso de las comunidades. En los últimos años, sin embargo, la industria metalmeccánica ha crecido a pasos agigantados de la mano de la minería y otras actividades económicas. Y hoy afronta el desafío de adecuarse a las exigencias de un contexto mundial con altas y bajas.

Precisamente, impulsado por el dinamismo que han experimentado las industrias en el mundo, el mercado de empresas dedicadas al diseño y construcción de estructuras metálicas creció y se diversificó. A pesar de que la minería ha sufrido la ralentización de varios de sus proyectos, las empresas proveedoras de estos productos sostienen que el sector minero sigue siendo muy importante para el desarrollo de negocios en este rubro, a lo que se suman otros sectores como los de construcción, energía e hidrocarburos que continúan demandando grandes volúmenes de estructuras metálicas para sus operaciones (Castro, 2016).

En la actualidad nuestro país es también un gran productor de estructuras metálicas, contando con la Empresa de Estructuras Metálicas UEB " Comandante Paco Cabrera " y su denominación comercial es METUNAS", la cual pertenece a la provincia de Las Tunas y se adecua a las demandas expuestas por el mercado. Dicha empresa está encaminada a la producción en serie elementos metálicos necesarios para la edificación de diferentes tipos de construcciones, tales como vigas, parales, tuberías, tanques, calderas entre otros. Con el objetivo de disminuir la importación de este tipo de objetos metálicos con gran costo en el mercado internacional, hoy en día METUNAS está en la cima de este tipo de producciones en Cuba, convirtiéndose en el principal abastecedor de las obras más importantes en el país, apoyando además grandes cantidades de labores que no pertenecen al sector constructivo y con importantes aportes al PIB nacional por diferentes tipos de exportaciones, pedidos principalmente por naciones latinoamericanas.

El objeto social de METUNAS es producir y comercializar plantas completas industriales, equipos tecnológicos, estructuras metálicas, andamios, perfiles conformados y sus componentes, carpintería de PVC, de aluminios y productos de poliéster reforzado; además presta servicios de alquiler, montaje, mantenimiento y reparación de sus producciones.

Cuenta con taller de corte y conformado, taller de ensamble y soldadura, taller de pintura y un taller de transformados como instalaciones principales (Castro, 2016).

Al ser una empresa mecánica los procesos que se llevan a cabo son fundamentalmente procesos de conformación de metales, para el desarrollo de sus productos principales. Entre estos procesos destacan el corte, el doblado, la soldadura, el perfilado, entre otros.

Dentro de los procesos de corte que se llevan a cabo están el troquelado o punzando, el estampado, el cizallado, el corte con sinfín y los cortes por chorro.

Los principales métodos de corte de planchas de acero, son los denominados “térmicos”, como por ejemplo, el Oxicorte y el Plasma. Sin embargo, estos métodos presentan una serie de inconvenientes como: gran formación de escoria, formación de gases peligrosos, radiaciones UV, entre otros, manifestándose con mayor intensidad en materiales con poco espesor (Vhymeister y Paredes, 2017).

Los procesos de corte térmico constituyen la tecnología más extendida para la fabricación de componentes demandados por un gran número de sectores, que incluyen entre otros la construcción de puentes y estructuras metálicas, industria naval, maquinaria de construcción y la industria del automóvil. Los mayores inconvenientes de estos procesos son las condiciones resultantes en la superficie de corte obtenida y los cambios microestructurales que aparecen en la región anexa al borde de corte, los cuales pueden afectar al comportamiento del componente en servicio, especialmente si está sometido a cargas cíclicas (García, 2015).

Debido a una reciente inversión realizada con capital extranjero, China como país inversionista han sido incorporados una serie de equipos modernos con la intención

de realizar de manera más eficiente algunos de estos procesos para así mejorar la eficiencia de la empresa, la calidad de los productos fabricados, aumentar el PBI del país, sustituir las importaciones por exportaciones y sobre todo lograr la satisfacción de los clientes con los servicios prestado por la entidad. Por lo planteado anteriormente la empresa tiene la necesidad de realizar un estudio detallado de la influencia que tiene los cortes térmicos por oxicorte y por plasma en la microestructura de las planchas de aceros al carbono que son empleadas para realizar algunos de los productos de dicha entidad.

**Problema de investigación:** La no evaluación de la influencia de los cortes térmicos por plasma y oxicorte en una plancha de acero al carbono sobre su microestructura.

**Objeto de investigación:** acero al carbono 1 010.

**Campo de acción:** Microestructura y dureza del acero al carbono 1 010.

**Hipótesis:** Si se realizan los cortes térmicos por plasma y oxicorte en una plancha de acero al carbono 1 010, se podrá determinar las fases presentes en la estructura interna de dicho material luego de un análisis microestructural.

**Objetivo general:** Analizar la influencia de los cortes térmicos por plasma y oxicorte sobre la microestructura del acero al carbono 1 010.

**Objetivos específicos:**

1. Caracterizar el acero al carbono 1 010 y los cortes térmicos por oxicorte y plasma.
2. Realizar una valoración comparativa entre las microestructuras del acero al carbono 1 010 luego de ser sometido a los cortes térmicos por oxicorte y plasma.
3. Determinar la microdureza del material luego de ser sometido a los cortes térmicos por plasma y oxicorte.

**Tareas de investigación:**

1. Establecer el estado del arte de la investigación.
2. Identificar los principales parámetros que influyen en los procesos de corte térmico por oxicorte y plasma.
3. Determinar los valores de microdureza del material luego de ser cortados por los procesos de oxicorte y plasma.

**Los métodos de investigación empleados en el trabajo se exponen a continuación:**

- Histórico-lógico: para la actualización del estado del arte relacionado con las teorías de cortes térmicos por oxicorte y plasma, y los cambios microestructurales que experimentan los aceros al ser cortados térmicamente.
- Sistémico: para la sistematización de la teoría básica de los procesos de corte que resulta de interés para el análisis microestructural del objeto de estudio.
- Inductivo-deductivo: para la determinación de las limitaciones de las investigaciones consultadas, al ser aplicadas al corte por oxicorte y por plasma, y para la adecuación del análisis microestructural de las probetas luego que ser sometidas a estos procesos.

## **CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL**

En el presente capítulo se describen los principales rasgos y fundamentos teóricos del proceso de corte por chorro, así como el análisis crítico de trabajos precedentes realizados sobre el área o tema en cuestión, lo cual permite obtener una panorámica actual acerca del mismo.

### **1.1 Características generales de los aceros.**

#### **Aceros – Definiciones**

- 1) Aleación de Fe-C con un contenido de carbono, de hasta el 2,06 % y estando el carbono en forma de carburo triferico ( $\text{C Fe}_3$ , cementita).
- 2) Producto siderúrgico con un tenor de Carbono máximo de 2,06 % exclusive.
- 3) Producto resultante del afino del arrabio con chatarra de acero fundido en Hornos Siemens Martín, Eléctricos, al oxígeno, etc.
- 4) Producto resultante del afino del arrabio en Convertidores y hornos especiales.
- 5) Producto resultante de la refusión de la chatarra de acero en hornos S. Martín, eléctricos, excepto en Convertidores.
- 6) Aleación Fe-C prácticamente deformable, que puede contener hasta un 2 % de C, además de otros elementos como impurezas como el silicio, manganeso, fósforo, azufre etc.

#### **Aceros comunes al carbono**

En estos aceros, el único elemento que interviene como aleante, es el C. No obstante, siempre existirán pequeñas cantidades de algunos elementos que en general, tienen la consideración de impurezas y que provienen de diferentes fuentes. El fósforo, se disuelve en la ferrita y en menor medida en la austenita, posee un gran poder endurecedor.

## **Aceros comunes al carbono**

Los de bajo % de C son muy blandos y los de menos de 0,25 % de C no adquieren temple por inmersión directa, si no han sido previamente cementados, a medida que crece el tenor de C, crece la resistencia y la dureza, disminuyendo la maleabilidad. Los ceros 1010 y 1015, de estructura ferrítica no son usados donde se requiera resistencia, solidez o una buena terminación superficial. El trefilado y el laminado en frío, le aumentan ligeramente la dureza. Se emplean en piezas forjadas, embutidas y son soldables. El 1020 puede ser soldado a tope y estirado fácilmente, se lo utiliza como acero de cementación. No tiene buena resistencia ni adquiere buena terminación. El 1025, maquina bien y obtiene aceptable dureza, cementado en caja. El 1030 adquiere temple en agua salada y toma buena dureza después de la cementación. El 1035, no debe ser templado en agua, al menos que se trate de piezas de regular diámetro. Ambos maquinas bien y se los usan en un sinnúmero de elementos de máquinas. Los aceros 1 040, 10 445 y 1050, de tenor medio de C, se maquinas bien y adquieren buen temple. Se los usan piezas forjadas, espárragos, bridas, palancas, tornillos, ejes, árboles, engranajes, etc. Los 1060 y 1070, templados al aire o en aceite, son destinados a cuchillas, chavetas, discos de embragues y para elementos elásticos, como arandelas de presión y aros de cierre. Los aceros 1080 y 1090, tienen gran dureza y elasticidad y se los aplica en resortes, eslabones de cadena, cuchillas, hojas de elásticos, discos y rejas de arados, chavetas, etc.

Los aceros resulfurados y refosforados, de la serie 1100, conocidos como de tortillería o de corte libre, han surgido debido a la presencia del P que los hace más quebradizos y al de azufre que facilitan el arranque de virutas aventajando a los de semejante contenido de C, en la producción en serie con máquinas automáticas.



Por el contrario, como el azufre perjudica la maleabilidad no deben introducirse como chatarra en hornos de cubilote.

### **Aceros aleados**

Los elementos de aleación se añaden a los aceros para muchos propósitos, como ser:

- 1) Aumentar la templabilidad.
- 2) Mejorar la resistencia a temperaturas comunes.
- 3) Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas.
- 4) Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima.
- 5) Aumentar la resistencia al desgaste.
- 6) Aumentar la resistencia a la corrosión.
- 7) Mejorar las propiedades magnéticas.

Los elementos de aleación pueden clasificarse de acuerdo en la forma como se distribuyen en los dos constituyentes principales de un acero recocido.

Grupo 1: Elementos que se disuelven en la ferrita

Grupo 2: Elementos que se combinan con el Carbono para formar carburos simples o compuestos.

Como la microestructura del acero determina la mayoría de sus propiedades y aquella está determinada por el tratamiento y la composición química; uno de los sistemas más generalizados en la nomenclatura de los aceros es el que está basado en su composición química.

En el sistema SAE y AISI, los aceros se clasifican con cuatro dígitos XXXX. Los primeros dos números se refieren a los dos elementos de aleación más importantes y los dos o tres últimos dígitos dan la cantidad de carbono presente en la aleación. Un acero 1040 AISI es un acero con 0,4 % C; un acero 4340 AISI, es un acero aleado que contiene 0,4 % C, el 43 indica la presencia de otros elementos aleantes. Las mismas nos dan la posibilidad de identificar a los aceros.

## **1.2 Características generales del proceso de corte por chorro**

Entre aquellos procesos no convencionales cuyo campo de aplicación es principalmente el corte de chapa, se puede realizar una particular clasificación que nos lleva a englobar muchos de ellos (90 % de las aplicaciones industriales) en un sólo grupo denominado procesos de corte por chorro (beam cutting processes). En estos procesos, la herramienta se sitúa en dirección perpendicular a la superficie de la chapa. El chorro incide en esta dirección y corta la chapa. La naturaleza del chorro determina una segunda clasificación de los diferentes procesos de corte por chorro (Cuesta, 2002).

Aquellos procesos que utilizan la acción mecánica directa, ya sea de un único material o combinándolo con abrasivos, para incidir sobre el material a cortar, se denominan procesos de corte por chorro mecánico (mechanical beam processes). Se utilizan cuando no pueden emplearse técnicas tradicionales debido a la dureza del material, a su extrema fragilidad o, principalmente, cuando pueden resultar dañados si se mecanizan por procesos eléctricos o térmicos (sensibilidad a altas temperaturas). Cabe citar, dentro de los procesos de esta naturaleza, el corte por chorro de agua con o sin abrasivos (waterjet machining, WJM y abrasive waterjet machining, AWJM) y el corte por chorro de aire con abrasivos (abrasive jet machining, AJM) (Valiño, 2002).

Cuando la separación del material se debe principalmente al efecto de las altas temperaturas localizadas sobre una pequeña zona de material, estamos ante los procesos de corte por chorro térmicos. Tienen un amplio campo de aplicación, y ocupan un segmento cada vez mayor del mercado.

Esto se debe en parte, no sólo al incremento en el número de máquinas, sino también a la diversidad de fuentes de energía utilizadas para provocar el aumento térmico localizado. El oxicorte (flame or oxygen-flame cutting), el arco de plasma (plasma arc system) y el láser (laser beam cutting) son los principales procesos aplicables a la chapa. El corte por haz de electrones (electron beam cutting) pertenece también a este tipo de procesos, pero no está indicado para el corte 2D de chapa, sino más bien para mecanizado de precisión en el taladrado de pequeños agujeros, grabado, tratamientos térmicos, etc.

Un parámetro crítico que presentan todos estos procesos alrededor de la línea de corte es la zona afectada térmicamente (ZAT) alrededor de la línea de corte. Actualmente existen trabajos encaminados a reducir dicha zona, no sólo controlando los parámetros de corte sino mejorando y/o ensayando nuevas tecnologías. En el corte por láser se reducen significativamente las anchas zonas ZAT que presentan procesos como el Plasma o el Oxicorte (1-4 mm), alcanzándose en condiciones óptimas y utilizando procesos como el láser, valores de 0.1 mm. Esta disminución de la ZAT, en ciertos procesos térmicos, redundan en la posibilidad de cortar materiales sensibles al calor como plásticos, telas, etc. Aumentando sensiblemente su campo de aplicación. (Rico, 2002)

### **1.2.1 Proceso de corte de chapa por oxicorte.**

El proceso de oxicorte, al contrario de lo que pueda parecer, no consiste en una fusión del metal, el corte se produce por una literal combustión del mismo. En otras palabras, al cortar quemamos el metal a medida que avanzamos con el soplete. Por esta razón, la presencia de aleantes se hace crítica, ya que merman la capacidad del acero a ser quemado. (Valiño, 2002)

Para que se produzca una reacción de combustión son necesarios tres requisitos; presencia de combustible (a su temperatura de ignición), presencia de comburente (en una mínima proporción), y un agente iniciador. En el proceso de oxicorte, el combustible es el Fe, el comburente el O<sub>2</sub>, y el agente iniciador la llama del soplete. En condiciones normales, aunque apliquemos un agente iniciador a una pieza de

acero, ésta no arde espontáneamente por dos motivos; el Fe contenido no está a su temperatura de ignición (aproximadamente 870 °C) y el O<sub>2</sub> atmosférico no es lo suficientemente puro (el O<sub>2</sub> atmosférico se encuentra en una proporción del 20 % y la proporción mínima necesaria para quemar el Fe es un 87 %).

El oxicorte o corte con llama, es una técnica auxiliar a la soldadura, que se utiliza para la preparación de los bordes de las piezas a soldar y para realizar el corte de chapas, barras de acero al carbono de baja aleación u otros elementos ferrosos. El cual consiste en calentar la pieza hasta una temperatura alta, pero inferior a la de fusión, aplicando luego un chorro de oxígeno a presión sobre la zona caliente. Este oxígeno provoca la combustión del hierro, transformándolo en óxidos (escorias) que se eliminan por la acción mecánica del chorro.

En otras palabras, el procedimiento se basa en la gran capacidad de oxidación de los productos férricos y en lo fácil que resulta la eliminación de los óxidos formados. Una pieza de hierro, o de acero, expuesta a la acción del aire, experimenta una oxidación progresiva. La oxidación, o combinación del metal con el oxígeno del aire, va transformando gradualmente, el producto inicial en óxido de hierro. A la temperatura ambiente esta reacción es muy lenta, pero si se calienta la pieza y se expone al aire, se observa una oxidación mucho más profunda y casi instantáneamente. (Cuesta, 2002)

- **Oxicorte a máquina**

También existen sopletes de aspiración para máquinas de oxicorte, que tienen una boquilla de presión con tubo de mezcla, donde se mezclan el acetileno y el oxígeno y son llevados hasta la boquilla de corte; o bien sopletes para boquillas mezcladoras de gases. Las boquillas de corte se dividen en:

Boquillas tipo standard: Hasta una presión de oxígeno de corte de 6 bar aproximadamente.

Boquillas de corte rápido: Hasta una presión de oxígeno.

Boquillas de gran potencia: de corte de 8 bar aproximadamente. Hasta una presión de oxígeno de corte de 11 bar aproximadamente.

Inmediatamente, y gracias a la presencia de la llama de precalentamiento que actúa también como agente iniciador, comienza la reacción exotérmica de combustión del Fe, que nos llevará finalmente al corte de la pieza. Como toda combustión, la reacción de oxidación del Fe es altamente exotérmica, y precisamente esa enorme cantidad de energía desprendida en la reacción ayuda a llevar las zonas colindantes a la temperatura de ignición, y poder así progresar en la acción del corte. (Rico, 2002)

El óxido resultante de la combustión fluye constantemente por la ranura, cuyas paredes calienta propagando la reacción de combustión. Para obtener cortes limpios y económicos, es conveniente no utilizar presiones de  $O_2$  demasiado elevadas. A menudo los fabricantes de máquinas de Oxicorte suministran tablas tecnológicas con los valores más recomendados de presión, velocidad de corte, etc. en función del espesor del material a cortar. En algunos casos, las tablas incluyen datos relativos a la sangría del corte (Tabla 1.1) en función de la presión (proporcional al espesor), y del tipo de soplete utilizado (para chaflanes, de tipo doble o triple, etc.). Otras tablas aportan datos del consumo de los diferentes gases utilizados con la finalidad de poder determinar el coste de las operaciones de corte.

**Tabla 1.1** Valores recomendados para el proceso de oxicorte (SAF) (Valiño, 2002)

Valores recomendados para OXICORTE									
Soplete simple					Soplete doble, de chaflanes, etc.				
Espesor (mm)	Presión O <sub>2</sub> (bar)	Sangría ½ kerf (mm)	Velocidad de corte (mm/min)		Espesor (mm)	Presión O <sub>2</sub> (bar)	Sangría ½ kerf (mm)	Velocidad de corte (mm/min)	
			Recto	Curvo				Recto	Curvo
3 - 4	2	1	700	600	3	2 - 4	1,5	800	530
5 - 6	4		730	630	5			750	480
					10			700	400
6 - 7	5 -	1,6	730	630	10	3 - 4	2	640	450
8 - 9	7,5		700	600	15			550	400
10			660	560	20			520	360
15			620	520	25			500	330
15	7 - 8	1-9	620	520	25	4 - 5	2,5	530	360
20			560	460	30			450	300
25			520	420	40			400	260
					50			350	250
25	7,5 -	2,3	520	420	50	4 - 5	3	390	260
30	8,5		500	400	60			320	230
35			480	380	80			300	210
40			430	360					
40	7 -	2,2 - 2,4	430	360	80	4 - 5	3,5 - 4	320	220
50	7,5		410	310	100			300	200
60			390	290	120			270	170
60	6 - 8	3,2 - 3,5	390	290	120	5 - 6	4,5 - 5,5	300	190
75			340	270	150			200	150
100			330	250	200			170	120
100	7,5	3,5 - 3,8	340	250	200	6	5,5 - 6	190	130
150			260	210	250			140	110
200			170	160	300			120	90
200	7,5	4	170	160					
250		4,2	150	140					
300		8	130	110					

Es por ello que la aplicación fundamental de oxicorte, y para la cual está diseñado, es el corte de aceros de bajo contenido en Carbono (normalmente entre 0,1 % y 0,3 %) y bajo contenido en aleantes. La presencia en altas concentraciones de los aleantes normalmente presentes en el acero afecta a la capacidad del proceso de cortar el metal. Elementos como el Mn, Si, P y S, afectan poco a esta capacidad cuando están presentes en concentraciones normales. Por otra parte, elementos como el Cr, Ni, Mo, y por supuesto el C, reducen la capacidad de corte del O<sub>2</sub> existiendo algunos límites a partir de los cuales el corte no es posible: 5 % para el Cr, 7 % para el Ni, etc. (Valiño, 2002).

Antes de intentar cortar una chapa mediante oxicorte, deben tenerse en cuenta los elementos aleantes contenidos en su material, sus combinaciones, exactamente igual a como debe hacerse antes de aplicar un tratamiento térmico o un endurecimiento a la llama. Todos los metales deben examinarse, no solamente desde el punto de vista de los aleantes que contienen, sino también de las propiedades que las combinaciones que dichos aleantes tienen.

La principal función de la llama de precalentamiento es llevar la pieza hasta la temperatura de ignición, que como se ha mencionado anteriormente es de aproximadamente 870 °C.

Existen muchas aplicaciones de oxicorte en las que no se requiere estos niveles de calidad y normalmente se aceptan cortes más bastos. Este es el caso más general en el que la superficie del corte va a ser cubierta con soldadura, escondida dentro de la pieza a fabricar o cubierta con pintura. Si la calidad que se le exige al corte no es la máxima, la velocidad de avance puede ser, en muchos casos, incrementada. (Cuesta, 2002)

#### **1.2.1.1 Ventajas del oxicorte**

El corte con oxígeno presenta varias ventajas y desventajas si se le compara con otros procesos para cortar metales, por máquinas-herramientas, por arco, etc.

Entre las ventajas se pueden mencionar las siguientes:

- Pueden cortarse el acero con mayor rapidez con OFC que por procesos de eliminación mecánica de fragmentos.
- Las secciones con formas y espesores que resultan difíciles de producir por medios mecánicos, pueden separarse económicamente por OFC.
- Los costos del equipo manual OFC son relativamente bajos.
- El equipo manual OFC es portátil y puede utilizarse en el campo.
- Es posible cortar placas grandes en el lugar donde están moviendo el soplete OFC en vez de la placa.

### **1.2.2 Proceso de corte de chapa por arco de plasma**

Mientras que en el oxicorte el oxígeno quema el metal, generando calor, en el corte con chorro de plasma el metal no se quema, porque no hay aporte de oxígeno, sino que se funde a consecuencia de la elevadísima temperatura del chorro de plasma (hasta 50000 °C) y es proyectado al exterior de la ranura por la elevada energía cinética de éste. En consecuencia, las condiciones exigidas para el oxicorte no se aplican al corte por fusión. (Rico, 2002)

El fundamento del corte por plasma se basa en elevar la temperatura del material a cortar de una forma muy localizada y por encima de los 20 000 °C, llevando el gas utilizado hasta el cuarto estado de la materia, el plasma, estado en el que los electrones se disocian del átomo y el gas se ioniza (se vuelve conductor).

El procedimiento consiste en provocar un arco eléctrico estrangulado a través de la sección de la boquilla del soplete, sumamente pequeña, lo que concentra extraordinariamente la energía cinética del gas empleado, ionizándolo, y por polaridad adquiere la propiedad de cortar.

Resumiendo, el corte por plasma se basa en la acción térmica y mecánica de un chorro de gas calentado por un arco eléctrico de corriente continua establecido entre un electrodo ubicado en la antorcha y la pieza a mecanizar. El chorro de plasma lanzado contra la pieza penetra la totalidad del espesor a cortar, fundiendo y expulsando el material.



La ventaja principal de este sistema radica en su reducido riesgo de deformaciones debido a la compactación calorífica de la zona de corte. También es valorable la economía de los gases aplicables, ya que a priori es viable cualquiera, si bien es cierto que no debe de atacar al electrodo ni a la pieza. (Rico, 2002)

No es recomendable el uso de la cortadora de plasma en piezas pequeñas debido a que la temperatura es tan elevada que la pieza llega a deformarse.

El plasma es producido elevando a muy alta temperatura gases monoatómicos o biatómicos, de manera que las moléculas se disocian o los átomos se ionicen. En estas condiciones, es posible disociar las moléculas e ionizar el gas, es decir, separar los electrones portadores de cargas negativas. Así, el átomo se convierte en un ión cargado positivamente. A medida que va aumentando la temperatura, el número de iones y electrones libres aumenta rápidamente y las cargas positivas y negativas se equilibran (Cuesta, 2002).

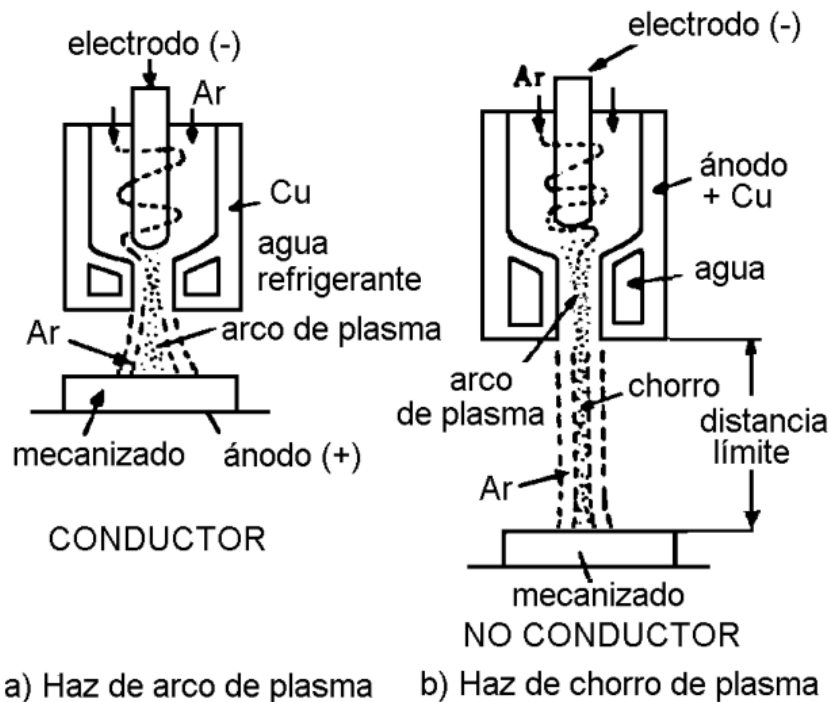
Cuando la temperatura alcanza varios millares de grados, no hay prácticamente moléculas ni átomos neutros. Estamos en presencia de un cuerpo gaseoso ionizado y por lo tanto, conductor de la electricidad.

Para la formación del haz de plasma, se calienta un gas con un arco eléctrico de forma que sus átomos se ionicen. Los electrones libres y los iones positivos engendrados producen plasma eléctricamente neutro. En el curso de su calentamiento en una cámara cerrada, el gas se dilata considerablemente y escapa por una boquilla a muy alta velocidad. (Rico, 2002)

En un sistema de plasma (Fig.1.1) el plasma se dirige dentro de una estrecha columna con un diámetro del orden de 1 mm. Este plasma es posteriormente proyectado sobre la pieza a mecanizar: si es conductora se aplica en forma de haz (Fig.1.1a) y si no es conductora de la electricidad se aplican en forma de chorro de plasma (Fig.1.1b).

Para el corte se emplea un soplete de plasma de arco transferido, en el cual el circuito eléctrico que produce el arco está conectado al soplete (electrodo que

constituye el cátodo) y a la pieza (que constituye el ánodo). El calor, muy concentrado, se obtiene a la vez por el arco eléctrico y por el chorro de plasma (denominado arco de plasma).



**Figura 1.1** Proceso de Corte por arco de plasma (Rico, 2002)

Para estabilizar el arco, es decir, para impedir una descarga entre el electrodo y la boquilla, se emplea el procedimiento de estabilización por gas, en el cual un potente torbellino de gas envuelve al arco por todas partes. De esta manera, el arco mantenido en el eje de la boquilla se encuentra aislado de las paredes de ésta. Los parámetros a controlar son, el caudal del gas, el diámetro de la boquilla y la potencia suministrada al arco.

La corriente de mando, accionada por un pulsador, pone en marcha el arco eléctrico de encendido de alta frecuencia. Este ioniza la columna de aire comprendida entre el cátodo y el ánodo. El gas generador de plasma comienza a fluir, formando remolinos en el anillo cerámico. En ese mismo momento, se hace saltar el arco eléctrico principal en la columna de gas, que se ha vuelto conductora de la

electricidad. El arco eléctrico calienta el gas, disociándolo e ionizándolo parcialmente. El plasma eléctricamente neutro que resulta de éste proceso escapa por la boquilla a una temperatura aproximada de 30.000 °C, y a una velocidad del orden de 6 km/s (Valiño, 2002).

Las boquillas pueden cambiarse fácilmente para adaptarlas al espesor a cortar. El electrodo de tungsteno, altamente refrigerado, y de un diámetro de 10 mm, es capaz de absorber elevadas intensidades. La fuente de energía eléctrica debe estar constituida por uno o varios equipos de corriente continua o rectificada, conectados entre sí, capaces de proporcionar una intensidad de 100 a 750 A con una tensión en vacío de 130 a 400 V y una tensión de trabajo de 60 a 200 V.

Los sopletes manuales funcionan con una potencia máxima de 50 kW. Los que van montados sobre máquina funcionan normalmente con una potencia de 200 kW, permitiendo altas velocidades de corte (Cuesta, 2002).

Esta moderna tecnología es usable para el corte de cualquier material metálico conductor, y más especialmente en acero estructural, inoxidable y metales no férricos. El corte por plasma puede ser un proceso complementario para trabajos especiales, como pueden ser la producción de pequeñas series, la consecución de tolerancias muy ajustadas o la mejora de acabados. También se produce una baja afectación térmica del material gracias a la alta concentración energética del arco-plasma. El comienzo del corte es prácticamente instantáneo y produce una deformación mínima de la pieza. (Cuesta, 2002)

Este proceso permite mecanizar a altas velocidades de corte y produce menos tiempos muertos, (no se necesita precalentamiento para la perforación). Permite espesores de corte de 0,5 a 160 milímetros, con unidades de plasma de hasta 1000 amperios. El corte por plasma también posibilita mecanizados en acero estructural con posibilidad de biselados hasta en 30 milímetros. Una de las características más reseñables es que se consiguen cortes de alta calidad y muy buen acabado.

### **1.2.2.1 Ventajas del corte por plasma**

- En comparación con los procesos de corte mecánicos, la fuerza requerida para sostener la pieza en su lugar de trabajo y la necesaria para desplazar el soplete (o viceversa) es muy inferior en el caso del proceso de corte con arco de plasma
- En comparación con el OFC, el proceso de corte con plasma opera en un nivel energético muy superior, lo que permite mayores velocidades de corte
- Además de su velocidad, el PAC tiene la ventaja de iniciarse inmediatamente, sin necesidad de precalentamiento
- El inicio instantáneo resulta especialmente ventajoso en aplicaciones que implican interrupción del corte, como en el corte de malla
- Permite un mejor acabado en las piezas a fabricar

### **1.2.2.2 Inconvenientes del corte por plasma y comparativa con el Oxicorte**

La ranura, alrededor de un 50 % más ancha que la realizada por oxicorte, es más ancha en la parte superior que en la base. Los cortes no resultan perfectamente a escuadra y este defecto aumenta con el espesor. Este defecto se corrige en gran medida en el corte por plasma sumergido.

En caso de utilización intensiva, el porta electrodo debe estar rodeado de una pantalla que limite los rayos ultravioletas y el operador debe llevar un aparato protector de oídos, ya que este procedimiento se caracteriza por la emisión de ruidos de frecuencia muy elevada. Actualmente, el ruido, y las emisiones peligrosas de material se reducen con el uso de una cortina de agua de protección a ambos lados de la boquilla. (Aguirre, 2007)

El oxicorte en serie puede realizarse simultáneamente con varios sopletes montados en una sola máquina, en cambio cada antorcha de plasma ha de poseer una fuente de energía y un dispositivo de mando propio, así como los cables y tubos individuales necesarios para su funcionamiento.

En general se puede decir que el corte en seco por plasma ofrece una alta velocidad de corte con una inversión relativamente baja. Los principales inconvenientes van

asociados a problemas medioambientales: la radiación luminosa es alta, el nivel sonoro a partir de 200 A es superior a 100 dB y se necesita una aspiración de humos y polvos.

Comparando los procesos de plasma y oxicorte se puede hacer una primera valoración, que se muestra en la tabla 1.2. En la tabla 1.3 puede observarse como las mayores velocidades de corte que permite el plasma para una misma operación (sobre el mismo tipo de chapa y considerando las mismas piezas cortadas) se convierten en menores tiempos de corte (Cuesta, 2002).

En la empresa METUNAS se practican ambos procesos de corte, en el caso del oxicorte se practica de forma manual como automático, y en caso del corte por plasma solo es llevado a cabo mediante un máquina de corte-4000(Pantógrafo). Ambos han demostrado tener mucha eficiencia a la hora de la fabricación de las estructuras metálicas.

**Tabla 1.2** Comparación entre los procesos de plasma y oxicorte (X = preferible)  
(Valiño, 2002)

Criterios de comparación	Plasma	Oxicorte
Velocidad de corte. espesor < 20 mm	X	
Velocidad de corte. espesor > 30 mm		X
Número de útiles		X
Achaflando		X
Inversión		X
Polución (humos, ruidos, radiaciones)		X
Consumos horarios (gases y electricidad)	X	
Soldabilidad después del corte		X
Acabado de la superficie de corte		X
Limitación de espesores		X
Oxidación mesa y chapa (plasma con mesa de agua)		X
Corte con chapas pintadas o zincadas	X	
Control de parametros (palpador, intensidades, presiones, etc.)	X	
Deformación de chapas en pequeños espesores	X	
Polivalencia (inoxidables, aluminio, etc.)	X	

**Tabla 1.3** Tiempos representativos de los ciclos de trabajo con oxicorte y plasma (Valiño, 2002).

Secuencia de Operaciones	Tiempo necesario (min)	
	Oxicorte	Corte con Plasma
Colocación de la chapa	5	5
Posicionamiento de quemador + carga del programa CN	5	5
Marcado (punzonado)	20	20
Tiempo de corte (CN)	45 500 mm/min)	10 (2250 mm/min)
Extracción de piezas y chatarra	10	10
Mantenimiento, tiempo de operario	5	5
Tiempo total del ciclo	90	55
relación: t.corte / t.ciclo	50 %	18 %

### 1.2.2.3 Comparación entre corte por plasma y oxicorte (Smith, 2018)

#### La escoria

La escoria es el metal que se derrite y queda en el filo del espesor del metal por desprendimiento. En el caso del corte por plasma la escoria es fácil de remover, incluso con un pequeño golpe podría salir.

En el oxicorte la escoria es bastante difícil de remover una vez terminado el corte ya que queda muy adherida a la lámina y es posible que se deba utilizar alguna herramienta para desprenderla.

Obviamente la escoria tiene mucho que ver con la velocidad de corte, para ambos casos.

### **La velocidad de corte**

En el oxicorte el proceso es mucho más lento que en el corte por plasma. Incluso en espesores delgados el corte por plasma puede llegar a cortar diez veces más rápido que el oxicorte, sin contar con que en el proceso de oxicorte debe hacerse un precalentamiento antes de comenzar con el corte.

En corte por plasma, una vez se enciende el equipo, se puede empezar a cortar. La velocidad está justificada en particular en espesores altos en oxicorte puesto que para ambos procesos, a medida que aumenta el espesor, la velocidad de corte disminuye.

La velocidad también tiene que ver con la zona térmica afectada. En cuanto menor sea la velocidad, mayor es el calor que se le aporta a la pieza.

Eso puede generar deformidad en la pieza, más aun cuando son láminas delgadas, de un rango entre 6 milímetros y 1,5 pulgadas.

Láminas de menos de 6 milímetros de espesor también pueden ser cortadas, pero en oxicorte el acabado y la calidad del proceso no es la más apta para producción, en comparación con el corte por plasma.

### **Las deformaciones**

Las deformaciones son producidas por calor. En el caso del corte por plasma la deformidad del corte por plasma es muy baja en comparación con el oxicorte ya que se aplica mucho más calor con éste último.

Las láminas más delgadas son las que más tienden a deformarse por el calor.

## **La calidad del corte**

La calidad del corte también varía en la comparación entre corte por plasma y oxicorte. En cuanto a espesores grandes, mayores a 1,5 pulgadas, la calidad de corte es muy parecida en ambos casos.

Incluso se recomienda usar oxicorte en equipos manuales al hacer cortes en láminas de espesor superior a 1,5 pulgadas porque se igualan las velocidades de corte pero es mucho más económico.

En cuanto a los espesores, actualmente hay tecnología de corte por plasma que permite hacer cortes hasta a 8 pulgadas de espesor, pero se limita únicamente a mecanizado.

El corte por plasma manual no es posible hasta el momento para espesores superiores a 1,5 pulgadas. En el caso de oxicorte el límite recomendado es de 6 pulgadas.

Hablando de nuevo de la escoria, en el caso del corte por plasma, una vez terminado el corte, es prácticamente producto terminado. En el caso del oxicorte, dependiendo del espesor de la lámina será más sencillo o más difícil removerla.

Por último, una ventaja que tiene el oxicorte sobre el corte por plasma es la inversión inicial. En el oxicorte la inversión es baja ya que lo que se necesita es una antorcha, dos bombonas de gas y los reguladores.

En el caso del corte por plasma, si se dispone a hacer corte manual, hay una inversión media que hacer, puesto que se necesita una fuente de plasma y las antorchas.



Como aspecto positivo, en el corte por plasma el gas que se usa es aire, así que se ahorran costos (castro, 2016).

### **1.3 Descripción del taller de corte y conformado de METUNAS de la empresa**

- Taller de corte y conformados
- Taller de ensamble y soldadura
- Taller de pintura
- Taller conformador o de transformados

#### **1.3.1 Descripción de la tecnología del taller de corte y conformados**

En este sector, dentro de los más antiguos de la UEB, es donde comienza el proceso de manufactura, es una instalación con tecnología del antiguo campo socialista con equipos que ya tienen más de 35 años de explotación, salvo discretas inversiones, que ya rondan los 15 años, el 90 % de este equipamiento está obsoleto y se mantienen en explotación gracias la pericia de los mecánicos y operarios.

Para que se tenga una idea clara, en este sector para lograr un pieza o elemento semielaborado se necesitan varias máquinas, cada una de ellas hace una elaboración específica y varios operarios intervienen en el proceso, con gasto de tiempo y salario considerablemente altos, por ejemplo para hacer las elaboraciones en una viga que se convertirá en una columna en este sector intervienen cuatro puestos de trabajo y nueve obreros, destacar que la exactitud dimensional del elemento terminado depende en su totalidad del hombre, para lograr este mismo resultado en una fábrica similar en Europa interviene una sola máquina y uno o dos operarios.

Para el taladrado de vigas y planchas:

- Trazado manual de cada uno de los agujeros que contenga cada pieza.
- Se hace muy frecuente la fabricación de máscaras o conductores para garantizar la precisión, lo cual significa un gasto adicional de otros materiales y tiempos que influyen en el precio del producto final.

Estas máquinas por su elevado uso desde su instalación presentan muchos desgastes en el sistema de traslación del cabezal de taladrado donde se encuentra el husillo, su fijación en el momento de taladrar es prácticamente imposible, causa por la cual este proceso se hace muy ineficiente (Castro, 2016).

Para el oxicorte de piezas el equipamiento está instalado desde el origen de la fábrica tienen un estado técnico totalmente deteriorado. Al pantógrafo de 6 antorchas solo le funcionan dos y su regulación se realiza manualmente ya que sus mecanismos no admiten más reparaciones. La máquina semiautomática para oxicorte funciona mediante plantillas metálicas que previamente hay que diseñarlas y fabricarlas, lo cual hace muy limitado su uso por el costo adicional que representa hacer una plantilla metálica.

#### **1.4 Análisis de trabajos precedentes**

Aldazabal et al, 2012 realizó un trabajo donde propone determinar si un corte por plasma mejora o no el comportamiento mecánico de un acero S460M de 15 mm de espesor (fundamentalmente de cara a su comportamiento en fatiga bajo cargas alternadas). Se presentan los resultados de la caracterización de un borde cortado por plasma en condiciones industriales, se discute la rugosidad superficial introducida en la superficie del borde de corte, la metalografía de la Zona Afectada por el Calor/Corte, el perfil de durezas que se introduce en el material, el comportamiento mecánico del material a diferentes distancias medidas desde la superficie del corte, que se obtiene realizando ensayos de tracción de miniprobetas instrumentadas con bandas. También se presentan las medidas de tensiones residuales, obtenidas mediante difracción de rayos X y se compara el conjunto de resultados. En la investigación se demostró que la ZAC generada por un corte con plasma es bastante fina y uniforme a través de todo el espesor del corte (800 Pm). , estos resultados concuerdan con las observaciones metalográficas y las medidas de microdurezas y que cuanto mayor es la resistencia mecánica, tanto menor es la ductilidad y la resistencia. El corte por plasma introduce grandes compresiones

residuales, hasta profundidades de aproximadamente 700 Pm. Estas compresiones resultarán beneficiosas en estructuras solicitadas con cargas alternadas.

Aguirre et al, 2007 realiza un análisis y evaluación de los procesos de corte de planchas de acero en el sector industrial de la ciudad de Loja. Caso práctico, proceso de corte con plasma. Se muestra un análisis y evaluación de los procesos de corte de planchas de acero en el sector industrial de la ciudad de Loja, haciendo un estudio de cada una de las tecnologías que a nivel mundial se utilizan; con énfasis especial en el proceso de corte por plasma, tecnología recomendada para ser implementada en el currículo de la carrera durante la formación del Ingeniero Electromecánico. Donde se concluye que; en el sector industrial de la ciudad de Loja, el proceso de corte de planchas de acero más adecuado, es aquel que cumple con los requerimientos de los trabajos que; en uno u otro taller se realizan, tales como: tipo de material, espesor, velocidad, acabado, precisión, zona afectada térmicamente, complejidad de la pieza y economía. Una vez realizada la evaluación económica del corte por plasma respecto del oxicorte y el corte manual logramos determinar que el costo del metro cortado por plasma es más económico que los anteriormente citados, pero eso si para implementar este proceso debemos tener en cuenta la inversión de cierto capital, que depende tanto de la marca, como potencia de la máquina.

Bolaños et al, 2015 propone un diseño y construcción de un sistema para corte por plasma, usando técnicas de control numérico computarizado. Para realizar el proceso de corte por plasma se utilizan gases como argón, nitrógeno y aire. Para proceder a la generación de éste estado, se requiere de un generador de alta frecuencia alimentado por energía eléctrica. El mecanismo desarrollado para realizar el corte por plasma, se basa en un sistema cartesiano, con el objetivo de desplazarse en tres direcciones, conocidas como ejes "X", "Y" y "Z". Éste mecanismo es movilizado por motores paso a paso, conectados a un ordenador, donde se controla el movimiento del sistema de corte por plasma. Se tiene como resultado que con el sistema electrónico y el software seleccionado se facilita la operación de corte de forma automática y precisa, desarrollando figuras más

complejas y reduciendo tiempos en el proceso. La construcción del sistema cartesiano para corte por plasma, usando técnicas de control numérico computarizado se realizó con la finalidad de facilitar la manufactura en el proceso de corte del metal, hasta placas de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de espesor. La visualización de los cortes a realizar en el programa utilizado hace efectivo un proceso de corte más óptimo, evita fallas e imprevistos y hace que los tiempos de operación se reduzcan de forma considerable.

Carvajal, 2018 realiza una investigación donde propone el diseño y construcción de una máquina cortadora plasma CNC en la empresa mecánica industrial “MOYA HNOS”. Obteniendo como resultados que la metodología utilizada fue la de diseño conceptual donde se diseñó cada parte de la máquina hasta determinar su diseño final y se comparó por medio de las ecuaciones de diseño mecánico el diámetro del tornillo de potencia, el diámetro de las guías que se utilizó, el torque de los motores NEMA 23, lo más importante es la tarjeta de control Motion MACH 3 que se comunica directamente desde el ordenador a la máquina. El diseño de la plasma CNC se realizó para trabajar con planchas (1,22 x 2,44) mm ya que la empresa necesita realizar cortes en el menor tiempo posible y de buena calidad, la máquina tiene la capacidad de cortar desde 0,5 mm hasta  $\frac{1}{2}$  plg (12,7 mm) y velocidades de corte constantes entre (350 - 5330) mm/ min. El equipo plasma que se utiliza es un hypertherm power max 1250. La mesa de soporte de los ejes X, Y, Z, se construyó con el perfil cuadrado de (50 x 50 x 3) mm y platina de 2plg x  $\frac{1}{4}$ , ya que esta fue diseñada con el afán de soportar el peso total de la plancha y sus respectivos ejes. El diseño de la cortadora por plasma CNC se realizó con el afán de construirlo en el propio taller, los componentes más relevantes para la cortadora por plasma como la tarjeta de control, las guías lineales fueron importadas.

Vhymeister et al, 2017 investiga el corte mediante chorro de agua – abrasivo. Los principales métodos de corte de planchas de acero, son los denominados “térmicos”, como por ejemplo, el Oxicorte y el Plasma. Sin embargo, estos métodos presentan una serie de inconvenientes como: gran formación de escoria, formación de gases peligrosos, radiaciones UV, entre otros, manifestándose con mayor

intensidad en materiales con poco espesor. Un método que no provoca muchos de los problemas, es el corte “Chorro de Agua-Abrasivo” o “Abrasive Waterjet Cutting”. Éste método de muy poca difusión en nuestro país, consiste en un delgado pero potente chorro de agua combinado con una parte de un resistente abrasivo, el cual impacta el material a altísima velocidad, provocando un fenómeno de micro-erosión y de esta forma se logra el corte.

Cicero et al, 2012 investiga el efecto del método de corte sobre el comportamiento a fatiga de un acero estructural de alta resistencia S690Q. Este artículo estudia el efecto de los diferentes métodos de corte térmico en la vida a fatiga de un acero estructural de alta resistencia S690Q. Se han seleccionado tres sistemas de corte térmico mecanizado ampliamente utilizados en la industria (oxicorte, corte por plasma y corte por láser) y dos detalles estructurales: bordes rectos cortados térmicamente y orificios obtenidos mediante corte térmico para su posterior empleo en uniones atornilladas. El programa experimental está constituido por 60 probetas, las cuales se han llevado a rotura por fatiga en una máquina de resonancia. El valor de la relación de tensiones ( $R$ ) seleccionado es igual a 0.1. Por cada combinación de método de corte y detalle estructural se ha obtenido su correspondiente curva S-N y límite de fatiga. Se ha llevado a cabo un análisis de la rugosidad superficial y dureza de la Zona Afectada Térmicamente con objeto de determinar la influencia de los métodos de corte térmico en la vida en fatiga. Los resultados obtenidos se comparan con los valores de diseño propuestos por las normativas de diseño en fatiga, evaluando la posibilidad de extrapolar sus curvas S-N tanto a bordes rectos como agujeros cortados mediante cualquiera de los tres sistemas de corte térmico. Se obtiene como resultado que en las probetas con borde recto se ha comprobado que tanto el corte por plasma como el corte por láser mejoran el comportamiento a fatiga del oxicorte, especialmente para rangos de tensiones próximos al límite de fatiga. En lo que respecta a las probetas con agujero, los orificios cortados por plasma proporcionan una mayor resistencia a fatiga que los oxicortados y los cortados por láser. Particularmente, estos últimos provocan una reducción muy significativa del valor del límite de fatiga.

Carrascal et al, 2012 desempeña un estudio del efecto del método de corte sobre la iniciación de fisuras y la vida en fatiga del acero S355M. Se analiza el efecto del método de corte tanto en la iniciación de fisuras como en la vida en fatiga del acero S355M. El estudio contempla tres métodos de corte de gran trascendencia en ingeniería (plasma, laser y oxicorte) y dos geometrías de probeta diferentes: probetas de sección rectangular con corte a ambos lados, y probetas con lados mecanizados y corte de un agujero en la sección central. Todas las probetas se llevaron a rotura por fatiga en una máquina de resonancia, con una relación de tensiones ( $R$ ) de 0.1, obteniéndose la curva S-N correspondiente a cada combinación de método de corte y geometría de probeta. La iniciación de fisuras se ha estimado mediante el análisis de la evolución de la frecuencia de resonancia de cada probeta. Los resultados muestran que para este acero en particular existe una influencia significativa del método de corte tanto en el tiempo de iniciación como en la vida en fatiga. La normativa actualmente desarrollada para el cálculo de la vida en fatiga de componentes que presentan bordes rectos es extremadamente conservadora, especialmente en la fatiga de alto número de ciclos. Así mismo, las curvas S-N propuestas por las normativas para agujeros perforados podrían hacerse extensibles a orificios realizados mediante corte térmico.

Villacís et al, 2010 realiza un análisis comparativo de los procesos de corte por plasma, oxicorte aplicados a metales. En este proyecto se realiza un análisis comparativo de los procesos de corte más utilizados en la industria considerando productividad, aplicación y costos, bajo estándares de calidad y seguridad. Primeramente se hace una breve revisión de todos los procesos de corte conocidos según la clasificación de la AWS y luego se profundiza en los procesos utilizados que son: corte con gas oxcombustible, corte por arco con plasma y corte con arco por aire y electrodo de carbono, sus fundamentos teóricos, aplicaciones, ventajas y desventajas, así como también sus procedimientos de operación y corte. Tras conocer los procesos de corte térmico y diferenciarlos para aplicarlos de acuerdo al tipo y al espesor de metal que va a cortar, se ajustan los parámetros correspondientes, y se realizan las pruebas respectivas.

Posteriormente se evalúa la calidad y velocidad de corte, se practican ensayos de dureza y metalográficos para determinar los efectos producidos en los metales. Además se hace un análisis de costos involucrados con el fin de hallar el costo por metro cortado y así agilizar el proceso comparativo, en este punto es necesario conocer todos los parámetros necesarios e influyentes, conocer valores reales, factores operativos y de mano de obra. Al final, mediante la comparación de resultados se establece que método es el más conveniente económicamente, productivo, versátil y eficiente, de acuerdo a los volúmenes de trabajo. Tomando en cuenta parámetros de calidad y seguridad. Se concluye una vez finalizado que el proyecto se ha cumplido con los objetivos planteados, los cuales eran analizar y comparar los procesos de corte térmico de metales más utilizados para distintos materiales, a través de pruebas en corte y metalografía, además de los costos involucrados. Independientemente del proceso, la cantidad de calor que ingresa en el metal cortado es inversamente proporcional a la velocidad de corte. Generalmente el proceso de corte por plasma produce menor franja de zona afectada térmicamente debido a que maneja un arco concentrado debido al diseño de la boquilla y altas velocidades de corte. La zona afectada del proceso oxicorte es mayor debido a bajas velocidades de corte y que la llama no se encuentra concentrada en un punto como el proceso por plasma. La zona amplia de arcair se debe al lento e irregular desplazamiento del corte manual.

Aguirre, 2010 investiga acerca de estado del arte del proceso de soldadura por transferencia de arco por plasma en la recuperación de componentes de acero grado herramienta. En el siguiente trabajo se presenta una revisión bibliográfica del proceso de plasma transferido por arco donde se describe el principio de funcionamiento derivado de los procesos convencionales de soldadura ya existentes en el sector industrial. Además se presentan sus componentes, las variables del proceso, ventajas y desventajas incluyendo las principales aplicaciones. La relevancia del proceso de plasma transferido por arco es la facilidad de aportar material en forma de polvo, el bajo aporte térmico y su fácil automatización. Otros de los puntos que describe este trabajo son las aplicaciones

de este proceso en la recuperación de componentes de aceros grado maquinaria y aceros grado herramienta. Una de las principales ventajas de este proceso comparado con los procesos convencionales es la mínima dilución que se genera en el metal base, por lo tanto, se aprovechan las características del metal de aporte. En este trabajo se determinarán las principales variables que causan mayor impacto en este tipo de aceros al realizar un proceso de reparación. Se obtiene como resultado que La recopilación de información del estado del arte para el proceso de soldadura por plasma transferido por arco (PTA), servirá como base sólida para la correcta implementación del proceso en el sector automotriz en México ya que la información muestra buenas características para recuperación y revestimiento de diferentes materiales como acero para maquinaria, acero grado herramienta y aceros inoxidables. Utilizando como aporte súper aleaciones base cobalto y base níquel. Dentro de la revisión bibliográfica realizada, donde se encontró diferentes trabajos con diversos investigadores de universidades coincidieron en las mismas variables que causan mayor impacto en el proceso (PTA) son el gas de ionización, la velocidad de avance y el amperaje.

López et al, 2015 realiza una investigación acerca de las características de la microestructura del hierro fundido gris tixotomizado. Donde se obtuvieron los siguientes resultados, se diseñó y produjo una aleación de HFG (Fe-2,6 % wtC 1,5 % wtSi) específica para procesamiento semisólido, la cual fue sometida a ensayos de tixotomización a 1160 °C y 1180 °C, con tiempos de permanencia de 0, 30, 60 y 90 s. Al analizar los cambios microestructurales provocados a la aleación por el tixotomizado se encontró que para los tiempos de permanencia utilizados el comportamiento de las fuerzas requeridas para el proceso, en especial para 1180 °C, no fue significativo. El procesamiento semisólido cambia el tipo de grafito "A" a tipo "B" (o "E"), pero no afecta el espacio interdendrítico entre láminas de grafito. El incremento de la fracción líquida disminuye las fuerzas requeridas por el proceso de tixotomización.

Aguirre et al, 2012 investiga la microestructura del hierro fundido gris FG 24 sometido a tratamiento térmico. Se realizó la caracterización microestructural de las



transformaciones que ocurren en el hierro gris FG 24 sometido a tratamiento térmico. Seis muestras de la aleación fueron recocidas durante tiempos distintos (2 h y 3 h), a una misma temperatura (740 °C), con enfriamiento en el horno. En ambos tratamientos se obtuvieron microestructuras de hojuelas de grafito laminar en una matriz de ferrita, con tamaño número 4 del grafito para el tratamiento a dos horas y tamaño número 3 para el de tres horas. Se evidenció que se mantiene la distribución tipo A del grafito para ambos tratamientos. En los perfiles de dureza, esta propiedad varía desde 230 HB para la muestra patrón, hasta 160 HB para el mayor tiempo de permanencia en el horno.

Gonzaga et al, 2006 desarrolla una investigación sobre la dependencia de las propiedades mecánicas y de la composición química en la fundición de grafito esferoidal, con este trabajo se pretende estudiar la composición química de cuatro escaleras de fundición dúctil para determinar la influencia de los diferentes elementos de aleación sobre la microestructura y las propiedades mecánicas. Las cuatro escaleras tienen las mismas dimensiones de (200 x 100 x 50) mm. Para determinar cada una de las propiedades de las cuatro fundiciones, hemos considerado que las mismas han tenido diferente velocidad de enfriamiento, de lo que se deriva, que el tamaño de grano varía para cada uno de los casos. En este trabajo, se ha realizado un estudio de las diferentes microestructuras de las escaleras. Se ha considerado el análisis de la influencia del grosor sobre la dureza de cada probeta. No se ha empleado ningún tratamiento térmico. Se ha determinado la resistencia a la tracción y límite elástico. Se han realizado ensayos de Charpy y de mecánica de la fractura. Presentando como resultado que la dureza de la fundición 2 con respecto a la fundición 4, es menor, aunque la velocidad de enfriamiento es la misma. Su dureza está determinada, principalmente, por el contenido de carbono, silicio y cobre. La fundición 4 presenta una estructura conocida como “ojo de buey”. La dureza de las fundiciones, en general, está directamente relacionada con la composición química. La disminución de dureza en la fundición 2 se debe a la cantidad de cobre, a pesar de la presencia de perlita.

Herrera et al, 2017 realiza un proceso investigativo acerca de obtención y evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo de la aleación NI-RESIST-2B aleada con boro. Se analizó los resultados de las pruebas de desgaste abrasivo en cada una de las composiciones estudiadas, se determinó que el boro en estas pequeñas cantidades mejora su resistencia al desgaste abrasivo, ya que en la fundición aleada con 30 ppm de boro se disminuyó un 50 % la pérdida de masa con respecto a la aleación estándar, y en la fundición que se modificó con 100 ppm de boro se logró disminuir un 20% más esta pérdida. Se determinó que la dureza aumentó en cada aleación propuesta que se modificó con el elemento boro, lo que nos indica que este elemento en cantidades de 30 y 100 ppm mejora su resistencia a la penetración y ratifica sus beneficios en esta aleación. En general, el elemento boro mejora su resistencia al desgaste abrasivo y dureza en esta aleación de Ni-Hard, por lo cual este elemento es recomendable de implementar en las herramientas y accesorios utilizados en la industria náutica y de remoción de tierra, aclarando que podría reducir costos en mantenimientos preventivo y correctivo reduciendo el impacto económico en estas empresas.

Espín, 2012 realiza un estudio acerca del comportamiento mecánico del hierro fundido gris en la empresa laser y siderúrgica Tungurahua. Donde realiza una comparación de dureza mediante los métodos de Rockwell y Brinell de la fundición de aluminio en la siderúrgica Tungurahua. Con mayor aumento en la muestra 3 se nota la reducción del espaciamiento interdendrítico, lo que mejora la calidad de la fundición debido a la uniformidad de su estructura por lo tanto menor cantidad de defectos. En la microestructura de la muestra 3 el espacio entre los brazos dendríticos adyacentes es muy reducido en comparación con los de la muestra 1 dando como resultado la menor cantidad de defectos por contracción ya que la estructura dendrítica es más uniforme. Las microporosidades son producto de la presencia de hidrogeno, debido a altas velocidades al verter la colada o la existencia de humedad en el molde, para evitar este tipo de defectos se utiliza nitrito de sodio ( $\text{NaNO}_2$ ) o hexacloroetano ( $\text{C}_2\text{Cl}_6$ ) sustancia que se encuentran en el mercado en forma de tabletas o cartuchos.

## **Conclusiones del capítulo**

1. Se pudo analizar que los cortes térmicos tienen gran influencia sobre las características microestructurales de los aceros.
2. Se analizó que el corte térmico por plasma es mucho más eficiente que el de oxicorte, debido a que en este se tienen mejores propiedades y características sobre el material con respecto al otro proceso.
3. Se determinó que en el análisis crítico valorativo bibliográfico se realizan análisis microestructurales al hierro fundido, después de ser sometido a un proceso de tratamiento térmico, en el cual se obtuvieron mejores propiedades mecánicas.

## **CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Introducción**

En el presente capítulo se describen los materiales y métodos utilizados en el transcurso del trabajo. Se realiza una caracterización de los materiales, principales equipos, herramientas informáticas empleadas para el desarrollo de la investigación.

### **2.1 Composición química del acero al carbono 1010.**

La composición química estándar del acero al carbono 1010 según Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, de la American Society for Testing Materials – ASTM y la SAE, se reflejan en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Composición química del acero al carbono 1010 (%).**

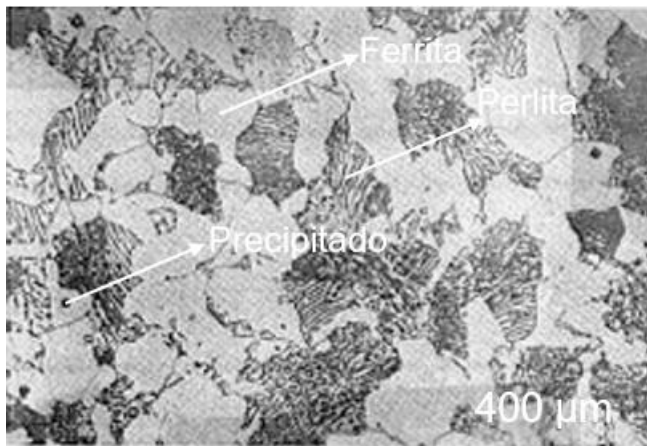
Aleación	C	P	S	Mg	Si	Mn	Fe
SEA1010	0,097	0,011	0,004	0,0001	0,155	0,264	Resto

Esta aleación se caracteriza por su bajo porcentaje de carbono, este material se seleccionan en piezas cuyo requisito primario es el conformado en frío.

Las muestras para el desarrollo del trabajo fueron tomadas en el taller de corte de la empresa METUNAS.

#### **2.1.1 Análisis microestructural de la muestra patrón**

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón del acero al carbono 1010, Este se tomará como referencia para realizar una comparación microestructural, después de realizar los cortes térmicos de la plancha de acero. La figura 2.1 se corresponde con la muestra patrón del acero al carbono 1010.



**Figura 2.1.** Microestructura patrón del acero al carbono 1 010.

La microestructura representada en la figura 2.1 se corresponde con la muestra patrón del acero al carbono 1 010 después del análisis metalográfico, se distinguen las hojuelas de ferrita en una en una matriz perlítica de tipo A.

El tipo y tamaño de hojuela se determina de manera tradicional por simple comparación contra el patrón ASTM (American Society for Testing and Materials), norma A247.

Las propiedades físicas y en particular las mecánicas varían dentro de amplios intervalos respondiendo a factores como la composición química, rapidez de enfriamiento después del vaciado, tamaño y espesor de las piezas, práctica de vaciado, tratamiento térmico y parámetros microestructurales como la naturaleza de la matriz y la forma y tamaño de las hojuelas de ferrita.

## **2.2 Descripción de los procesos de corte térmico por oxicorte y plasma.**

Los procesos térmicos usan calor para cortar o fundir el material que se está cortando. Algunos ejemplos incluyen oxicorte y corte por plasma, entre otros.

Cada uno de ellos funciona así:

- Oxicorte crea una reacción química entre el oxígeno y el acero que está tan caliente (aproximadamente 982,2 °C) que el metal se ablanda y luego se funde.

La figura 2.2 muestra el proceso de corte por oxicorte a que es sometida una pieza metálica.



**Figura 2.2 Corte por oxicorte.**

- Plasma usa un gas ionizado a alta temperatura para producir un arco muy caliente y con alta densidad de energía que puede cortar cualquier material conductor.

La figura 2.3 muestra el proceso de corte por plasma de una pieza metálica.



**Figura 2.3 Corte por plasma.**

La máquina de corte térmico por oxicorte y plasma y consta de un pórtico sobre el que se monta el soplete, de forma que su velocidad de desplazamiento es constante y se mantiene invariablemente a la altura e inclinación correcta, condiciones esenciales para obtener cortes limpios y económicos. Normalmente se controlan también las presiones de todos los gases. La mayoría de la máquinas-herramienta de este tipo incorporan la posibilidad de utilizar también sopletes de plasma, los cuales se montan sobre el pórtico de igual forma que los de oxicorte, pero acoplándolos ahora a los distintos gases que requiere el plasma.

Todavía hoy en día, es habitual ver máquinas que utilizan un dispositivo de lectura o copiador óptico que va siguiendo el contorno de las piezas a cortar dibujadas sobre un plano fijado sobre una mesa incorporada a la máquina. No obstante, cada día es más común la incorporación del Control Numérico (CN) a la máquina de oxicorte, de tal forma que la geometría y los parámetros tecnológicos se introducen en el CN en forma de un programa codificado. La instalación de una máquina de oxicorte, aún dotada de Control Numérico, no es muy costosa si se compara con cualquier otra máquina-herramienta.

Tanto con el uso de los copiadores ópticos como del CN, el oxicorte permite realizar todo tipo de cortes rectilíneos y curvos sobre chapas de acero de cualquier espesor, o sobre perfiles, tubos, etc. Pueden cortarse en buenas condiciones chapas superpuestas, incluso muy delgadas, si están bien sujetas unas contra otras. Cuando el soplete está bien regulado (presión, mezcla y velocidades adecuadas), los cortes son uniformes y presentan buen aspecto; basta un posterior y sencillo desbarbado para obtener un acabado aceptable. Aunque depende de la aplicación, frecuentemente se dejan los bordes tal como quedan después del corte.

En la tabla 2.2 se muestran los regímenes de trabajo del corte térmico por oxicorte.

**Tabla 2.2 Regímenes de trabajo del corte térmico por oxicorte.**

Espesor del metal a cortar, mm	Número de boquilla		Presión, Mpa		Velocidad aproximada de corte		Consumo, m <sup>3</sup> /h		Consumo, m <sup>3</sup> /m	
	Exterior	Interior	del oxígeno	del gas combustible	mm/min		Oxígeno	Acetileno	Oxígeno	Acetileno
3 – 5	1	1	0,3	No menor de 0,001	700	- 600	3	0,3	0,071 - 0,083	0,0071 – 0,0083
5 – 8	1	1	0,3		600	- 550	5	0,3	0,139 - 0,152	0,0083 - 0,0091
8 – 10	1	1	0,3		550	- 400	6	0,4	0,182 - 0,250	0,0121 - 0,0167
10 - 25	1	2	0,4		400	- 300	6	0,6	0,250- 0,333	0,0250 - 0,0333
25 - 50	1	3	0,6		300	- 250	10	0,8	0,556 - 0,667	0,0444 - 0,0533
50 - 100	1	4	0,8		250	- 200	15	0,9	1,000 - 1,250	0,0600 - 0,0750
100 - 200	2	5	1,0		200	- 130	26	1	2,167 - 3,333	0,0833 - 0,1282
200 - 300	2	5	1,2		130	- 80	40	1,2	5,128 - 8,333	0,1538 - 0,2500

Para la realización del corte por oxicorte y plasma en la empresa se emplea la máquina de corte 4 000 (Pantógrafo) como se muestra en la figura 2.4, ambos se realizan en la misma máquina y el proceso es automático, las características de la misma se muestra en la tabla 2.3.



**Figura 2.4 Máquina de corte térmico automático 4000(Pantógrafo).**

El corte automático usa software, sistemas electrónicos u otros medios programables para dirigir el proceso de corte. El objeto a cortar podría ser una pieza



de metal, un trozo de espuma, prácticamente de todo. Ejemplos típicos de sistemas de corte automáticos incluyen mesas de corte CNC, cortadores de tuberías y robots industriales.

**Tabla 2.3 Características de la máquina de corte 4000(Pantógrafo), (Gómez, 2018).**

Tipo de marco (Frame type)	Tipo de pórtico (Gantry type)
Ancho del riel (Rail width)	4 000 mm
Longitud del carril (Rail length)	1 8000 mm
Modelo de riel (Rail model)	24 kg/m, 3m cada uno
Sistema de manejo (Drive system)	Servo de doble lado (Servo double side drive)
CNC system	US Hypertherm
Plasma power	MAXPRO200 US Hypertherm
Main Electric control system	Schneider 1 set
CNC plasma torch	US Hypertherm 1 set
Flame height adjustment	2 groups
Drive system	Schneider or Panasonic 3 sets
Reducer	Germany NEUGART 3 sets
Transverse mechanical transmission	High precision gear and rack, straight rail 2 sets
Longitudinal mechanical transmission	High precision gear and rack 2 sets
Transverse pipeline drive	Drag chain 2 sets
Cutting software	Australia FASTCAM ( professional ) 1 set

En la tabla 2.4 se muestran las condiciones de trabajo del pantógrafo.

**Tabla 2.4 Condiciones de trabajo del pantógrafo (Gómez, 2018).**

environment temperatura	(-10 a +40) °C
relative humidity	≤ 95 % non-condensing
Surroundings	Ventilation, no greater impact
Input power	3 kW
Plasma air cleaning requirements	Dry, no oil, no wáter
oxygen inlet pressure	0,8 - 1 Mpa
gas inlet pressure	0,08 - 0,1 Mpa
oxygen purity	More than 99,6 %

Las variables de control para ambos procesos son:

- Gases empleados.
- El caudal y la presión de los mismos.
- Distancia boquilla pieza.
- Velocidad del corte.
- Energía empleada o intensidad del arco.

Las variables como el caudal, la presión del gas-plasma, la distancia boquilla-pieza y la velocidad del corte se pueden ajustar en las máquinas de corte por plasma existentes en el mercado según cada pieza a cortar. Su calidad varía en función del control de esos parámetros.

### **2.2.1 Descripción del software (FASTCAM) utilizado para la realización de los cortes térmicos.**

**Software FastCAM** es un programa que, gracias a su exclusivo desarrollo, se ha convertido en el sistema para el corte de metal más popular del mundo. **FastCAM** es un software que ha sido diseñado para dibujar, anidar (nesting), y cortar metal de una forma sencilla y eficiente. La facilidad de uso es tan importante como los altos niveles de aprovechamiento del material y optimización que el software proporciona. Dibujo, anidado y corte desde un solo sistema. El editor de dibujo

**FastCAM** es mucho menos complejo que otros sistemas. A diferencia de otros CAD, es un programa sencillo de utilizar y aprender. El sistema **FastCAM** es utilizado exitosamente en centros de reparaciones, en la industria de la construcción naval, minería, la fabricación en acero, la fabricación en metales y el corte.

### 2.3 Preparación metalográfica de las probetas.

En la figura 2.5 se muestra el material después de ser cortado por plasma y oxicorte.



**Figura 2.5 Material cortado: a, oxicorte; b, plasma.**

Las muestras fueron cortadas con forma geométrica circular, como se muestra en la figura 2.5 a y b, mediante los cortes térmicos por oxicorte y plasma respectivamente.

Se utilizó la técnica metalográfica para identificar las fases presentes en las microestructuras de los materiales, estas fases que constituyen lo agregado metálico son, generalmente, de tamaño microscópico y para su observación y estudio, es preciso preparar debidamente las probetas. Las superficies preparadas para observar las fases microscópicas fueron plana y debidamente pulida, teniendo en cuenta que la pequeña profundidad de foco de los sistemas ópticos de observación o de grandes aumentos no permitiría enfocar la imagen simultáneamente en planos situados a distintos niveles y debidamente pulida para que solo apreciaran en ellas detalles propios de su estructura y no de circunstancias

ajenas a ella que pudieran enmascararla. Para conseguir ambos objetivos, se realizó una serie de pasos consecutivos los cuales fueron, según la norma NC 10 – 56:86 y ASTM E3 95.

1. Selección de la muestra.
2. Corte de la muestra.
3. Montaje y preparación de la probeta.
4. Ataque químico de la probeta.
5. Análisis microscópico.
6. Obtención de micrografías.

Dentro de los procesos de diseños, el corte de las muestras debe realizarse meticulosamente, tratando en lo posible de la selección adecuada de cada máquina, para ensayos microestructurales, la no alteración de las propiedades de los materiales es de vital importancia, ya que el cambio de la misma refleja una imagen distorsionada de lo que queremos obtener.

Las dimensiones de las probetas para realizar el análisis microestructural fue de (15 x 15) mm, según la norma ASTM E 92.



**Figura 2.6 Probetas preparadas para el análisis microestructural.**

### **2.3.1 Desbaste y pulido**

El desbaste a grandes rasgos, consistió en obtener primeramente una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos. El

pulido con los papeles abrasivos se realizó con la variación de la granulometría, desde la más gruesa a la más fina. Concluido el proceso de lijado fino, se realizó la operación conocida como pulido fino, en el que se empleó la pasta abrasiva conocida comercialmente como “Pasta GOI”, añadida sobre discos provistos de paños o motas. En el pulido se emplearon lijas del tipo No, 320 y 400 según (ISO 9001).

Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior.

### **2.3.2 Lijado grueso y fino**

Con el lijado grueso se redondearon los ángulos que podrían llegar a provocar la rotura del papel esmeril o del paño durante el pulimento. Las primeras etapas de lijado se realizaron con papel de lija con tamaño de granos 120 y 240 respectivamente, para obtener una superficie plana, libre de toda distorsión o huellas producto del corte, y además lograr que todas las marcas del lijado sigan una misma dirección. El lijado fino se realizó semejante al anterior, con la diferencia que esta vez el proceso se inició con lija de tamaño de granos 320 hasta 800. Cada vez que se cambió de lija se operó de la forma descrita anteriormente, a fin de obtener nuevas rayas perpendiculares a las anteriores.

En ambas operaciones de pulido se utilizó abrasivos, en nuestro trabajo se realizó el óxido de cromo. Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada, se secaron con papel de filtro y finalmente se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

### **2.3.3 Ataque de las muestras para su examen microscópico**

Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido hasta alcanzar el brillo espejo, para observar la estructura metalográfica formada después del proceso de desgaste (ASTM E – 262 – Practice A).

Para la observación de las muestras por microscopia óptica fueron atacadas con diferentes tipos de reactivos ya que por las características del hierro fundido gris se empleó el nital y para los cordones por ser depósito austenítico hubo que emplear otro tipo de reactivo para revelar la estructura metalográfica en la zona fundida.

### 2.3.4 Pulidora metalográfica Montasupal.

Ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales de la EMNI, se utilizó para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se desbastaron con lijas del tipo 120, 200, 400 y 800, las características de la máquina son:

- |  |             |
|--|-------------|
| 1. Voltaje (V).....                      | 250         |
| 2. Corriente (A).....                    | 2,5         |
| 3. Número de revoluciones (rev/min)..... | 300 - 1 000 |
| 4. Potencia del motor (kW).....          | 3,72        |



**Figura 2.7 Pulidora metalográfica Montasupal.**

### 2.3.5 Microscopio óptico

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrográficas obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales de la EMNi, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe, que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.



**Figura 2.8 Microscopio óptico.**

Sus características son:

1. Voltaje (V)..... 100-240(50-60Hz)
2. BULB TYPE ..... 12V 50W
3. FUSE ..... 250 V 3 A F

#### **2.4 Análisis de microconstituyentes de las muestras metalográficas.**

Para determinar los microconstituyentes en las muestras metalográficas, se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca echoLAB como se muestra en la figura 2.7, está ubicado en el laboratorio de ciencias de los materiales de la EMNI, dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la fotografía en el computador.

Se realizó la reflexión de la luz de una probeta ya pulida con el objetivo de evaluar los microconstituyentes. Presenta una cámara digital acoplada, la cual va desde el microscopio hacia una laptop, donde se encuentra un programa analizador de imágenes tomadas desde la misma, aquí se evaluaron las fases, tamaño del grano, inclusiones, afectaciones en los granos y se elaboró un informe técnico con estas características.

En este ensayo, cuando en la estructura, los granos presentan diferentes colores, indica la existencia de más de un microconstituyentes según la norma ASTM A247. Adicionalmente los átomos en los límites de grano son más reactivos durante el ataque químico y se disuelven en mayor cantidad que el grano mismo, por ello la reflexividad cambia y se acrecienta su visibilidad.

En la tabla 2.5 se muestran los datos a considerar para el análisis de la cantidad de microconstituyentes.

**Tabla 2.5 Datos de las fases presentes en el análisis de microconstituyentes.**

Datos de la fase		
Microconstituyentes	Área	Área (%)
1	Área 1	Área 1
2	Área 2	Área 2
3	Área 3	Área 3

## **2.5 Determinación de la microdureza**

El ensayo de microdureza se aplicó para la determinación de la dureza de los volúmenes microscópicamente pequeños de la aleación. Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 No 168, Berkovich (1952), del laboratorio de microscopia de EMNI de Moa. La superficie de la probeta se prepara de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido). El número de dureza HV se determinó por el tamaño de las huellas.





**Figura 2.9 Microdurometro.**

Características del microdurometro:

1. Características eléctricas..... 220V 60Hz
2. Fase..... 1
3. Peso neto..... 30 Kg

Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó el ensayo para una carga de 20 g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante con 136 °, con una penetración en un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para los puntos de prueba seleccionados aleatoriamente en la superficie de las probetas. El objetivo fue evaluar las variaciones de esta propiedad en toda la superficie, realizando la prueba en el centro y el borde del material, en este caso se escoge el borde izquierdo porque la probeta fue cortada con la misma máquina y la dureza en los bordes es relativamente igual.

La microdureza (VHN) se calculó por la ecuación siguientes expresiones:

$$VHN = 1,58 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (2.1)$$

**Donde:**

*VHN* - número de dureza Vickers; kgf/mm<sup>2</sup>

1,58 - constante

$P$  - peso; kgf

$$\text{Diámetro medio} = \bar{d} \text{ (mm)} \dots \bar{d} = \frac{(d_1 + d_2) + (d_3 + d_4)}{2} \quad (2.2)$$

$$\text{Microdureza promedio: } \overline{VHN} = \frac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2} \quad (2.3)$$

### Conclusiones del capítulo

1. Se caracterizaron los equipos y máquinas empleadas en la obtención de los resultados de la investigación.
2. Se establecieron los procedimientos para analizar el comportamiento microestructural del acero al carbono 1010, después de ser cortados por los procesos térmico oxicorte y plasma.
3. Para la determinación de la microdureza se describió la metodología empleada, para poder establecer un análisis comparativo con la obtenida después de realizar los cortes térmicos del material y antes de estos.

## CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El objetivo de este capítulo es la evaluación de los resultados obtenidos después de efectuados los cortes térmicos por oxicorte y plasma en la plancha de acero al carbono 1 010, con el objetivo de analizar la microestructura y la microdureza de este material.

### 3.1 Análisis microestructural del acero 1 010 después de ser cortados térmicamente.

#### 3.1.1 Microestructura del acero 1 010, después del corte térmico por oxicorte.

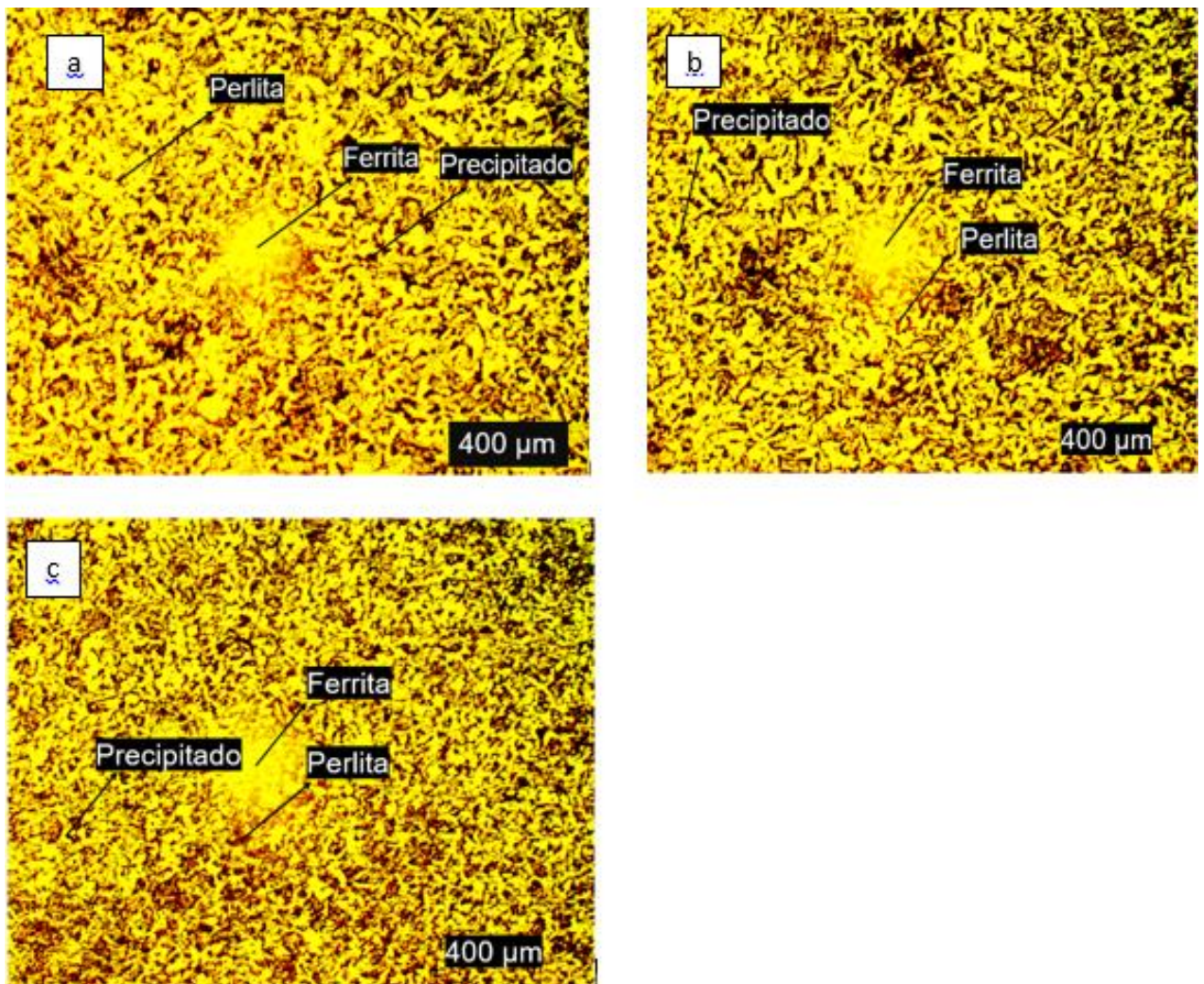


Figura 3.1 Microestructura del acero 1010 cortado térmicamente por oxicorte: a, centro; b, borde derecho; c, borde izquierdo.

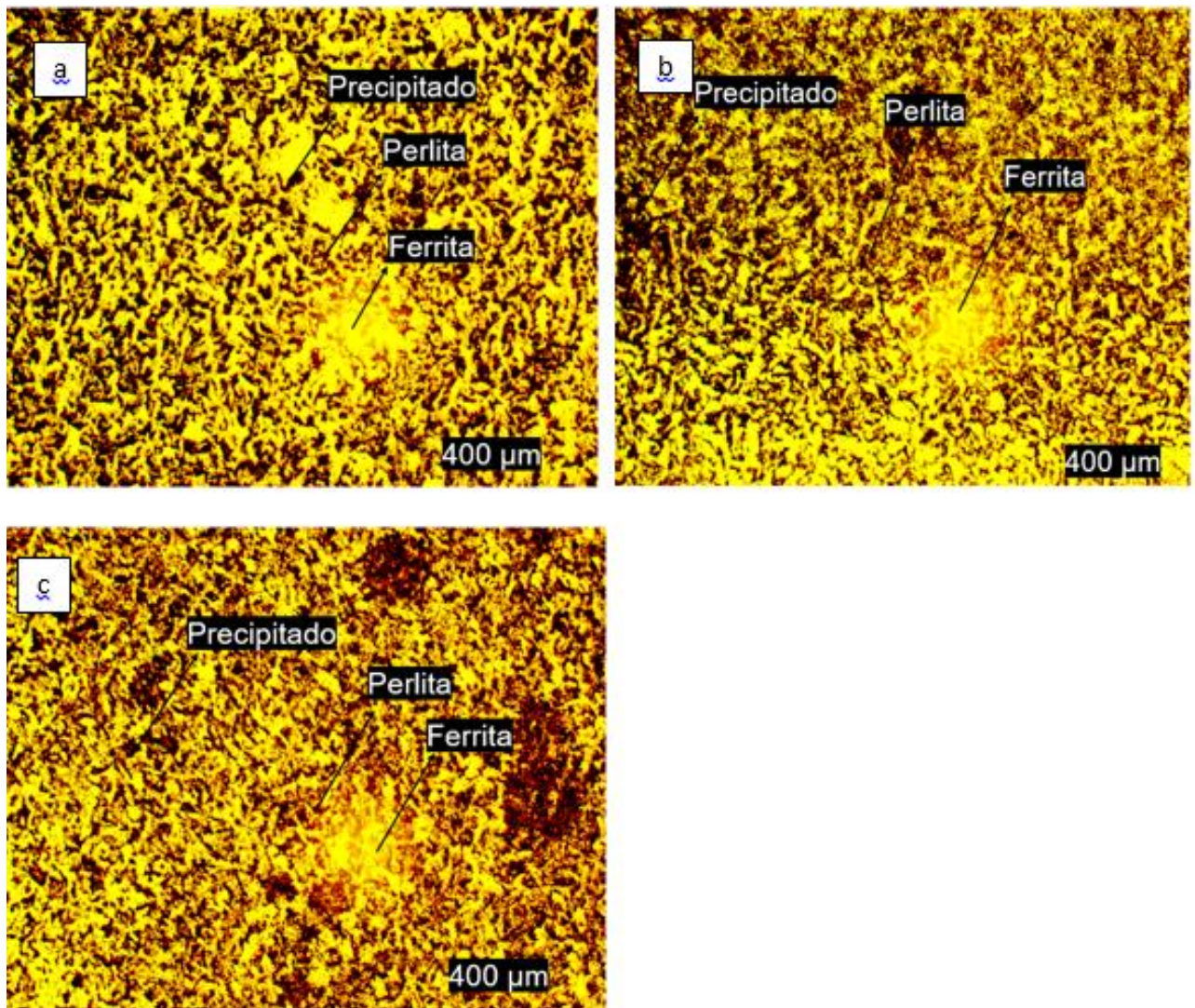
En la figura 3.1 se muestra que en las estructuras analizadas se puede observar que, luego del corte térmico por oxycorte a la temperatura de 900 °C, y con un tiempo de 6 min, la estructura de ferrita lograda en el proceso, ahora están compuesta por los microconstituyente de perlita, pero con la formación de granos más pequeños dispersos sobre la matriz. La presencia de la perlita es promovida por la composición química.

El tamaño de los granos de ferrita depende de la difusión de átomos de carbono en las mismas, como el carbono puede difundir durante la transformación sin afectar la correspondencia de los átomos de hierro y los átomos sustituciones, ni al plano invariante de deformación. La nucleación de la ferrita y perlita dependerá de las condiciones de crecimiento (ALVARADO, 2002).

La composición química y las condiciones de tratamiento térmico a las que se sujeta una aleación, determinará la presencia de la ferrita y la perlita. Se puede observar en la figura 3.1, que tanto en el centro de la estructura como en los bordes izquierdo y derecho estamos en presencia de una matriz ferrítica, con presencia de perlita y precipitados formados como consecuencia del proceso que se efectuó.



### 3.1.2 Microestructura del acero 1 010, después del corte térmico por plasma.



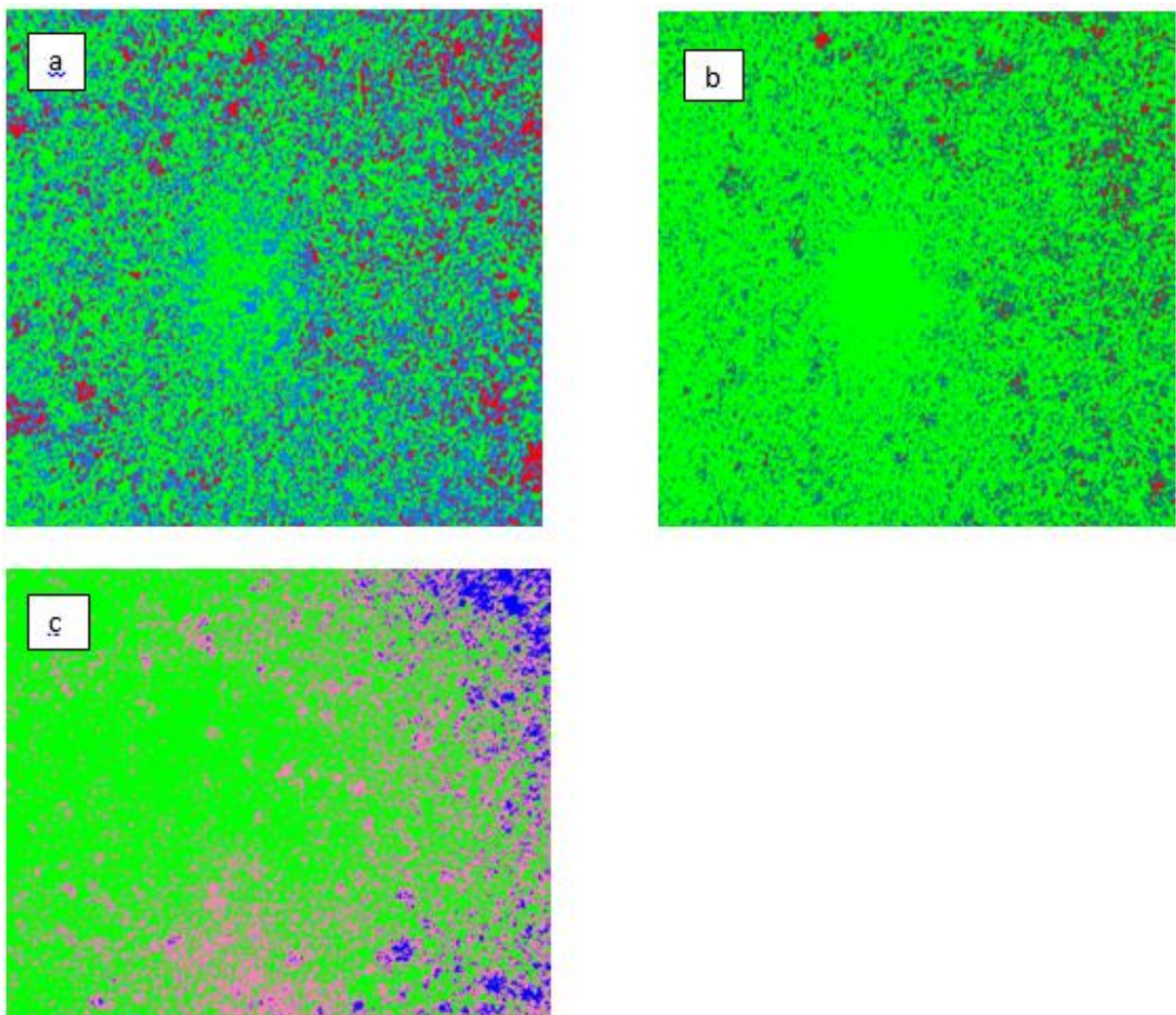
**Figura 3.2 Microestructura del acero 1010 cortado térmicamente por plasma: a, centro; b, borde derecho; c, borde izquierdo.**

Las velocidades de enfriamiento permite la formación de las fases presentes en la figura 3.2; así un amplio intervalo de fases y morfologías de productos de transformación pueden formarse a partir del enfriamiento de ferrita que haya sido formada en la etapa intercrítica de un proceso térmico, dependiendo de las condiciones de temperatura, tiempo y velocidad de enfriamiento. Las propiedades mecánicas de un material están determinadas por el tipo de microestructura que éste presente. Así, el control sobre la microestructura de un material, permitirá

controlar sus propiedades mecánicas. La temperatura en que se efectuó el proceso es de 20000 °C y el tiempo de corte fue de 20 s; en esta figura se puede observar también las fases ferrita + perlita con formación de precipitados como consecuencia del proceso de corte que se llevó a cabo en la microestructura del material analizada tanto como para el centro, borde derecho e izquierdo.

### 3.2 Determinación del porcentaje de microconstituyentes.

- **Oxicorte**



**Figura 3.3** Análisis del área que ocupa cada microconstituyentes en el material después de ser cortado térmicamente por oxicorte: a, centro; b, borde derecho; c, borde izquierdo.

En las figuras 3.3 y 3.5 se muestran los resultados obtenidos de las imágenes, que permiten determinar cada una de las fases presentes en la estructura del acero al carbono 1 010.



**Figura 3.4 Análisis de la distribución de las fases en el material luego de ser sometido a un proceso de oxicrote: a, centro; b, borde derecho; c, borde izquierdo.**

En la figura 3.3 se muestran los diagramas de pasteles con los porcentajes que ocupan cada una de las fases presentes en el proceso de corte térmico por oxicrote.

En la tabla 3.1 se muestra la distribución de las fases en los tres puntos de análisis del material luego de ser sometido al proceso de oxicrote.

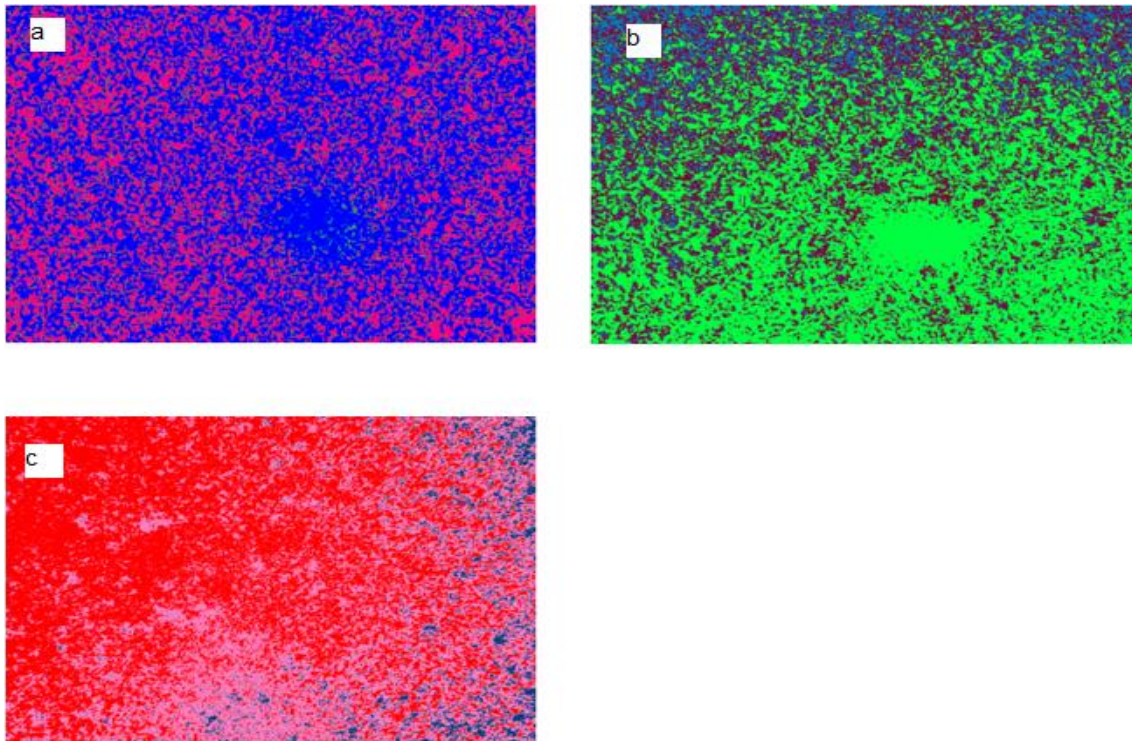
**Tabla 3.1 Distribución de las fases en los puntos de análisis de la probeta sometida al proceso de oxicrote.**

	Fases		
Puntos de análisis	Ferrita (%)	Perlita (%)	Precipitado (%)
a (centro)	47,43	39,61	12,96
b (borde derecho)	72,43	24,58	2,99
c (borde izquierdo)	61,11	33,85	5,04



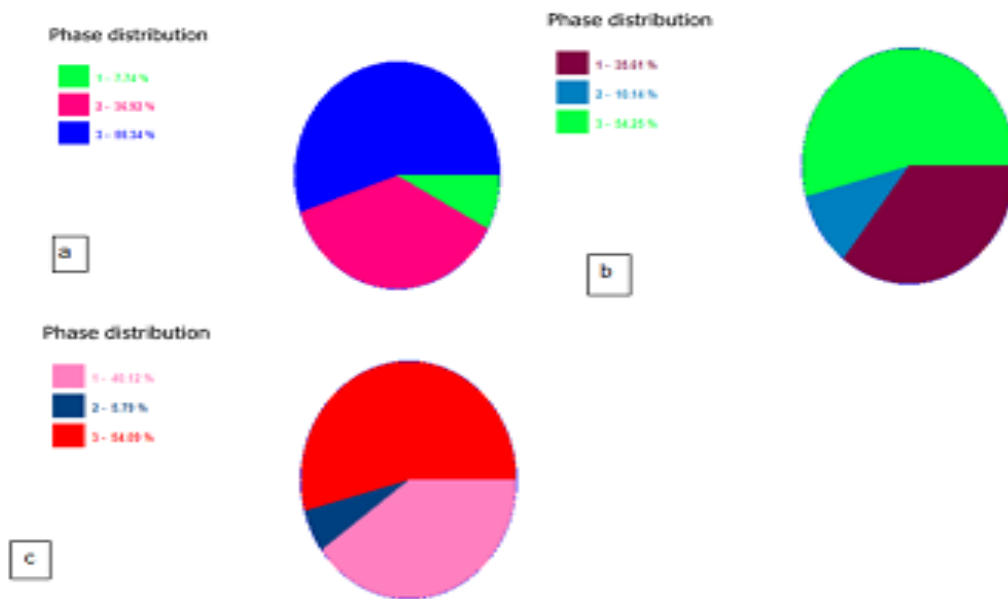
En la tabla 3.1 se observa que al borde derecho hay un porcentaje de 72,43 de ferrita superior al borde izquierdo y al centro de la probeta analizada; no siendo así con la formación de precipitado y de perlita correspondiendo el contenido más alto de 12,96 % y 39,61 % respectivamente al centro.

- **Plasma**



**Figura 3.5** Análisis del área que ocupa cada microconstituyentes en el material después de ser cortado térmicamente por plasma: a, centro; b, borde derecho; c, borde izquierdo.





**Figura 3.6 Análisis de la distribución de las fases en el material luego de ser sometido a un proceso de corte por plasma: a, centro; b, borde derecho; c, borde izquierdo.**

En la figura 3.6 se muestran los diagramas de pasteles con los porcentajes que ocupan cada una de las fases presentes en el proceso de corte térmico por plasma.

En la tabla 3.2 se muestra la distribución de las fases en los tres puntos de análisis del material luego de ser sometido al proceso de corte por plasma.

**Tabla 3.2 Distribución de las fases en los puntos de análisis de la probeta sometida al proceso de corte por plasma.**

Puntos de análisis	Fases		
	Ferrita (%)	Perlita (%)	Precipitado (%)
a (centro)	55,34	36,92	7,74
b (borde derecho)	54,25	35,61	10,14
c (borde izquierdo)	54,09	40,12	5,79

En la tabla 3.1 se observa que para el análisis de microconstituyentes del acero al carbono 1 010, se encuentra la fase de ferrita con predominio en el centro para un valor de 55,34 %, en el borde izquierdo predomina la fase perlítica con un valor de

40,12 % y los precipitados en el borde derecho (10,14 %), después de ser sometido al corte térmico por plasma.

De forma general se puede analizar que para ambos procesos de corte térmico hay un predominio de la fase ferrita en la estructura del acero al carbono 1 010 y también se encuentra presente la perlita y la formación de precipitados en menor medida, esto lo explica que como el acero al carbono 1 010 es bajo aleado, es decir, su contenido de carbono es muy pequeño como se muestra en la tabla 2.1, no permite la formación de ningún microconstituyente en la estructura del material y tiene un alto contenido de hierro que da lugar a la formación de la ferrita.

### 3.3 Análisis de microdureza

**Tabla 3.3 Análisis de microdureza**

<b>Microdureza</b>	<b>Corte por plasma</b>	<b>Corte por oxicorte</b>
<b>Centro</b>	72,20 HV	68,51 HV
<b>Borde izquierdo</b>	184,20 HV	85,31 HV

El análisis de microdureza se realizó como se expuso en el capítulo dos, solo fue analizada para el centro y borde izquierdo de la probeta, porque ambos bordes presentan la misma dureza.

Se puede apreciar que para ambas muestras analizadas los valores de dureza más alto se corresponden al borde izquierdo y que para la probeta que se le aplicó el proceso térmico de corte por plasma le corresponden mayores valores que al otro proceso efectuado, esto lo explica el proceso de nucleación que permite la formación de granos y al aumentar el número de granos aumenta la dureza en el material.

### 3.4 Impacto ambiental

Los tipos de residuos generados son: agua contaminada, humos metálicos, hollín, lodo y, lo más significativo en volumen, que es la chatarra metálica, derivada de la sobra del proceso de corte, y que representa un promedio de un 4 % sobre el total

de chatarra generada por la línea primaria. Esta línea es la mayor generadora de residuos de esa naturaleza en la empresa, pues es responsable por el corte y agujeros de las estructuras con mayor espesor, o sea, más pesadas y de mayor complejidad.

Actualmente, el agua contaminada, derivada de la limpieza de las máquinas, es bombeada para tanques en la parte externa de la empresa para tratamiento y reutilización. Luego, es retirado el lodo de las máquinas, que es arreglado en cajas metálicas y encaminado para almacenamiento en la central de residuos para secar de manera natural, siendo destinado para aterro industrial, con aproximadamente 70 % de humedad.

En los procesos de cortes térmicos existe la emisión de mayor cantidad de hollín y humos, pero sin mediciones controladas para comprobación. Así, necesitan de control y medición, juntamente con el consumo de agua y energía, constituyéndose un primer aspecto a ser trabajado.

### **Conclusiones del capítulo**

1. Se determinó que para ambas muestras las microestructuras están formadas por los microconstituyentes de ferrita, perlita y precipitados, con mayor presencia de ferrita.
2. Se analizó la microdureza de las probetas que fueron sometidas a los procesos de corte térmico y que los bordes tienen mayor valor de dureza.

## CONCLUSIONES

- Se realizó una evaluación de la microestructura del acero 1 010 luego de ser sometido un proceso de corte por plasma y por oxicorte donde se evidencia que en su mayoría la microestructura de las probetas está formada por ferrita, en la cual la probeta sometida al oxicorte se obtuvo un promedio de 60,32 % y la probeta sometida al corte por plasma un 54,56 %.
- Se analizó que para ambos procesos de corte térmico hay un predominio de la fase ferrita en la estructura del acero al carbono 1 010 y también, se encuentra presente la perlita y la formación de precipitados en menor medida, esto lo explica que como el acero al carbono 1 010 es bajo aleado, es decir, su contenido de carbono es muy pequeño no permite la formación de ningún microconstituyente en la estructura del material y posee un alto contenido de hierro que da lugar a la formación de la ferrita.
- Se analizó la microdureza de las probetas donde se muestra que en los bordes poseen una mayor dureza que en el centro, y se determinó para la probeta sometida al oxicorte que en el centro posee una dureza de 68,51 HV y en el borde de 85,31 HV, y la sometida al corte por plasma posee una dureza de 72,20 HV y en el borde de 184,20 HV.

## Bibliografía

1. Aguirre, Luis. "Análisis y evaluación de los procesos de corte de planchas de acero en el sector industrial de la ciudad de Loja. Caso práctico, proceso de corte con plasma". Loja – Ecuador : s.n., 2007.
2. Alcázar, G.A. Pérez. Propiedades estructurales y magnéticas de aceros Fe-Mn-Al, 43 . Propiedades estructurales y magnéticas de aceros Fe-Mn-Al,"fermanal". Valle : s.n., 2004.
3. Alvarado, Octavio Covarrubias. Efectos microestructurales en un acero sometido a un tratamiento térmico TRIP. NUEVO LEÓN : s.n., 2002.
4. Antonio, Arcos Villacís Pablo y David, Fiallos Ortiz Jorge. Análisis comparativo de los procesos de corte por plasma, oxicorte y arc air aplicados a metales. Quito : s.n., 2010.
5. Cuesta, Eduardo. El corte de Chapa mediante Oxicorte y Plasma. Oviedo : s.n., 2002.
6. Duque, Daniel Mauricio López y Guiza, Edison Andrés Herrera. Obtención y evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo de la aleación NI-RESIST-2b aleada con boro. Bogotá : s.n., 2017.
7. Espín, Segundo. "Estudio del comportamiento mecánico del hierro fundido gris en la empresa laser y siderúrgica Tungurahua ". Ambato : s.n., 2012.
8. Fernández-Carrasquilla\*\*, R. Gonzaga-Cinco\*\* Dependencia de las propiedades mecánicas y de la composición química en la fundición de grafito esferoidal. Madrid : s.n., 2006.
9. J. Aldazabal, A. Martín-Meizoso , A. Bannister , S. Cicero , A. Klimpel. Propiedades mecánicas de las zonas afectadas por un corte láser. San Sebastián : s.n., 2016.

10. J. Aldazabal, A. Martín-Meizoso , S. Cicero , A. Klimpel , A. Bannister. Ductilidad y tenacidad de un borde cortado por plasma en una chapa de acero. San Sebastián : s.n., 2012.
11. López-Nadal, Rodolfo, y otros. Características de la microestructura del hierro fundido gris tixotónico. Cantabria : s.n., 2015.
12. Peman, Tiberio Pablo García. Comportamiento en fatiga de componentes estructurales obtenidos mediante oxicorte, corte por plasma y corte por láser, comparativa y definición de curvas S-N de diseño. Cantabria : s.n., 2015.
13. R. Rodríguez, J. Toribio y F. J. Ayaso. Defectos microestructurales que gobiernan la fractura anisótropa en aceros. Salamanca : s.n., 2009.
14. Rico, Carlos. El corte de Chapa mediante Oxicorte y Plasma. Oviedo : s.n., 2002.
15. Smith, Joe. Comparación entre corte por plasma y oxicorte. Quito : s.n., 2018.
16. T. García, S. Cicero , J. A. Álvarez , A. Bannister , A. Martín-Meizoso , J. Aldazabal , A. Klimpel. Efecto del método de corte sobre el comportamiento a fatiga de un acero. Cantabria : s.n., 2012.
17. T. García, S. Cicero , \* , I. Carrascal , J.A. Alvarez. Estudio del efecto del método de corte sobre la iniciación de fisuras y la vida. 2012.
18. Valiño, Gonzalo. El corte de Chapa mediante Oxicorte y Plasma. Oviedo : s.n., 2002.