



# **Efecto de la Velocidad de Avance y Corriente de Trabajo en la Calidad de las Soldaduras Producidas por Flux Cored con Electrodo Tubular**

**Julieth Andrea Piracoca Balaguera  
Jeison Felipe Díaz Torres**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Bogotá, Colombia  
2020



# **Efecto de la velocidad de avance y corriente de trabajo en la calidad de las soldaduras producidas por flux cored con electrodo tubular**

**Julieth Andrea Piracoca Balaguera  
Jeison Felipe Díaz Torres**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniera Mecánica  
Ingeniero Electromecánico**

Director:

Ingeniero Hernando Jiménez

Línea de Investigación:

Ciencia de Materiales

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia



## **Agradecimientos**

Primeramente gracias a la vida, que hasta el día de hoy nos ha permitido llevar a cabo este proyecto a pesar de las circunstancias adversas del mundo actual; agradecimientos al Ingeniero Hernando Jiménez por su guía y colaboración para el desarrollo de este proyecto.

A la Empresa TEASMET S.A.S la cual nos brindó su apoyo humano e infraestructura, para la realización de las distintas pruebas e implementaciones de este trabajo.

A la universidad Antonio Nariño la cual nos ha brindado el apoyo y la formación necesaria, para ser personas que aporten a nuestra sociedad como profesionales en la ingeniería.

## Resumen

En este proyecto se realizara un análisis del efecto de los parámetros de aplicación (velocidad de avance y corriente), en la calidad, propiedades mecánicas y composición de la soldadura de electrodo tubular con protección gaseosa, aplicadas mediante el proceso flux cored, sobre piezas de acero A572.

El desarrollo del proyecto se presentara en 4 fases metodológicas que abarcan el análisis teórico y el estado del arte del proceso de flux cored, pasando por la etapa de preparación de probetas, caracterización de las mismas, hasta culminar con la redacción de reportes que condensen los resultados obtenidos.

La calidad de la soldadura va a ser evaluada mediante las técnicas no destructivas como inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido, a su vez se realizaran pruebas mecánicas como ensayo de tensión y microdureza con el fin de determinar la integridad de la soldadura aplicada a diferentes condiciones de corriente y velocidad de avance.

Como resultado de las pruebas realizadas a la calidad de la soldadura, teniendo en cuenta las condiciones de trabajo como la corriente, se puede indicar que al emplear el valor más alto, se encontró que las propiedades del acero fueron más favorables, revelando que el material se comporta de manera más frágil y alcanza una mayor medida de dureza, teniendo en cuenta que en la zona elástica del material, no se generan deformaciones significativas al aplicar grandes esfuerzos. Para las distintas condiciones de velocidad de avance, se puede resaltar que al aplicar la soldadura de manera más rápida, se obtuvieron mejores condiciones durante las pruebas, mostrando por ejemplo un incremento promedio del 50%, en la resistencia a la deformación elástica.

**Palabras clave:** *Corriente, soldadura, flux cored, electrodo tubular, velocidad de avance.*

## Abstract

In this project, an analysis of the effect of the application parameters (forward speed and current), on the quality, mechanical properties and composition of the gas-protected tubular electrode weld, applied by the flux cored process, on pieces of A572 steel.

The development of the project will be presented in 4 methodological phases that cover the theoretical analysis and the state of the art of the flux cored process, passing through the stage of test tube preparation, characterization of the same, until culminating in the writing of reports that condense the results obtained.

The quality of the weld will be evaluated using non-destructive techniques such as visual inspection, penetrating liquids, magnetic particles and ultrasound, while mechanical tests such as stress and microhardness tests will be carried out in order to determine the integrity of the applied weld at different current conditions and forward speed.

As a result of the tests carried out on the quality of the weld, taking into account the working conditions such as current, it can be indicated that when using the highest value, the properties of the steel were found to be more favorable, revealing that the material it behaves in a more fragile way and achieves a greater measure of hardness, taking into account that in the elastic zone of the material, no significant deformations are generated when applying great forces. For the different conditions of advance speed, it can be highlighted that by applying the weld faster, better conditions were obtained during the tests, showing, for example, an average increase of 50% in resistance to elastic deformation.

**Keywords: Current, welding, flux cored, tubular electrode, forward speed.**

## Contenido

Lista de ilustraciones	11
Lista de tablas	12
<b>1. Marco teórico</b>	<b>20</b>
1.1 Proceso de Soldadura FCAW	20
1.2 Gases protectores	26
1.3 Material base	28
1.4 Técnicas de inspección y caracterización:	31
1.4.1 Ensayo de tensión	31
1.4.2 Ensayo de Microdureza	34
1.4.3 Inspección Visual	36
1.4.4 Líquidos penetrantes	37
• Indicaciones no relevantes	38
• Indicaciones Relevantes	38
DISCONTINUIDADES EN SOLDADURA	38
• Concavidades	39
1.4.5 Partículas Magnéticas	41
1.4.6 Ultrasonido	43
1.4.7 Análisis microestructural del acero	44
<b>2. Análisis de Resultados</b>	<b>47</b>
Fase 1	48
2.1 Ensayo de tensión	49
2.2 Ensayo de Microdureza	57
2.3 Inspección Visual	61
2.4 Líquidos Penetrantes	63
2.5 Partículas magnéticas	66
2.6 Ultrasonido	70
Fase 2. Variación de la velocidad de avance	72
2.7 Ensayo de tensión	73
2.8 Ensayo de Microdureza	78
2.9 Inspección Visual	80
2.10 Líquidos Penetrantes	81
2.11 Partículas Magnéticas	83
2.12 Ultrasonido	85
2.13 Simulación del espectro de difracción de rayos x y la estructura cristalina del acero	87
<b>3. Conclusiones</b>	<b>93</b>
ANEXOS	95
BIBLIOGRAFIA	96

## Lista de ilustraciones

<b>Grafica 1.</b> Esquema del proceso de soldadura FCAW-G [1] .....	20
<b>Grafica 2.</b> Esquema de componentes principales del proceso FCAW-G [4].....	21
<b>Grafica 3.</b> Designación AWS para alambres Flux Cored [7].....	24
<b>Grafica 4.</b> Especificación electrodo EXATUB E71T-1C [7].....	25
<b>Grafica 5.</b> Tensión Vs Deformación [2]. .....	30
<b>Gráfica 6.</b> Maquina universal de ensayos laboratorio UAN. Fuente propia .....	32
<b>Gráfica 7.</b> (a) Fractura totalmente dúctil (b) Fractura dúctil (c) Fractura frágil [12] .....	33
<b>Gráfica 8.</b> Microdurómetro Vickers [13].....	34
<b>Gráfica 9.</b> Impresión indentador piramidal [14] .....	35
<b>Grafica 10.</b> Junta tope con ranura en v cargada longitudinalmente [14].....	37
<b>Gráfica 11.</b> Aplicación liquido penetrante [15].....	40
<b>Gráfica 12.</b> Aplicación partículas magnéticas [16].....	42
<b>Grafica 13.</b> Ultrasonido por eco [17]. .....	43
<b>Gráfica 14.</b> Aplicación prueba ultrasonido [17].....	44
<b>Grafica 15.</b> Microestructura interna de la cementita [18] .....	45
<b>Grafica 16.</b> Microestructura Acero A572 Gr 50 (a) aumento a 500X, (b) aumento a 1000x[18] .....	46
<b>Grafica 17.</b> Probeta para prueba de tensión. Fuente propia.....	47
<b>Gráfica 18.</b> Ruptura luego de prueba de tensión, fuente propia. ....	49
<b>Grafica 19.</b> Corriente Vs % de Elongación, Fuente propia .....	50
<b>Grafica 20.</b> Curva esfuerzo Vs deformación Probeta # 1. Fuente propia .....	51
<b>Grafica 21.</b> Curva esfuerzo Vs deformación Probeta # 2. Fuente propia.....	52
<b>Grafica 22.</b> Curva esfuerzo Vs deformación Probeta # 3. Fuente propia.....	52
<b>Grafica 23.</b> Punto de Fluencia Vs Corriente. Fuente propia .....	54
<b>Gráfica 24.</b> Módulo de elasticidad Vs corriente fase 1. Fuente propia.....	55
<b>Grafica 25.</b> Deformación unitaria Vs Corriente. Fuente propia .....	55
<b>Grafica 26.</b> Resistencia a la tracción Vs corriente. Fuente propia .....	56
<b>Grafica 27.</b> Zona de extracción de muestras para ensayo de microdureza. Fuente propia .....	57
<b>Grafica 28.</b> Huella de indentador piramidal vista en micro durómetro, Fuente propia ....	58
<b>Grafica 29.</b> Módulo de Elasticidad Vs Dureza. Fuente propia .....	59
<b>Grafica 30.</b> Deformación Unitaria Vs Dureza. Fuente propia.....	60
<b>Grafica 31.</b> % de Elongación Vs Dureza. Fuente propia .....	60
<b>Gráfica 32.</b> Zona de análisis inspección visual, fuente propia .....	61
<b>Grafica 33.</b> Resistencia a la tracción de las soldaduras. Fuente propia .....	63
<b>Gráfica 34.</b> Prueba de líquidos penetrantes, (a) probeta 1, (b) probeta 2, (c) probeta 3, Fuente propia. ....	64
<b>Grafica 35.</b> Discontinuidades prueba de partículas magnéticas (a) probeta 1, (b) probeta 2, (c) probeta 3, fuente propia .....	67

<b>Gráfica 36.</b> Espectro de ultrasonido primera fase. (a) Probeta 1, (b) Probeta 2, (c) Probeta 3, fuente propia .....	70
<b>Grafica 37.</b> Curva esfuerzo Vs deformación fase 2-Probeta 1. Fuente propia.....	74
<b>Grafica 38.</b> Curva esfuerzo Vs deformación fase 2-Probeta 2. Fuente propia.....	74
<b>Grafica 39.</b> Curva esfuerzo Vs deformación fase 2-Probeta 3. Fuente propia.....	75
<b>Grafica 40.</b> Módulo de Elasticidad Vs Velocidad de avance fase 2.Fuente propia .....	76
<b>Grafica 41.</b> Punto de rotura Vs velocidad de avance fase 2. Fuente propia .....	77
<b>Grafica 42.</b> Dureza Vs Velocidad de avance.....	78
<b>Grafica 43.</b> Punto de rotura Vs Velocidad de avance. Fuente propia .....	79
<b>Gráfica 44.</b> Diagrama hierro-carbono [23].....	88
<b>Grafica 45.</b> Estructura tridimensional $Fe_3C$ . Fuente propia .....	89
<b>Grafica 46.</b> Patrón de difracción $Fe_3C$ . Fuente propia.....	90
<b>Grafica 47.</b> Tabla de resultados de distancias interplanares y ángulos de difracción. Fuente propia .....	91
<b>Grafica 48.</b> Metalografía acero A572. Aumento 1000x [24].....	92

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Parámetros de soldeo recomendados EXATUB E71T-1 [2] .....	18
<b>Tabla 2.</b> Clasificación normativa [5].....	25
<b>Tabla 3.</b> Análisis Químico de Metal Depositado (% valores típicos) [5] .....	25
<b>Tabla 4.</b> Propiedades mecánicas del material de aporte [5] .....	25
<b>Tabla 5.</b> Posiciones de soldadura [5]. .....	26
<b>Tabla 6.</b> Propiedades físicas Acero A572 [2].....	29
<b>Tabla 7.</b> Propiedades químicas Acero A572 [2].....	29
<b>Tabla 8.</b> Propiedades mecánicas de lámina A572 [2].....	30
<b>Tabla 9.</b> Propiedades mecánicas de lámina A572 [2].....	31
<b>Tabla 10.</b> Velocidad de avance .....	48
<b>Tabla 11.</b> Parámetros de trabajo primera fase. ....	48
<b>Tabla 12.</b> % Promedio de Elongación .....	50
<b>Tabla 13.</b> Cálculos prueba de tensión fase 1 .....	53
<b>Tabla 14.</b> Dureza Vs Corriente.....	58
<b>Tabla 15.</b> Medidas de inspección visual .....	62
<b>Tabla 16.</b> Medidas altura de garganta.....	62
<b>Tabla 17.</b> Velocidad de avance fase 2. ....	72
<b>Tabla 18.</b> Parámetros de trabajo fase 2 .....	73
<b>Tabla 19</b> Cálculos prueba de tensión fase 2 .....	75
<b>Tabla 20.</b> Ancho cordón de soldadura.....	80
<b>Tabla 21.</b> Especificaciones ultrasonido .....	86
<b>Tabla 22.</b> Composición química del acero A572. [23].....	87

## **Lista de ecuaciones**

Ecuación 1. Módulo de Elasticidad

Ecuación 2. Deformación elástica

Ecuación 3. % de elongación

Ecuación 4. Dureza Vickers

Ecuación 5. Tensión normal

## Introducción

La soldadura es un proceso de unión de metales que se realiza por fusión localizada de las partes a unir, mediante la aplicación conveniente de calor o presión, se puede efectuar con o sin aporte de material a las piezas unidas, donde el material de aporte es de diferente clase que los materiales a unir. En la industria se clasifican diversos tipos de soldadura, de acuerdo a sus características físicas o diferentes usos, podemos encontrar distintos tipos los cuales podemos clasificar en forma general como: soldadura por resistencia, arco, gas, estado sólido y por energía o laser [1].

Las soldaduras por resistencia se realizan por medio del proceso termoeléctrico, mediante el paso de corriente eléctrica a través de la zona de unión de las piezas por un tiempo y presión específico. La soldadura por arco es una de las conocidas y usadas, el proceso se lleva a cabo por medio de la creación de un arco voltaico entre el metal y un electrodo, generando calor hasta su punto de fusión para producir la unión de las piezas [1].

El tipo de soldaduras por gas es uno de los más antiguos, en este se usa la combustión de acetileno junto con oxígeno, más conocido como soldadura autógena, permitiendo alcanzar una llama de 3.200 °C con la cual se genera la unión de las piezas.

La soldadura de tipo estado sólido se realiza mediante presión y vibración, con los que se logra el intercambio de átomos entre los materiales, esta a su vez se divide en cuatro tipos: soldadura ultrasónica, de explosión, fricción e inducción.

Por último la soldadura con energía también conocida como soldadura láser o de electrones, es una de las más actuales, como su nombre lo indica el proceso se realiza por medio de un láser o haz electrónico dirigido para lograr la recristalización de los materiales a unir [2].

El desarrollo de este trabajo se realiza en torno al tipo de soldadura con arco, el cual se desarrolló desde inicios de la década de 1.920, experimentos desde esta poca mostraron las ventajas del proceso al proteger de la contaminación atmosférica el arco y el metal de soldadura. En la década de 1.950 se implementó el proceso GMAW el cual incluía como

gas protector el dióxido de carbono, el uso del CO<sub>2</sub> se produjo gracias al estudio del gas que se producía al desintegrarse las coberturas de los electrodos, los resultados de estos análisis indicaron que el gas predominante en las emisiones de la cobertura era CO<sub>2</sub>, de allí se inició su uso como gas de protección en las soldaduras de aceros al carbono.

En este trabajo se usara un alambre tubular para producir la unión de las piezas, que está compuesto de un alambre hueco con pared delgada relleno de fundente, el cual deposita un metal fundido gracias a la acción del arco eléctrico; este fundente proporciona elementos de aleación, estabilizadores de arco, desoxidantes, formadores de escoria y gases de protección.

Finalmente se presentan los resultados del proceso de depósito de soldadura tipo flux cored, teniendo en cuenta las variaciones de velocidad de avance y corriente en la aplicación de esta. Los análisis de estas variaciones y sus efectos en la calidad de la soldadura, se evaluarán por medio de distintas pruebas mecánicas como ensayos de tensión, microdureza y pruebas no destructivas como inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas, y ultrasonido, además se realizara un análisis adicional de la microestructura del acero por medio de la simulación de difracción de rayos x y la estructura cristalina del acero. Esto con el fin de comparar y dar a conocer cuáles son las mejores condiciones de trabajo y los efectos sobre la calidad de la soldadura.

## **Planteamiento del problema**

El proceso de soldadura con flux cored depende de variables como la corriente aplicada, la velocidad de avance, polaridad, longitud de arco, extensión del electrodo, diámetro del electrodo entre otras.

Sin embargo, unas de las variables que muestran gran influencia en las propiedades de las soldaduras aplicadas son, la velocidad de avance la cual está sujeta a la habilidad del operario y la corriente de trabajo. Teniendo en cuenta estas consideraciones surge la pregunta de investigación ¿Qué efectos tienen los parámetros de velocidad de avance y corriente aplicada en la calidad del proceso de soldadura flux cored?

## **Justificación**

El acero A572, el cual se usa en este proyecto, es utilizado en una variedad de aplicaciones estructurales incluyendo puentes, edificios, equipo de construcción, vagones de carga, maquinaria, piezas de camión y torres de transmisión.

Para producir estas estructuras se realizan distintos procesos de soldadura. El proceso de flux cored es uno de los procesos más utilizados en la industria porque es de alta calidad en el depósito de metal de soldadura, tiene buena apariencia la soldadura, se puede trabajar en diferentes gamas de aceros y rangos de espesor, tiene alta tasa de deposición, buena fusión y penetración en la juntas, es de arco visible y presenta menor distorsión que otros tipos de soldadura.

Sin embargo la calidad de la soldadura depende de la experticia que tenga el operario en el momento de la aplicación, por esto se hace importante analizar el efecto de la variación de la velocidad de avance a diferentes condiciones de corriente para analizar los cambios en las propiedades microestructurales, mecánicas y de integridad de las soldaduras aplicadas.

## Objetivo general

Analizar los efectos de la variación de los parámetros de depósito, corriente y velocidad de avance, en la calidad de la soldadura flux cored con electrodo tubular.

## Objetivos específicos

- Analizar el proceso de flux cored con el fin de ver la incidencia de la velocidad de avance y la corriente.
- Realizar soldaduras utilizando el proceso de flux cored con material de aporte alambre tubular para tres condiciones de velocidad de avance y tres diferentes corrientes de trabajo.
- Realizar una caracterización mecánica, por medio de ensayos de tensión y microdureza.
- Realizar inspección y análisis de las soldaduras utilizando los ensayos no destructivos como líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido e inspección visual.
- Redactar documento de tesis en el cual se expongan los resultados de las pruebas y la caracterización realizada.
- Simular el espectro de difracción de rayos x, y la estructura cristalina del acero A572 Gr 50.

## Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se plantean las siguientes fases:

- **Fase 1. Análisis de variables**

En esta fase se realiza un análisis de variables de corriente y velocidad de avance en el proceso de soldadura flux cored de alambre tubular con gas de protección; el electrodo a utilizar es el E71T-C, está diseñado para trabajar con CO<sub>2</sub> (gas protector); este tipo de electrodo permite que haya menor nivel de humo, ofrece buena resistencia al impacto a bajas temperaturas, además tiene buena presentación final en el cordón de soldadura y fácil remoción de escoria.

El criterio de corriente aplicado en el proceso de la soldadura será proporcional a la velocidad de alimentación del electrodo. Para las características específicas de cada tipo de electrodo se tiene establecida una velocidad de alimentación óptima, que además estará definida por la corriente aplicada en el proceso.

Los efectos de la corriente aplicada en el proceso de soldadura flux cored, pueden incidir en el aumento de la penetración y velocidad de aplicación del electrodo si esta tiene un valor alto. Por el contrario si se trabaja con valores de corriente bajos, se pueden producir porosidades en el material soldado y cantidades excesivas de material fundente.

- **Fase 2. Proceso de soldadura**

En esta fase se lleva a cabo el proceso de la soldadura por arco con núcleo fundente, en el cual se obtiene la unión de los metales por calentamiento de estos en un arco entre un electrodo tubular continuo y la pieza, el flux interior aporta a la estabilización del arco, el ajuste de la composición química de la soldadura introduciendo elementos de aleación y la protección por medio de los humos y la escoria entre otros.

Para realizar el análisis se desarrollan tres repeticiones por cada uno de los siguientes procesos:

- ✓ Paso 1: Se aplicara soldadura tipo flux cored, sobre piezas de acero A572, variando 3 veces la corriente de trabajo, desde el valor mínimo, medio y máximo, del intervalo de corrientes reportado por el fabricante para el electrodo tipo EXATUB E71T-1 ( tabla 1).

Diámetro [mm]	1,20	1,60
Polaridad	Corriente continua electrodo al positivo (DCEP)	
Amperaje [A]	140 - 320	200 - 380
Voltaje [V]	22 - 35	25 - 36
Stick out (mm)	15 - 25	
Flujo de Gas (l/min)	15 - 25	

**Tabla 1.** Parámetros de soldeo recomendados EXATUB E71T-1 [2]

Se realiza la caracterización y las pruebas de integridad a estas soldaduras, con el fin de determinar la mejor condición de corriente de trabajo (actividades fase 3).

- ✓ Paso 2: Utilizando la mejor condición de corriente de trabajo, encontrada en el fase 1, se aplicara soldadura haciendo tres variaciones en la velocidad de avance.

Se realiza la caracterización y las pruebas de integridad a estas soldaduras, con el fin de determinar la mejor condición de velocidad de avance (actividades fase 3).

- **Fase 3. Inspección y caracterización mecánica, morfológica y microestructural.**

Para lograr la caracterización de las soldaduras se realiza análisis de:

Por medio del ensayo de tensión, realizado con la máquina de ensayos universales, se evalúa la respuesta de la resistencia de la soldadura utilizando la norma AWS B4.

En el ensayo de microdureza, se realiza el análisis de la resistencia que opone la soldadura al ser penetrada.

Los ensayos no destructivos sobre los elementos ya sea previamente a su fabricación o en servicio se determinaran la mayor cantidad de datos relativos a la forma, estado actual y posibles discontinuidades, que se puedan presentar en los elementos previamente descritos.

En la inspección visual, se examina el material base acero A572 Gr 50 y la superficie del material soldado utilizando la norma AWS D1.1

En los ensayos con líquidos penetrantes, se examina la penetración por capilaridad en las imperfecciones de la soldadura. Esta será evaluada por medio de la norma AWS D1.1

Con el equipo de ultrasonido analizar cómo se generan, emiten y captan varios haces de ondas definidas, con el objetivo de detectar discontinuidades internas y superficiales (fisuras, inclusiones, etc.). El ultrasonido que recorre el material es reflejado por las interfaces, es detectado y analizado para determinar la presencia y localización de discontinuidades, se evalúa por norma AWS D1.1.

En la prueba de partículas magnéticas se detectan defectos superficiales o subsuperficiales, basado en la acumulación de partículas de material ferromagnético.

Se realizara simulación de las propiedades cristalográficas del acero por medio del espectro de difracción de rayos x y la estructura cristalina del acero A572 Gr 50.

- **Fase 4. Análisis de resultados**

Recopilación de los datos obtenidos en las diferentes pruebas y ensayos realizados en la fase 3, realizar el análisis de estos resultados para posteriormente efectuar la redacción del documento de tesis que compile los detalles y conclusiones de este proyecto.

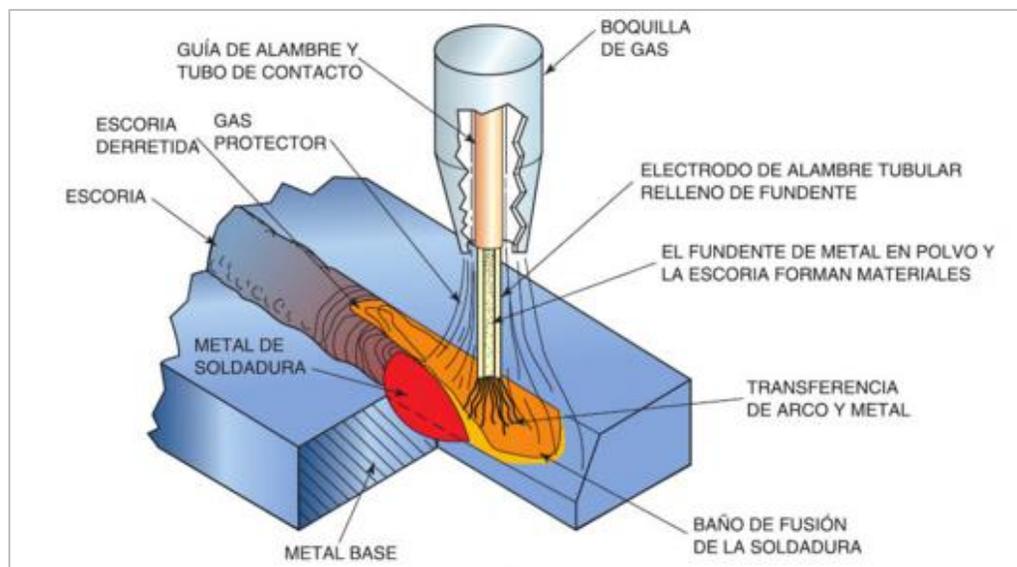
# 1. Marco teórico

## 1.1 Proceso de Soldadura FCAW

El proceso FCAW (Flux Cored Arc Welding), soldadura por arco con núcleo fundente, es un proceso en el cual se obtiene la fusión de los metales por medio un arco entre el alambre y la pieza de trabajo, que produce la suficiente energía para fundir el metal base y el material de aporte. En el proceso se usa un electrodo de alambre tubular relleno de fundente, el material de aporte o electrodo es alimentado de forma continua a través de una pistola, el electrodo fundido de alambre es depositado en la junta o unión formando un cordón de soldadura protegido por una fina capa de escoria [3].

La clasificación de alambre tubular para el proceso de soldadura flux cored es:

- Alambres tubulares autoprotectidos (FCAW-S)
- Alambres tubulares con protección gaseosa (FCAW-G)

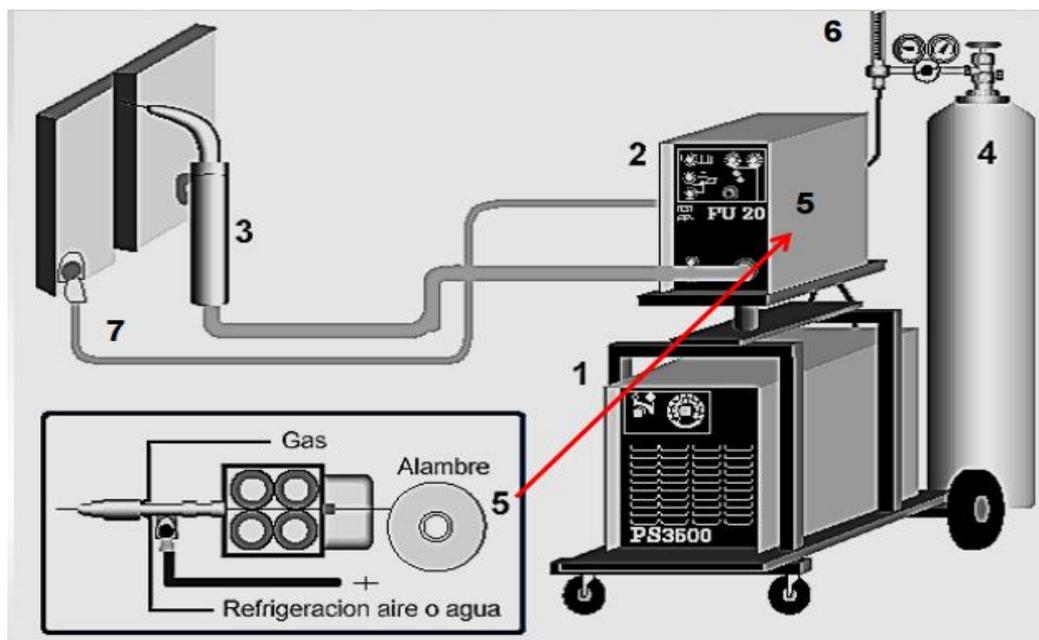


**Grafica 1.** Esquema del proceso de soldadura FCAW-G [1]

El proceso de soldadura desarrollado en este trabajo es de tipo FCAW-G, por medio de una boquilla se suministra gas de protección externamente ( $\text{CO}_2$ ) el cual protege el metal fundido del oxígeno y nitrógeno rodeando el arco y el cordón de soldadura, al mismo tiempo por el tubo de contacto baja el electrodo o material de aporte, este al entrar en contacto con el material base se funde generando el cordón de soldadura y escoria; la escoria debe ser eliminada entre cada cordón para no generar defectos que afecten la calidad de la soldadura [3].

Para el proceso de depósito de soldaduras se tiene como equipo general una fuente de poder de tipo transformador-rectificador monofásico, un estabilizador del arco y un sistema de alimentación de alambre para trabajos pesados. Además para nuestro caso específico es necesario el uso de un tanque de gas externo el cual proporciona la protección gaseosa usada durante el proceso [3].

El equipamiento específico para el proceso de soldadura por flux cored usado durante las pruebas de este proyecto se muestra en la siguiente gráfica:



**Grafica 2.** Esquema de componentes principales del proceso FCAW-G [4].

1. Fuente de poder o máquina de soldar
2. Alimentador
3. Pistola de soldar
4. Tanque de gas
5. Rodillos de alimentación de alambre
6. Flujometro para el gas
7. Cable con pinza a tierra

El proceso FCAW-G gracias a una de sus principales propiedades que es la de una mayor productividad y eficiencia de deposición, tiene amplios campos de aplicación, como lo es en la fabricación y reparación en astilleros, tanques de almacenamiento, fabricaciones estructurales tales como vigas, tolvas, tubos, tanques, tendidos de tuberías; así mismo es empleado en la construcción de puentes, minería y equipos de movimiento de tierras en general [5].

## Material de Aporte

Los alambres tubulares Flux Cored están constituidos por un alambre hueco de pared delgada y relleno de fundente, el cual, al fundirse por la acción del arco eléctrico generado por la corriente de soldadura, deposita un metal fundido protegido con una capa de escoria. El fundente provee elementos de aleación, desnitrificantes, estabilizadores de arco desoxidantes, y químicos generadores de gases de protección durante la aplicación de la soldadura [5].

Las principales funciones de los componentes del núcleo del fundente son las siguientes:

- Transferir al metal de soldadura ciertas propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión mediante un ajuste de la composición química.
- Promover la integridad del metal de soldadura, protegiendo el metal fundido del oxígeno y el nitrógeno presentes en el aire al momento de soldar.
- Eliminar impurezas del metal fundido mediante reacciones con el fundente.

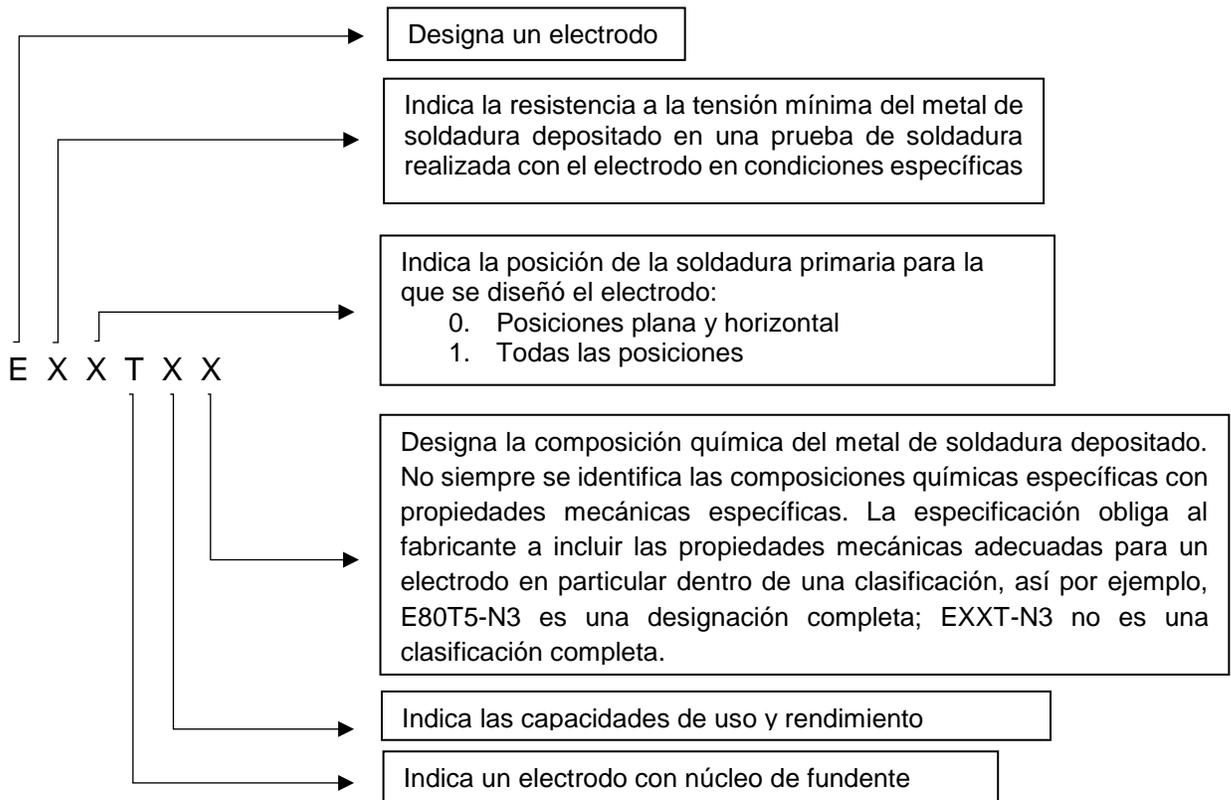
- Producir una cubierta de escoria que proteja el metal del aire durante la solidificación, que controle la forma y el aspecto del cordón de soldadura.
- Brindar estabilidad al arco eléctrico, para reducir las salpicaduras y facilitar el depósito de cordones lisos y uniformes [6].

Las ventajas que presenta el proceso de soldadura FCAW-G son diversas, entre ellas se puede mencionar la alta calidad en el depósito de metal de soldadura; la capacidad de soldar distintas clases de aceros como dentro de distintos rangos de espesores, altas tasas de depósito, su arco visible que facilita su aplicación, resistencia a los contaminantes que podrían causar agrietamiento de la soldadura. A diferencia de sus ventajas las desventajas son pocas; limitado a soldar solo metales ferrosos, remoción de escoria por cada cordón de soldadura y su alto costo [6].

### **Características y clasificación del material de aporte**

Los alambres tubulares Flux Cored se clasifican de acuerdo a las especificaciones determinadas por la Sociedad Americana De Soldadura (AWS), empleadas en el proceso FCAW, de la siguiente manera: AWS A5.20 para aceros al carbono, AWS A5.22 para aceros aleados y AWS A5.29 para aceros de alta aleación.

El electrodo a usar en este trabajo está clasificado para aceros al carbón, la norma en la cual se encuentran la especificación es la ANSI/AWS A 5.20 (Especificación para electrodos de acero al carbono destinados a soldadura por arco con núcleo de fundente). El sistema de identificación sigue el patrón general de clasificación de electrodos el cual se describe en la siguiente ilustración:

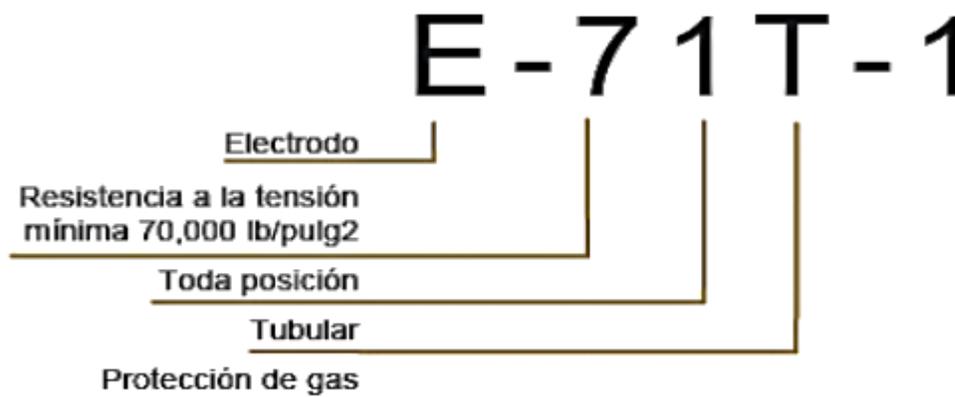


**Grafica 3.** Designación AWS para alambres Flux Cored [7].

Para la ejecución de las pruebas experimentales de este proyecto se usara el electrodo de tipo EXATUB E71T-1C, ya que este es ideal para realizar procesos de soldadura en un solo pase y/o multipases sobre aceros de mediano carbono y aceros de baja aleación.

Este tipo de alambre tubular puede aplicarse en toda posición, está diseñado para trabajar con CO<sub>2</sub> como gas protector, en comparación con alambres tubulares autoprottegidos genera un menor nivel de emisión de gases y brinda buenas propiedades frente a la resistencia al impacto a bajas temperaturas [5].

Según norma AWS A5.20 el electrodo de trabajo usado en este proyecto (EXATUB E71T-1C) presenta las siguientes características:



**Grafica 4.** Especificación electrodo EXATUB E71T-1C [7]

A continuación se presentan las características del alambre EXATUB E71T-1C según fabricante:

Clasificación	
AWS A5.20 / ASME SFA-5.20	E71T-1C/9C

**Tabla 2.** Clasificación normativa [5]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05	1,4	0.52	0.013	0.011	.	.	.	.	.

**Tabla 3.** Análisis Químico de Metal Depositado (% valores típicos) [5]

Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (-20°C) [J]
Mín. 578 (83 800)	Mín. 529 (76 700)	mín. 30	100

**Tabla 4.** Propiedades mecánicas del material de aporte [5]

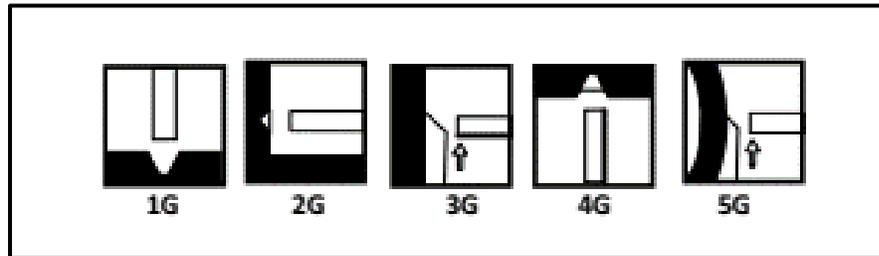


Tabla 5. Posiciones de soldadura [5].

## 1.2 Gases protectores

La función principal del gas protector es proteger el baño fundido de soldadura, de la contaminación que puede provocar el contacto con la atmósfera. Con este objetivo, se pueden utilizar distintos gases, los más utilizados son: el argón, el helio, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, ya sea en estado puro o mezclados [8].

### Dióxido de carbono

Para el proceso de soldadura FCAW-G, el dióxido de carbono es el gas más usado para la protección del arco y del depósito de la soldadura contra la contaminación de los gases atmosféricos; este es usado en la empresa esencialmente por su bajo costo, además de cumplir con los requerimientos de calidad como una buena tasa de deposición, una mayor penetración, protección contra elementos externos a la hora de aplicar la soldadura.

La composición química del gas de protección afecta a la estructura metalúrgica del metal de soldadura, y al grado de oxidación superficial del cordón, por ejemplo el oxígeno produce la pérdida por oxidación de elementos de aleación, a la vez que proporciona baños de fusión más fluidos. El dióxido de carbono, en cambio, conduce a la ganancia de carbono por parte del metal de soldadura en los aceros. Comúnmente y dependiendo del material a soldar, también se pueden utilizar una mezcla de gases como el argón y el helio; se utilizan para obtener un mejor rendimiento durante el proceso de soldeo, también se

pueden añadir cantidades pequeñas de Oxígeno para realizar soldaduras en algunas aleaciones ferrosas como el acero [8].

Cuando el arco de soldadura calienta el dióxido de carbono se descompone para formar monóxido de carbono y oxígeno, esto permite que la atmosfera del arco tenga una buena calidad de oxígeno y pueda reaccionar con los elementos del metal fundido.

## **Mezclas de gases**

Se puede encontrar mezcla de argón más helio, argón más hidrogeno, argón más nitrógeno, la ventaja de la primera mezcla es aumentar la velocidad de soldeo y se usa en aplicaciones de soldadura con aluminio, la segunda ofrece una mayor penetración en la soldadura y se utiliza en soldaduras de acero inoxidable, la última mezcla es poco usual y solo es usada en aceros austeroferíticos [9].

Cuando se trabaja soldadura por arco con núcleo de fundente se usa una mezcla de gases con una composición de argón y dióxido de carbono, con porcentajes entre 75 % y 25 %, cuanto mayor sea el porcentaje de gas inerte en las mezclas con CO<sub>2</sub> u oxígeno, mayor será la eficiencia de transferencia de los desoxidantes contenidos en el núcleo.

El argón puede proteger el cordón de soldadura a cualquier temperatura en la que se suelda, al estar presente en la mezcla de gas protector, da como resultado menor oxidación en comparación con el uso de escudo de CO<sub>2</sub> al 100%. Además con el uso de esta mezcla el cordón de soldadura produce una mayor resistencia a la tensión y al vencimiento, menos salpicaduras y asimismo produce un arco con mejores características en su presentación y penetración que el depositado con escudo de CO<sub>2</sub> exclusivamente [5].

## 1.3 Material base

### Acero A572 gr 50

El material a soldar en las pruebas realizadas en este proyecto es el acero A572 GR 50, el cual es el más utilizado en la industria de estructuras metálicas por su bajo costo económico, fácil soldabilidad, facilidad de unión del material. Está constituido por 98% de hierro, 1 % de carbono y 1% de otros minerales; este material tiene alta resistencia debido a la aleación Niobio-vanadio, además tiene diferentes propiedades como la resistencia a altas temperaturas, a la corrosión, gran dureza y resistencia a la fatiga [10].

Este acero es principalmente usado en estructuras soldadas, torres de transmisión, soportes, chasis, plataformas para la industria petrolera, plataformas marinas, construcción de puentes cumpliendo con los requerimientos exigentes a la entalla [10].

El acero A572 cuenta con la adición de microaleantes (Niobio o Vanadio) haciéndolos más seguros en su comportamiento mecánico y lográndose una reducción en el consumo específico desde el punto de vista estructural. El grado 50 indica que el límite de fluencia mínimo de este acero estructural es de 50.000 libras por pulgada cuadrada.

El tipo de acero comprende una especificación normalizada que considera cinco grados de acero estructural los Grados 42 [290], 50 [345], y 55 [380], los cuales están diseñados para fabricar estructuras remachadas, atornilladas o electrosoldadas. Los Grados 60 [415] y 65 [450] están previstos para construcción remachada o atornillada de puentes, o para construcción remachada, atornillada o electrosoldada [10].

Sus características físicas y químicas se pueden observar en las siguientes tablas:

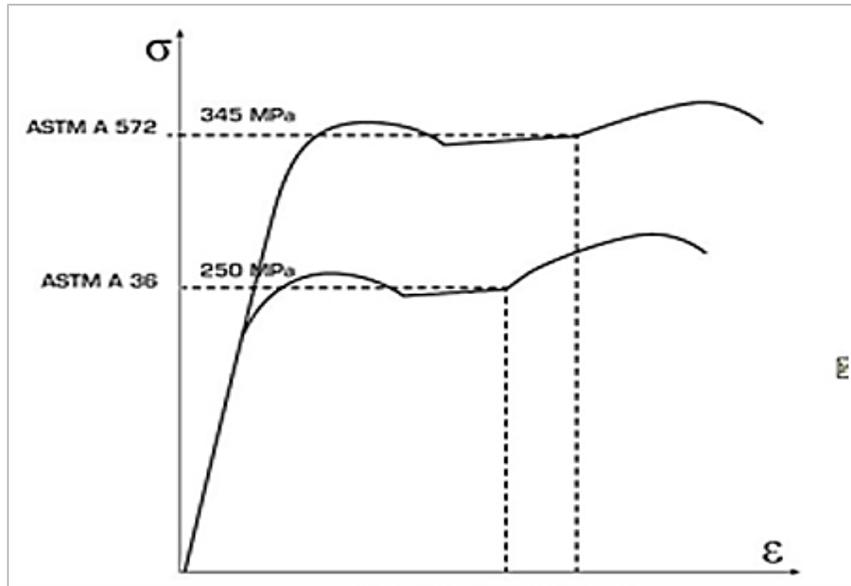
<b>Grado</b>	<b>%C máx.</b>	<b>%Mn máx.</b>	<b>%P máx.</b>	<b>%S máx.</b>	<b>%Si máx.</b>
42	0,21	1,35	0,04	0,05	0,4
50	0,23	1,35	0,04	0,05	0,4
60	0,26	1,35	0,04	0,05	0,4
65	0,26	1,35	0,04	0,05	0,4

**Tabla 6.** Propiedades físicas Acero A572 [2].

	<b>Elemento</b>	<b>Contenido</b>
<b>TIPO 1</b>	Columbio (Niobio)	0,005 – 0,05
<b>TIPO 2</b>	Vanadio	0,01 – 0,15
<b>TIPO 3</b>	Niobio (0,05% máx.) más Vanadio	0,02 – 0,15

**Tabla 7.** Propiedades químicas Acero A572 [2].

A continuacion la curva caracteritica de esfuerzo Vs deformacion para el acero ASTM A572 Grado 50.



**Gráfica 5.** Tensión Vs Deformación [2].

Grado	Límite de Fluencia (mín.)		Resistencia a la Tracción (mín.)		Elongación Min. % En 200mm (8in)
	MPa	PSI	MPa	PSI	
42	290	42000	415	60000	20
<b>50</b>	<b>345</b>	<b>50000</b>	<b>450</b>	<b>65000</b>	<b>18</b>
60	415	60000	520	75000	16
65	450	65000	550	80000	15

**Tabla 8.** Propiedades mecánicas de lámina A572 [2].

Espesor (In)	% Elongación mín. 200mm (8 in)			
	Grado 42	Grado 50	Grado 60	Grado 65
1/2 - 3/8	20,0	18,0	16,0	15,0
42491	19,5	17,5	15,5	14,5
43556	17,5	15,5	13,5	12,5
42430	15,0	13,0	11,0	10,0
43678	12,5	10,5	8,5	7,5

**Tabla 9.** Propiedades mecánicas de lámina A572 [2].

Dentro de la empresa TEASMET S.A.S se emplea este material debido a que es uno de más usados en la industria por su fácil manejo en grandes volúmenes, facilidad de soldado a precios moderados, además cumple con los parámetros de calidad necesarios para sus diferentes usos como lo son construcciones electrosoldadas en general puentes y estructuras de edificios.

## 1.4 Técnicas de inspección y caracterización:

### Ensayos destructivos

#### 1.4.1 Ensayo de tensión

Este ensayo consiste en la deformación de una pieza de material gradualmente, que está sometida a tracción hasta el punto de rotura, con el fin de determinar a partir de los resultados las características propias del material. Las propiedades que se pueden medir

a partir del ensayo de tensión son la ductilidad, la resistencia, la plasticidad, el módulo de elasticidad, etc. Al iniciarse el ensayo, el material se deforma elásticamente, esto significa que, si la carga se elimina, la muestra recupera su longitud inicial siempre y cuando no se exceda el esfuerzo de fluencia. Se dice que el material sobrepasó su límite elástico cuando la carga es de una magnitud suficiente para iniciar una deformación plástica, es decir una deformación irreversible [11].



**Gráfica 6.** Maquina universal de ensayos laboratorio UAN. Fuente propia

Por medio del ensayo de tensión, se evaluará la respuesta de la resistencia de la soldadura utilizando la norma AWS B4.0 (Métodos estándares para pruebas mecánicas de soldadura). Como se mencionó anteriormente el ensayo de tensión es una prueba con la cual se puede obtener la gráfica de esfuerzo contra deformación de un material; proceso estandarizado bajo la norma ASTM E8, con la que se pueden analizar los siguientes aspectos.

Los modelos matemáticos para el análisis del ensayo de tensión se presentan a continuación:

- Módulo de Elasticidad

$$\text{Ecuación 1.} \quad E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

- Deformación elástica:

$$\text{Ecuación 2.} \quad \sigma = E * \varepsilon$$

Donde, E = Modulo de elasticidad

$\varepsilon$  = Deformación unitaria axial

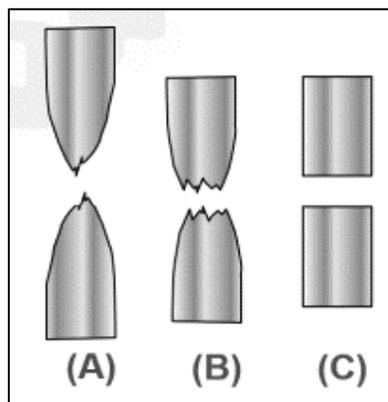
- % de Elongación:

$$\text{Ecuación 3.} \quad \% \text{ de Elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} * 100$$

Donde,  $l_f$  = longitud medida luego de la prueba

$l_0$  = longitud medida inicial

Las diferentes tipos de rotura que se pueden obtener en la probeta, luego de ser sometidas a esfuerzo son las siguientes.



**Gráfica 7.** (a) Fractura totalmente dúctil (b) Fractura dúctil (c) Fractura frágil [12]

En la fractura dúctil el material alcanza una deformación plástica con gran absorción de energía, generando una estricción en el material hasta llegar al punto de rotura. En la fractura frágil el material alcanza la rotura de manera súbita sin estricción visible del material. El tipo de fractura frágil muestra una estricción del material sobre un punto específico, disminuyendo su área formando el llamado “copa y cono”, que se genera cuando finalmente el material se fractura, formando un ángulo de  $45^\circ$  respecto a la dirección del esfuerzo aplicado.

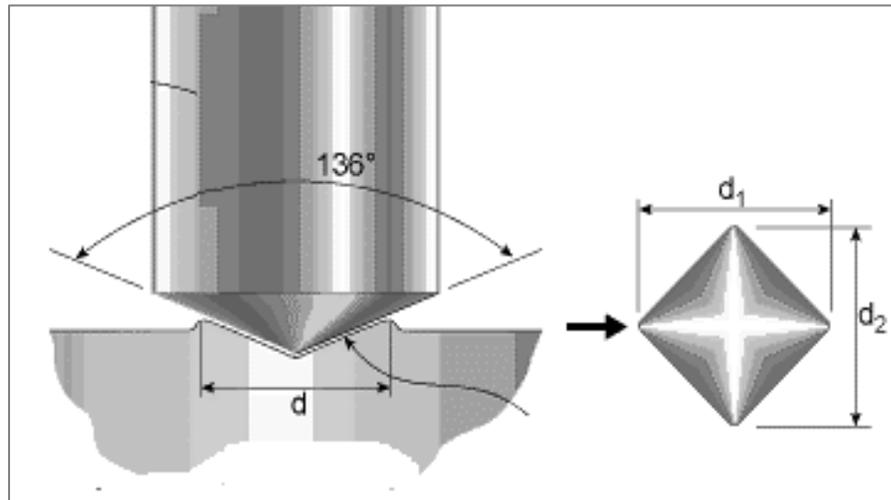
## 1.4.2 Ensayo de Microdureza

La prueba de microdureza consiste en hacer sobre la superficie de una probeta, una impronta con un penetrador piramidal de base cuadrada, con determinado ángulo entre las caras opuestas, luego medir las diagonales de la impresión que resulta sobre la superficie de la probeta y se calcula el promedio de las medidas obtenidas. Para este ensayo se utiliza un microscopio digital el cual se puede operar con cargas que pueden variar de 0,01 kg a 2 kg [13].



**Gráfica 8.** Microdurómetro Vickers [13]

En este tipo de ensayos la penetración es del orden algunos micrones ( $1 \mu = 1 \mu = 0,001\text{mm}$ ), por lo que pueden ensayarse chapas y láminas extremadamente delgadas, o superficies tratadas en las que el espesor del tratamiento es muy delgado [13].



**Gráfica 9.** Impresión indentador piramidal [14]

El valor numérico de la dureza Vickers (HV) se obtiene dividiendo la carga  $P$  (kp) aplicada entre la superficie de la huella  $S$  ( $\text{mm}^2$ ) dejada sobre la probeta:

$$\text{Ecuación 4. } HV = \frac{P}{S} = 1,854 * \frac{P}{d^2}$$

Donde

**P** = la carga aplicada en el ensayo (Kp)

**S** = es la superficie de la huella ( $\text{mm}^2$ )

**d** = es el valor promedio de la diagonal de la huella impresa en la probeta (mm).

## Ensayos no destructivos

### 1.4.3 Inspección Visual

En la inspección visual, se examina el material base acero A572 Gr 50 y la superficie del material soldado utilizando la norma AWS D1.1, la cual contiene los criterios para las calificaciones y responsabilidades de los inspectores, los criterios de aprobación para soldaduras de producción y los procedimientos estándar para realizar inspecciones visuales y ensayos no destructivos.

Su procedimiento consiste en una inspección visual directa la cual debe tener una luz con intensidad de 100lux; se utilizan instrumentos como linternas, espejos, galgas, calibradores, entre otros. Para realizar la inspección la superficie debe estar libre de salpicaduras, grasas, aceites, corrosión y cualquier tipo de suciedad que pueda afectar este proceso. Al realizar el proceso de inspección se indican los defectos y discontinuidades encontrados para analizarlos con los parámetros de aceptación de la AWS D1.1.

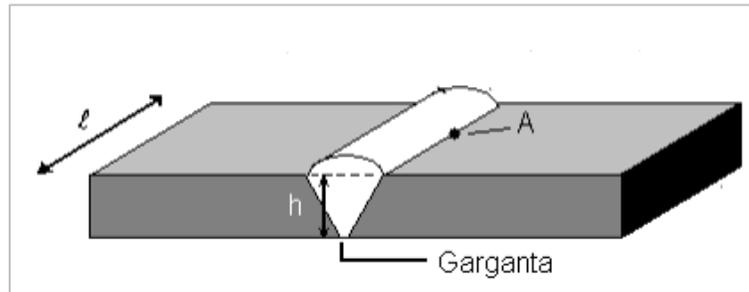
Para resistir la carga, la tensión normal media se describe como:

$$\text{Ecuación 5. } \sigma_{adm} = \frac{P}{2hL}$$

Donde h = altura de garganta

L = longitud de cordón

P= Presión



**Grafica 10.** Junta tope con ranura en v cargada longitudinalmente [14]

La tensión de trabajo ( $\sigma$ ) deberá ser menor que la tensión del material ( $\sigma_{mat}$ ) de la soldadura, multiplicada por 0,6.

#### 1.4.4 Líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes es un tipo de ensayo que se emplea con el fin de detectar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales. Por lo general se emplea en aleaciones no ferrosas, también se puede utilizar para la inspección de materiales ferrosos.

El procedimiento consiste en la aplicación un líquido o fluorescente en la superficie del material a analizar, el cual penetra ente las discontinuidades que puedan existir, esto debido al fenómeno de capilaridad. Después de un tiempo mínimo de 5 minutos se elimina el exceso de fluorescente y se aplica el revelador, el cual absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades para posteriormente evidenciar los defectos [15].

Las indicaciones son los resultados que se obtienen en cualquier método de ensayo no destructivo, se deben analizar el origen de esta y evaluar con criterios de aceptación y rechazo de acuerdo a la norma AWS D1.1, a continuación se presentan los diferentes tipos de indicaciones y discontinuidades que se pueden encontrar a partir de esta inspección.

## TIPOS DE INDICACIONES

- **Indicaciones falsas**

La indicación falsa no es causada por el material sino por el proceso. Algunas causas que provocan las indicaciones falsas son las siguientes:

- Dedos del operador manchados de líquido penetrante.
- Marcas del elemento utilizado para la manipulación de las piezas.
- Hilachas de trapos para eliminar el penetrante.
- Contaminación del revelador por el penetrante.
- En la mesa en la que se realiza el ensayo hay manchas de penetrante [15].

- **Indicaciones no relevantes**

Son las discontinuidades producidas por el diseño de la probeta, se reconocen ya que están relacionadas directamente con el proceso, como pueden ser en piezas encajadas a presión.

- **Indicaciones Relevantes**

Son las discontinuidades de la superficie de la probeta; estas son evaluadas, es decir, decidir si se aceptan, reparan o rechazan, de acuerdo al criterio de aceptación o rechazo.

## DISCONTINUIDADES EN SOLDADURA

Las discontinuidades en la soldadura se pueden clasificar en dos tipos, superficiales o internas, a continuación se presentan los diferentes tipos de discontinuidades superficiales.

- **Exceso de penetración**

Se produce por la penetración del electrodo dentro de los biselados, los cuales son distribuidos en esas áreas. Causa que el material chorree al interior y puede retener escoria en su interior. [15]

- **Socavaduras**

Es una ranura fundida en el metal base, contiguo a la raíz de una soldadura o a la sobremonta, que no ha sido rellenada por el metal de aporte, esto se genera por intensidades muy altas o el ángulo de desplazamiento pequeño [15].

- **Concavidades**

Se produce cuando el metal de la soldadura en la superficie de la cara externa o en la cara de la raíz interna, posee un nivel que está por debajo de la superficie adyacente a la del metal base [15].

- **Quemado**

Es una zona de la soldadura en donde a causa de factores como excesiva corriente, velocidad lenta del electrodo o manejo incorrecto del electrodo, hay una penetración excesiva en una área determinada generando la destrucción de los biselados [15].

- **Salpicaduras**

Como su nombre lo indica, son excesos de metal fundido en forma de esfera depositada aleatoriamente sobre la superficie de la probeta.

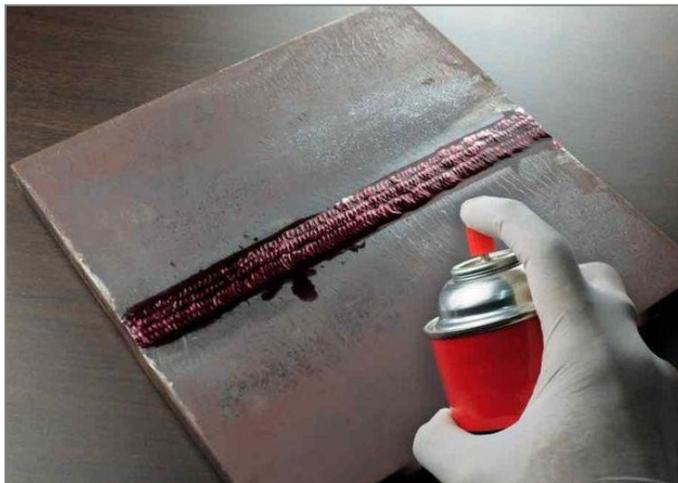
- **Falta de continuidad del cordón**

Se genera cuando se interrumpe el cordón de soldadura y no se empalma la continuación del proceso de soldado. En los casos críticos, pueden considerarse auténticas faltas de fusión transversales [15].

- **Porosidad**

En el proceso de soldado pueden quedar gases atrapados si no hay tiempo suficiente para que escapen antes de la solidificación de la soldadura. Esto forma agujeros redondos denominados porosidades esféricas o de forma alargada llamados porosidad tubular [15].

La alineación de las discontinuidades se correlaciona con las líneas de flujo magnético. La orientación de la discontinuidad forme un ángulo comprendido entre 45 y 90° con relación a la dirección de las líneas de flujo magnético. Los materiales y procedimientos se encuentran descritos en el anexo A (Procedimiento de inspección por líquidos penetrantes, de la empresa TEASMET SAS).



**Gráfica 11.** Aplicación liquido penetrante [15]

## 1.4.5 Partículas Magnéticas

Este es un tipo de ensayo no destructivo que permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Este método está basado en el fenómeno llamado fuga de flujo magnético, en el cual las líneas de fuerza existentes en un objeto magnetizado son localmente distorsionadas por la presencia de una discontinuidad., esta fuga de flujo es capaz de atraer partículas del material ferromagnético finamente dividido el cual forma una línea exterior o indicación de la discontinuidad [16].

El procedimiento se realiza por medio de partículas magnéticas que poseen una alta permeabilidad y una baja retentividad. La alta permeabilidad de las partículas permite la velocidad a ser magnetizadas, donde ceden a ser atraídas y retenidas por campos de fuga débiles; la baja retentividad indica que no retienen ningún magnetismo residual para que no se queden sobre la pieza cuando no son retenidas por un campo de fuga.

Las partículas magnéticas pueden ser clasificadas como:

- Partículas secas: Las partículas empleadas en forma de polvo por lo que se pueden utilizar bulbos o aplicadores en forma de pera o tipo salero.
- Partículas húmedas: Las partículas magnetizables húmedas están diseñadas para formar una suspensión en un vehículo como agua o destilados livianos de petróleo, para aplicar a la superficie de ensayo por flujo, vaporizado o vertido con el vehículo de suspensión.

Para la realización de la prueba la superficie de las piezas a examinar deberá estar limpia, seca y libre de aceite, suciedad, grasa, óxidos. La efectividad del ensayo dependerá del movimiento de las partículas magnéticas sobre la superficie de la probeta.

El ensayo consiste en magnetizar la pieza objeto de ensayo y evidenciar la presencia de líneas de fuga de flujo magnético. Se emplea corriente eléctrica ya sea continua, alterna o rectificadas que inducen a campos magnéticos. Entre menor sea la frecuencia, el campo magnético generado por la corriente es mayor.

La alineación de las discontinuidades se correlaciona con las líneas de flujo magnético. La orientación de la discontinuidad forme un ángulo entre 45 y 90° en relación a la dirección de las líneas de flujo magnético [16].

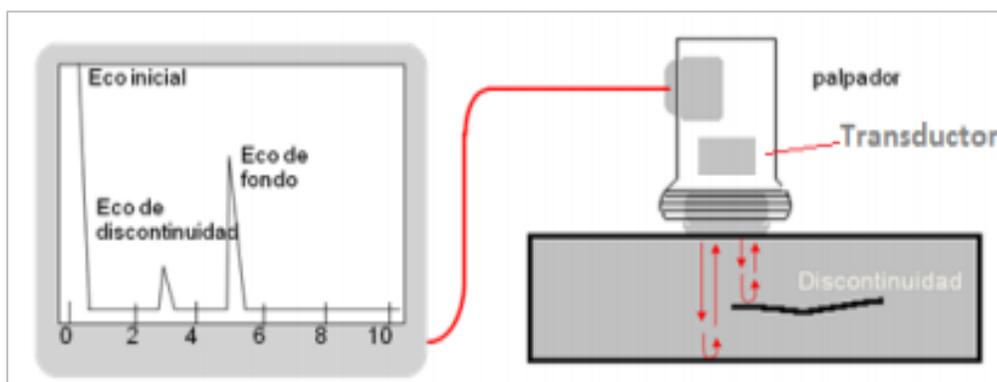
El procedimiento específico de la prueba se encuentra descrito en el anexo B (Procedimiento de inspección por partículas magnéticas, de la empresa TEASMET SAS), con el cual se llevó a cabo la ejecución de la prueba.



**Gráfica 12.** Aplicación partículas magnéticas [16]

## 1.4.6 Ultrasonido

El ensayo por ultrasonido usado es la técnica pulso-eco, en el cual la energía del sonido reflejada y recibida se convierte nuevamente en energía eléctrica por el elemento piezoeléctrico del transductor y cuya atenuación se observa en el tubo de rayos catódicos o en algún otro dispositivo que permita la visualización de los registros, como se muestra en la siguiente imagen [17].



**Grafica 13.** Ultrasonido por eco [17].

La inspección por ultrasonido se basa en la introducción de un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia en el material, las cuales viajan a través de este disminuyéndose gradualmente y son reflejadas a la interface. Los equipos de ultrasonido tienen la capacidad de detectar discontinuidades en la capa superficial del material, o bien discontinuidades subsuperficiales e internas. La precisión del equipo depende del tipo de palpador y el rango de frecuencias del equipo (0.2 MHz hasta 25 MHz).

El procedimiento indica que la superficie debe estar libre y limpia, el equipo se debe calibrar con el bloque patrón (bloque de acero para evaluar la longitud de onda con respecto al espesor de la probeta) (bloque VI) para realizar los ajustes de sensibilidad y control de

ganancia. El acoplante en la superficie de la probeta, permite reducir la fricción y el ruido. Por medio del nivel de referencia y el factor de atenuación podemos evaluar las indicaciones, estas se analizan con los parámetros de aceptación (AWS D1.1 6.2 y 6.3).

El procedimiento como los equipos usados específicamente para la prueba se encuentran descritos en el anexo C (procedimiento de inspección por ultrasonido AWS de la empresa TEASMET SAS).



**Gráfica 14.** Aplicación prueba ultrasonido [17].

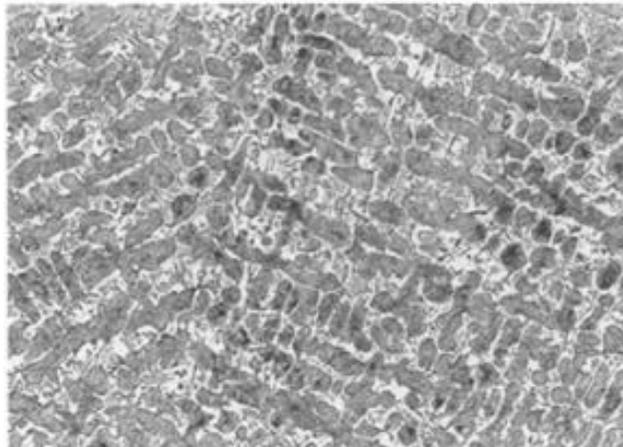
### 1.4.7 Análisis microestructural del acero

Los granos de un acero pueden estar constituidos por una o más fases del tipo: austenita, ferrita, perlita, cementita. Así, por ejemplo, un acero al carbono con una concentración de Carbono de 0,20 %, estará formado por 75% de ferrita ( $< 0,008$  % C) y aprox. 25 % de perlita (con 0,8 % C); mientras un acero de mayor una concentración de C (por Ej., 0,40 %) tendrá mayor proporción de perlita (aproximadamente 50 %) [18].

El hierro es un metal que tiene las propiedades de dureza y tenacidad, tiene un diámetro atómico de 24,8 nm, el cual alcanza la fusión a temperaturas de 1.535 °C. El hierro tiene el número atómico  $Z = 26$  (26 protones) y su peso atómico es 56 g/mol (26 protones y 30 neutrones) [18].

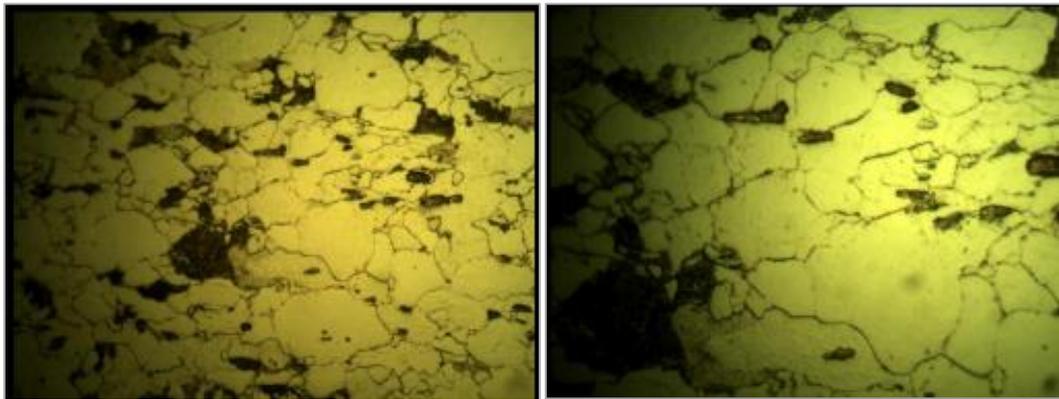
El carbono tiene un diámetro mucho más pequeño de 15,4 nm, tiene las propiedades de fragilidad y maleabilidad. El Carbono tiene el número atómico  $Z = 6$  y su peso atómico es 56 g/mol [18].

La cementita se presenta de forma oscura al ser observada al microscopio, en la práctica todo el carbono del acero se evidencia como  $Fe_3C$ , a continuación se muestra una imagen de la microestructura interna de la cementita.



**Grafica 15.**Microestructura interna de la cementita [18]

En el trabajo de Hernández Yodi [19] se realiza el análisis metalográfico del acero A572 grado 50 en el cual se muestran las diferentes fotomicrografías obtenidas para las diferentes probetas tratadas térmicamente por temple y la probeta patrón, las cuales fueron tomadas en el microscopio marca Olympus, modelo PME, en aumentos de 500X y 1000X, ya que en este se muestran las estructuras del material con mayor claridad, las cuales se muestran en la gráfica 16.



(a)

(b)

**Grafica 16.** Microestructura Acero A572 Gr 50 (a) aumento a 500X, (b) aumento a 1000x[18]

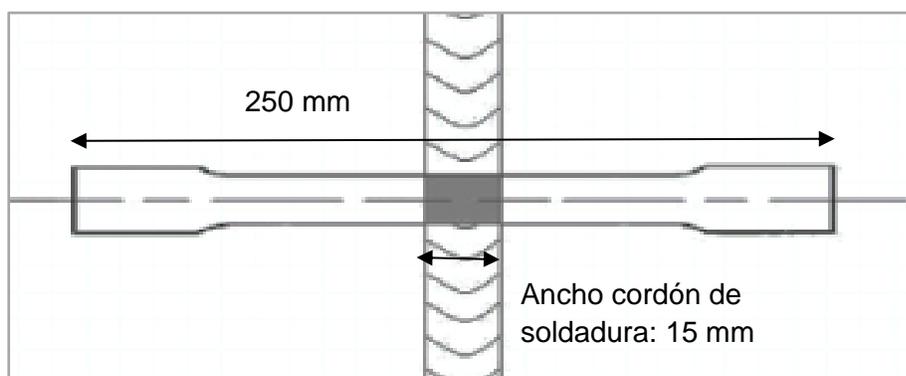
## 2. Análisis de Resultados

En este capítulo se presenta el análisis de las diferentes pruebas mecánicas como microdureza, prueba de tensión y ensayos no destructivos como líquidos penetrantes, partículas magnéticas, entre otras. Se realiza la variación de los parámetros de aplicación de soldadura, donde el primero es la variación de la corriente de trabajo y posteriormente la variación de la velocidad de avance.

El análisis de la unión soldada se basa en el acero estructural ASTM A572 gr 50, de tipo bisel en x de 1", de 200 mm x 200 mm, mediante el proceso de soldadura FCAW-G con electrodo EXATUB E71T-1C.

El desarrollo de las juntas, las cuales están especificadas en el WPS (procedimiento de soldadura) de la empresa TAESMET SAS (anexo D), en el que se indican los parámetros para la aplicación de la soldadura de acuerdo a la norma AWS D1.1 [7] en el que se basaron los soldadores para la aplicación del cordón de soldadura; se obtuvieron como resultado total 12 platinas soldadas, a partir de estas se realizó la mecanización de las probetas para las diferentes pruebas mecánicas y ensayos no destructivos.

La mecanización de las platinas se realizó mediante el proceso de CNC con el fin de proporcionar el diseño requerido para las pruebas mecánicas de tensión y microdureza como se muestran en la siguiente gráfica.



**Grafica 17.** Probeta para prueba de tensión. Fuente propia

Para establecer la velocidad de avance se realizaron 10 pruebas en la medición del tiempo y así calcular el tiempo promedio de velocidad, obteniendo los siguientes resultados:

Longitud platina (mm)	Tiempo (s)	Velocidad (mm/s)
200	1.593 ± 2,48	0,13

**Tabla 10.** Velocidad de avance

## Fase 1. Variación de la corriente de trabajo

Para la primera fase se realizó el depósito de soldadura usando tres variaciones de corriente, obteniendo dos probetas para cada valor. Se mantuvieron constantes los valores de voltaje y velocidad de avance, estos parámetros se encuentran establecidos en el WPS (Especificación del procedimiento de soldadura, anexo D), los valores se encuentran detallados en la siguiente tabla:

# Probeta	Corriente [A]	Voltaje [V]	Velocidad de avance [ mm/s]
1	196,67	24	0,13
2	246,67	24	0,13
3	286,67	24	0,13

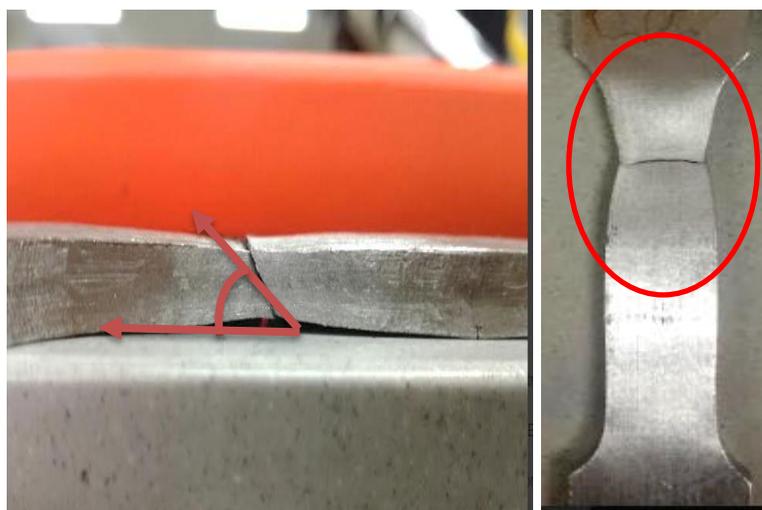
**Tabla 11.** Parámetros de trabajo primera fase.

## 2.1 Ensayo de tensión

Para la ejecución del ensayo de tensión se usó la maquina universal de ensayos de los laboratorios de la Universidad Antonio Nariño, sede sur. Se realizaron en total 6 ensayos de tensión correspondientes a dos probetas para cada valor de corriente.

El objetivo de este ensayo es determinar el valor de corriente que entrega las mejores propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, % de elongación, etc, a una soldadura de tipo flux cored. El valor de corriente obtenido será utilizado para la variación de la velocidad de avance de la fase dos de la parte experimental de este trabajo.

El análisis de la zona de fractura permitió identificar una fractura dúctil para todos los ensayos, debido a la apariencia “copa y cono” en el punto de ruptura y el ángulo aproximado de  $45^\circ$  en la fractura respecto a la dirección de la fuerza aplicada, la cual se puede apreciar en la gráfica 18, estos resultados concuerdan con los análisis realizados en la curvas de esfuerzo deformación de las probetas, las cuales muestran una variación plástica promedio, entre los (325 – 405) MPa, y una rango de deformación promedio entre los (8 -24) *mm/mm*.

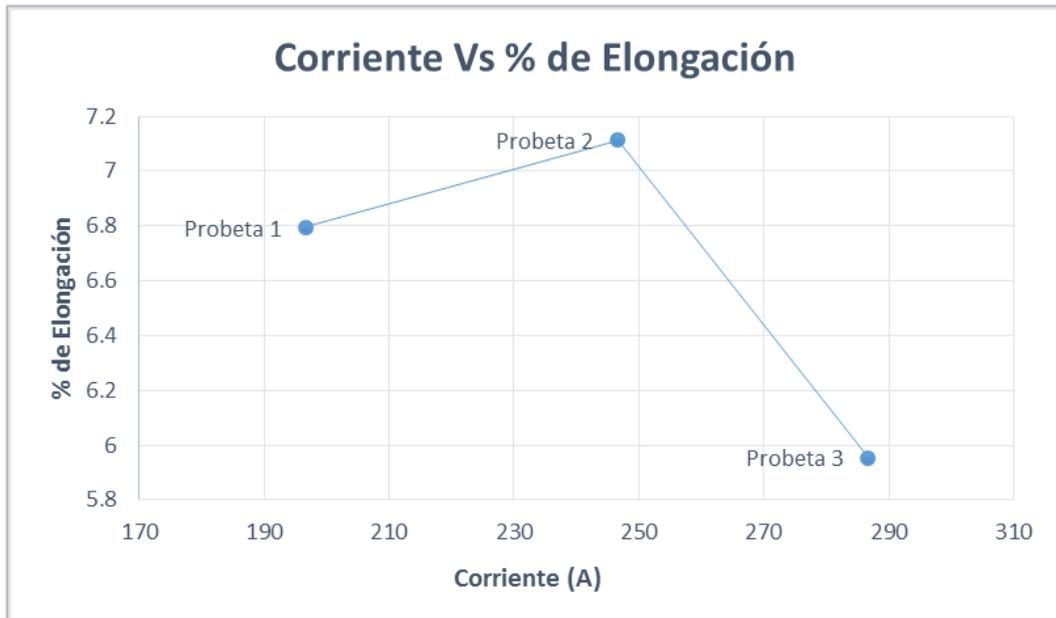


**Gráfica 18.** Ruptura luego de prueba de tensión, fuente propia.

De acuerdo a la ecuación 3 se realizó el cálculo del % de elongación, en la gráfica 19 se presenta la variación en función de la corriente de trabajo. Se puede determinar que la probeta número 3 tiene el menor % de elongación comportándose de manera más frágil, deformándose menos y soportando una menor carga en comparación con las otras dos probetas.

Probeta	Corriente (A)	% de Elongación promedio
1	196,67	6,79 ± 0,08
2	246,67	7,11 ± 0,12
3	286,67	5,95 ± 0,76

**Tabla 12.** % Promedio de Elongación

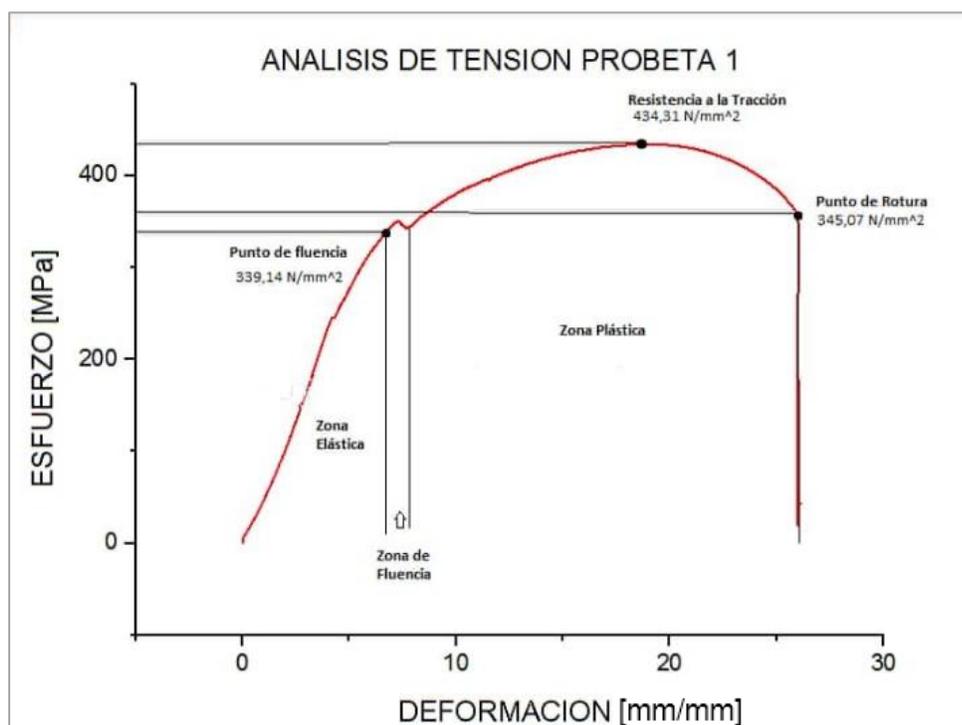


**Grafica 19.** Corriente Vs % de Elongación, Fuente propia

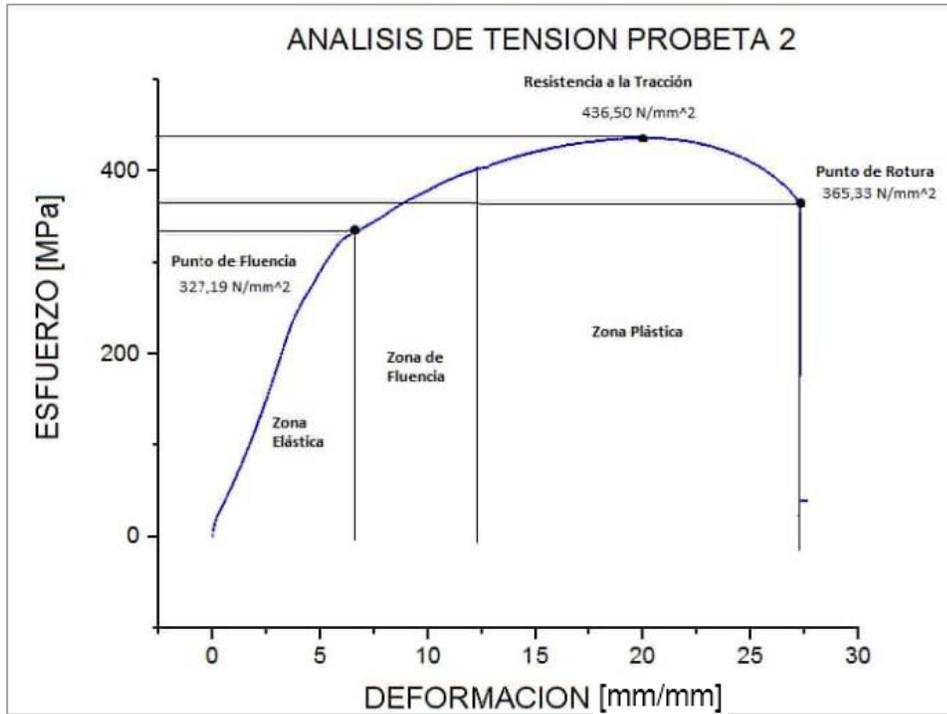
De acuerdo a los valores obtenidos para el % de elongación promedio, se concluye que la probeta número tres la cual obtuvo el 5.95 %, en la que se usó una corriente de 286,67 [A], fue la que obtuvo una menor deformación plástica antes de la ruptura, siendo este un

factor para determinar a la corriente número 3 como la que proporciona un mejor comportamiento en el material. La probeta número uno presenta una condición similar en el % de elongación, teniendo en cuenta que con la desviación estándar registrada en la probeta número tres, los valores son muy cercanos, sin embargo la probeta número tres presenta una deformación unitaria menor como se observa en la gráfica 22, lo que nos indica un mejor comportamiento del material al ser sometido a carga.

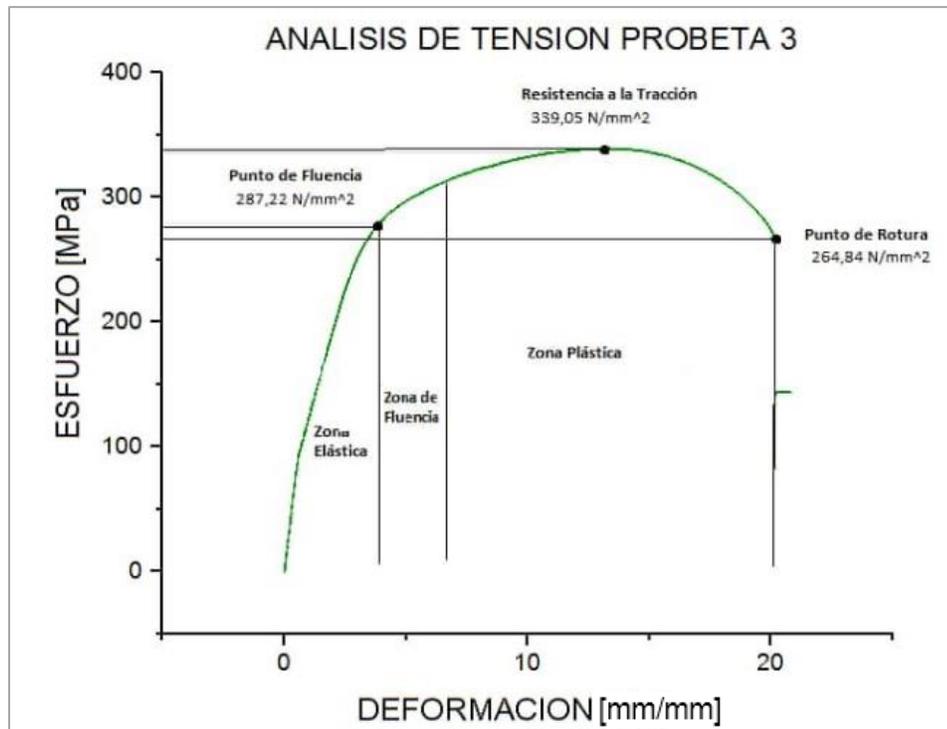
Luego de realizar los cálculos para cada una de las probetas, según los datos arrojados por la maquina universal de ensayos, se obtienen las siguientes curvas de Esfuerzo Vs Deformación.



**Gráfica 20.** Curva esfuerzo Vs deformación Probeta # 1. Fuente propia



Gráfica 21. Curva esfuerzo Vs deformación Probeta # 2. Fuente propia



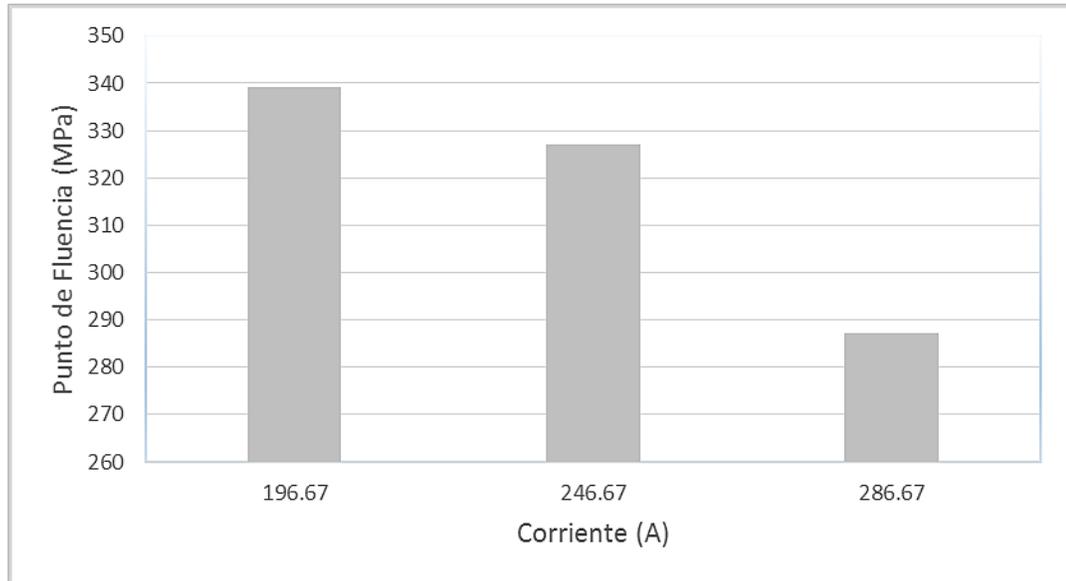
Gráfica 22. Curva esfuerzo Vs deformación Probeta # 3. Fuente propia

En la siguiente tabla se resumen los valores promedio, de las propiedades mecánicas calculadas para cada una de las probetas por cada variación de corriente.

<b>PARAMETRO</b>	<b>PRUEBA 1</b>	<b>PRUEBA 2</b>	<b>PRUEBA 3</b>
<i>Punto de fluencia</i> [N/mm <sup>2</sup> ]	339,14 ± 22,21	327,19 ± 17,89	287,22 ± 12,85
<i>Módulo elástico</i> [MPa]	79,44 ± 3,53	72,16 ± 6,11	83,04 ± 5,23
<i>Resistencia a la tracción</i> [N/mm <sup>2</sup> ]	434,31 ± 45,42	436,50 ± 39,16	339,05 ± 35,65
<i>Punto de rotura</i> [N/mm <sup>2</sup> ]	345,07 ± 43,39	365,33 ± 35,10	264,84 ± 40,31
<i>Resiliencia</i> [MPa]	487,83 ± 67,19	617,45 ± 53,80	464,79 ± 58,21
<i>Tenacidad</i> [MPa]	9031,07 ± 89,90	9696,77 ± 99,59	5994,62 ± 85,11

**Tabla 13.** Cálculos prueba de tensión fase 1

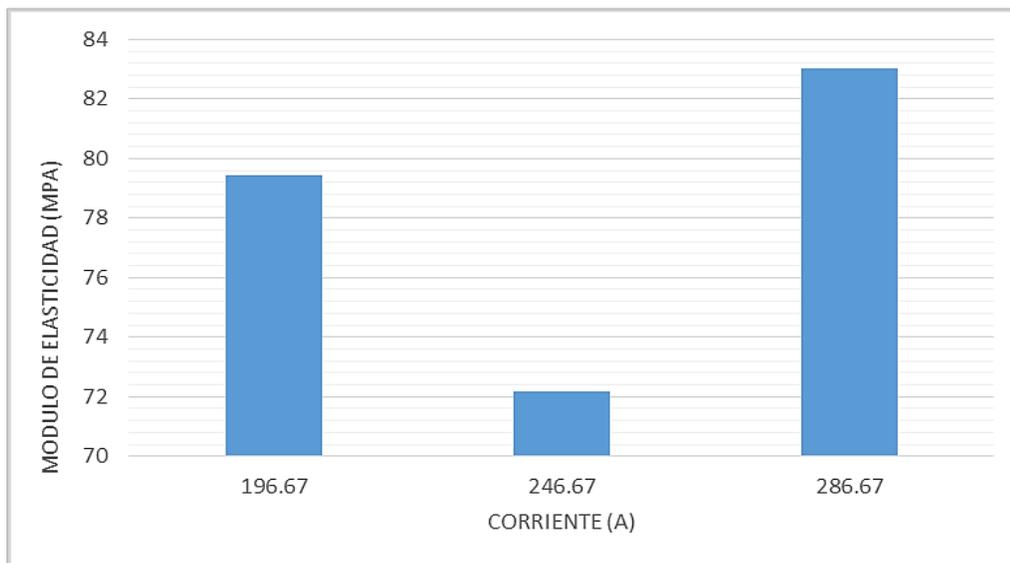
De acuerdo a las gráficas de esfuerzo Vs deformación obtenidas, se puede concluir que la probeta número 3 soporto una menor carga pero se deforma menos es la zona elástica, lo cual es un factor importante ya que al superar la zona elástica y alcanzar el punto de fluencia el material no recupera su forma al quitar la carga si no que se deforma plásticamente de manera irreversible. En la siguiente grafica se muestra la relación del punto de fluencia con cada una de las variaciones de corriente.



**Grafica 23.** Punto de Fluencia Vs Corriente. Fuente propia

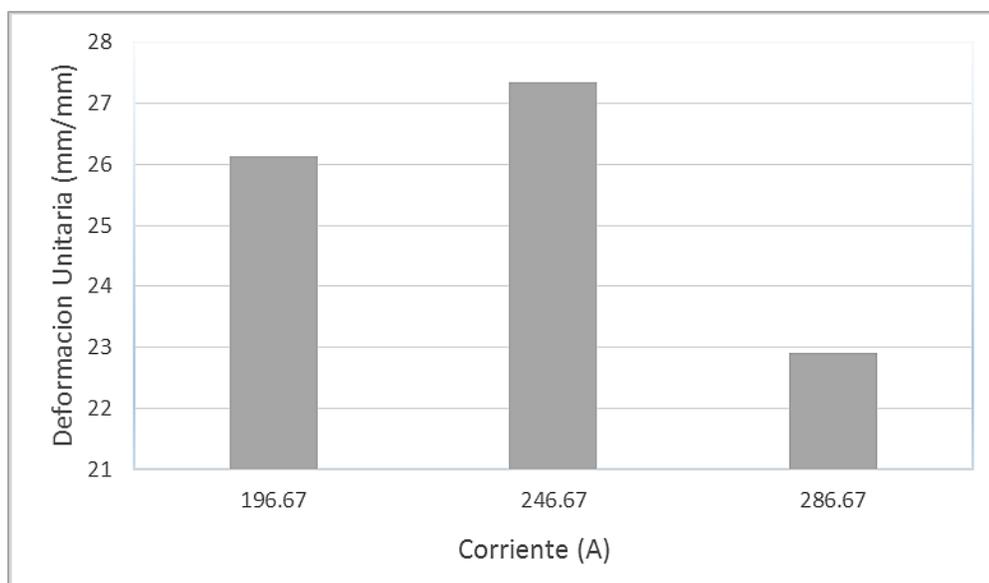
Al aplicar la soldadura usando el mayor valor de corriente se observa que el punto de fluencia es el menor respecto a las otras dos pruebas y está por debajo del valor característico entregado por el fabricante que es de 345 MPa, esto quiere decir que aunque la ruptura de la probeta no fue en el área específica de la soldadura, al usar una corriente elevada se ve afecta una mayor zona por el calor, siendo esta por donde se presentó la ruptura.

Al observar el comportamiento del módulo de elasticidad en la gráfica 24 se puede determinar que para la condición de corriente número 3, este valor está por encima en promedio un 9% de las otras dos condiciones de corriente, por tanto la probeta número 3 de acuerdo a esta propiedad tiene una mejor capacidad de soportar cargas sin presentar grandes deformaciones en su zona elástica, que para nuestro caso de estudio es una condición favorable en las aplicaciones que se le dan a las uniones soldadas de acero A572 por medio de FCAW-G, como son estructuras para puentes, edificios, en las que el material debe soportar carga sin deformarse permanentemente.



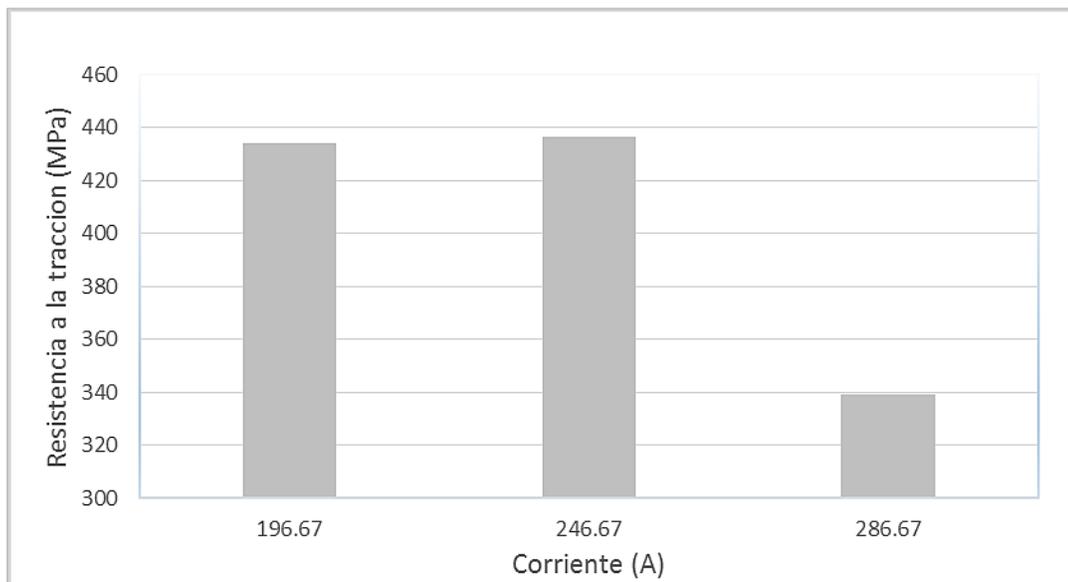
**Gráfica 24.** Módulo de elasticidad Vs corriente fase 1. Fuente propia

Podemos comprobar por medio de la gráfica 25, que la condición de corriente número 3, al obtener un mayor valor en el módulo de elasticidad genera a su vez una menor deformación unitaria en contraste con las otras dos probetas, ya que el material al ser más duro su deformación a lo largo de toda la prueba es significativamente menor a las demás condiciones de corriente.



**Gráfica 25.** Deformación unitaria Vs Corriente. Fuente propia

En la gráfica 26 se puede observar una disminución promedio del 28% en la resistencia a la tracción determinada por la condición de corriente número 3, se puede atribuir este cambio a la fragilidad del material frente a esta condición de corriente usado, en la cual la zona elástica del material es menor a las otras dos probetas. Los valores hallados de resistencia a la tracción corresponden al comportamiento típico del acero bajo en carbono, para el cual los valores se encuentran entre (380-480) MPa.

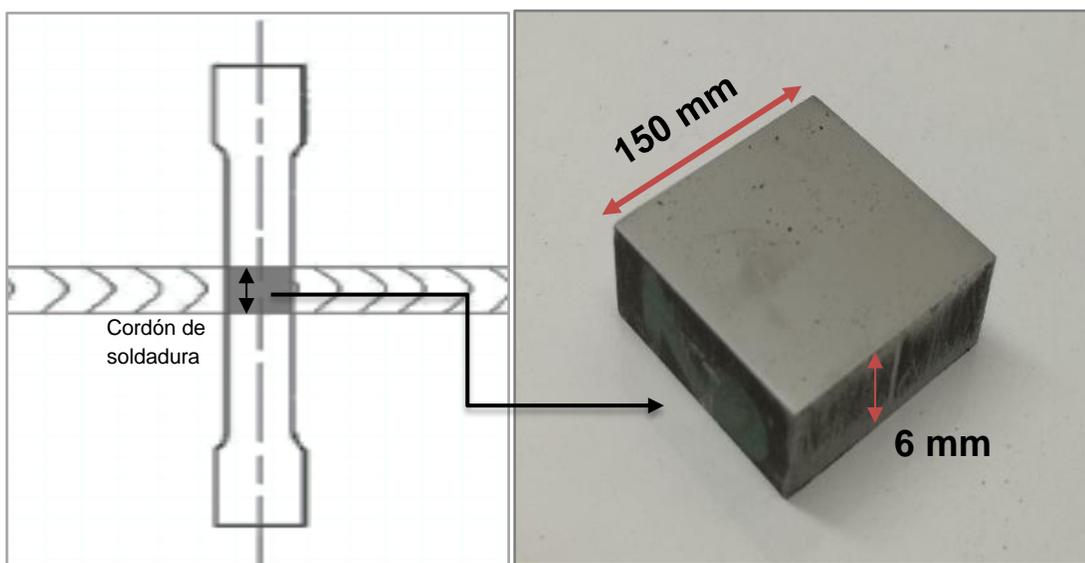


**Grafica 26.** Resistencia a la tracción Vs corriente. Fuente propia

En general el estudio de la mecánica estructural de los materiales, se traduce en buscar el comportamiento óptimo del material bajo alguna aplicación específica; la mejor manera de garantizar la seguridad de un elemento es someterlo a cargas que mantengan su comportamiento en la zona elástica, donde las deformaciones no son permanentes [19]. Por esto se selecciona la condición de corriente número 3, ya que obtuvo el mejor valor del módulo de elasticidad manteniendo en su zona elástica pequeñas deformaciones ante la carga ejercida.

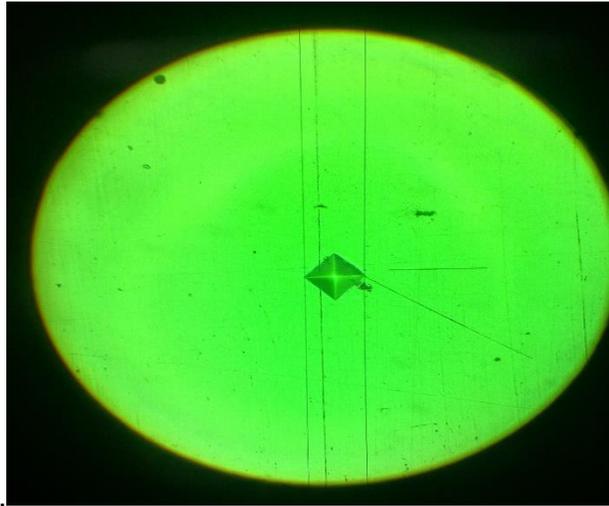
## 2.2 Ensayo de Microdureza

La aplicación de esta prueba se realizó con el micro durómetro Vickers de los laboratorios de la universidad Antonio Nariño, sede sur, la mecanización de las probetas se generó por medio de CNC, puliendo la probeta hasta lograr acabado tipo espejo; tomando como zona de trabajo para las pruebas el área en el que se aplicó la soldadura, con el fin de analizar los cambios de la dureza en función de las variaciones de corriente durante la aplicación de la soldadura.



**Grafica 27.** Zona de extracción de muestras para ensayo de microdureza. Fuente propia

Se realizaron 30 medidas de indentación para cada probeta, realizando una distribución aleatoria de las mediciones, en la zona de aplicación de la prueba, a continuación se presenta un ejemplo de los ensayos de indentación en una de las probetas.



**Grafica 28.** Huella de indentador piramidal vista en micro durómetro, Fuente propia

Los valores de dureza obtenidos para cada una de las condiciones de corriente se registran en la siguiente tabla.

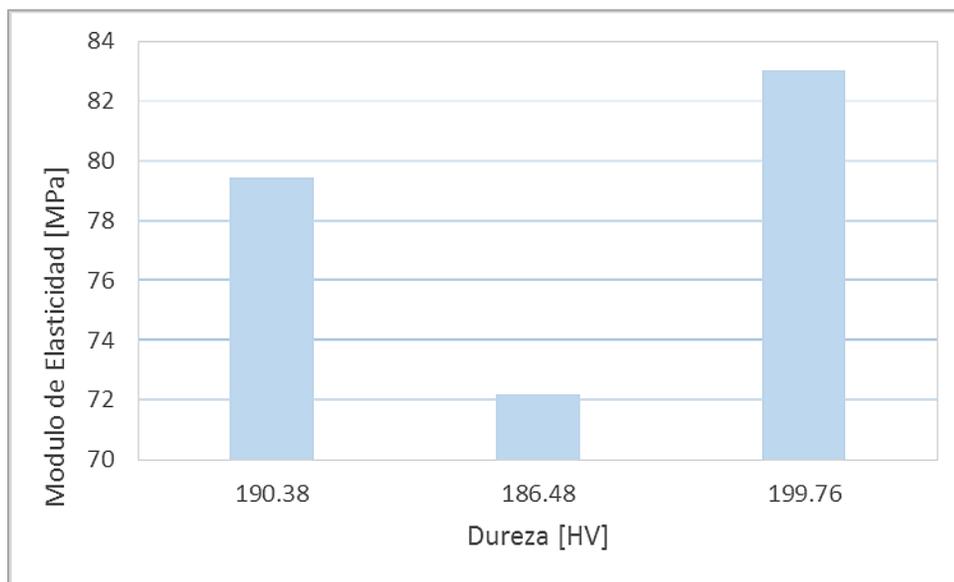
Probeta	Corriente (A)	Dureza (HV)
1	196.67	190.38 ± 8,34
2	246.67	186.48 ± 7.53
3	286.67	199.76 ± 8,03

**Tabla 14.** Dureza Vs Corriente

Se evidencia que al aumentar la corriente de trabajo en la aplicación de la soldadura, se produce un incremento en la dureza del material, debido al calentamiento que se genera por la fusión de los materiales en la zona afectada por el calor, que causa un cambio en las fases microestructurales del material.

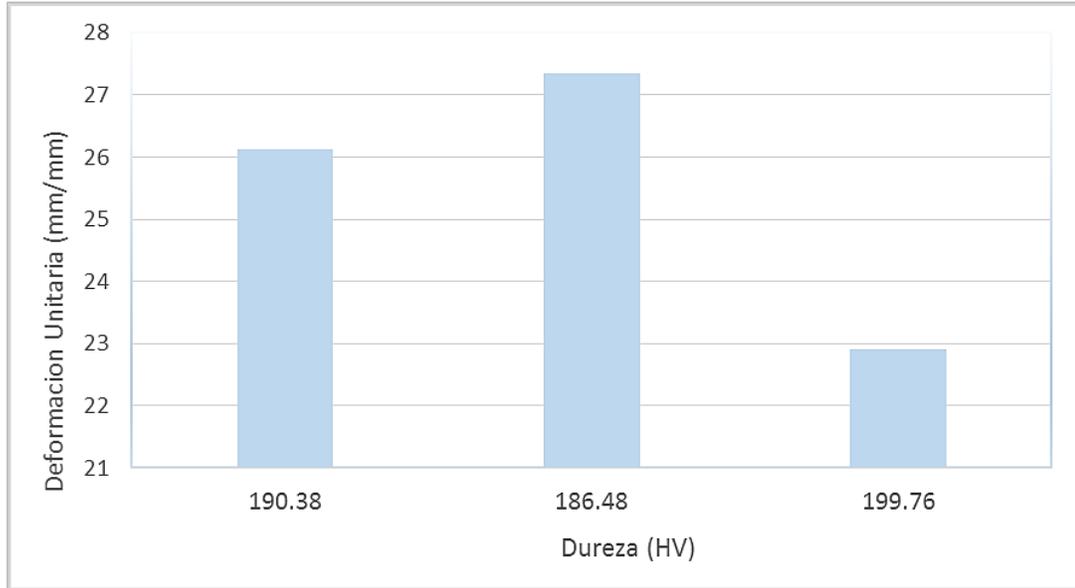
Se observa en la gráfica 29, que el aumento de la corriente de trabajo está relacionado directamente con el aumento en el valor del módulo elástico, al usar el máximo valor de

corriente de 286.67 [A], la probeta tres tiene un aumento promedio del 9% en el valor obtenido para el módulo elástico respecto a las otras dos probetas.



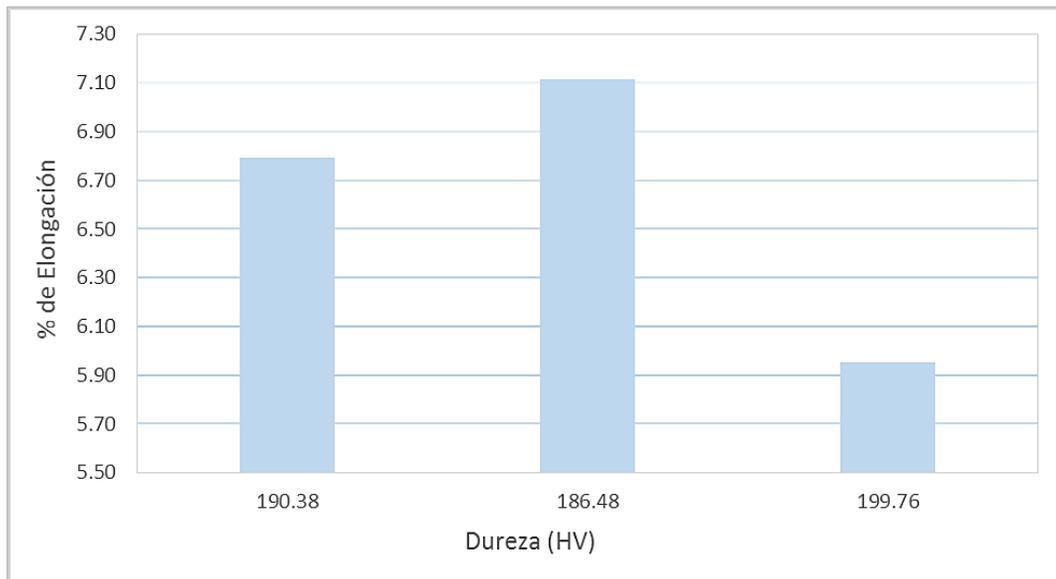
**Gráfica 29.** Módulo de Elasticidad Vs Dureza. Fuente propia

Al relacionar la deformación unitaria con la dureza obtenida en la gráfica 30, se puede determinar que el material al ser más duro consecuentemente tiene una menor deformación y un menor % de elongación, como se observa en el valores obtenidos para la probeta número 3.



**Grafica 30.** Deformación Unitaria Vs Dureza. Fuente propia

El % elongación de la probeta numero 3 como se observa en la gráfica 31, está por debajo en promedio un 17% de las otras dos probetas, ya que al ser el material más duro su fragilidad será mayor al ser sometido a esfuerzos.



**Grafica 31.** % de Elongación Vs Dureza. Fuente propia

## 2.3 Inspección Visual

Por medio de la inspección visual se pretende verificar la condición superficial de las uniones soldadas con base en la norma AWS D1.1 [1]. Para la realización de la prueba se debe tener como precedente que las superficies deben estar libre de suciedad, grasa o escoria; no puede presentar falta de fusión, socavados mayores a 1 mm, poros, entre otras discontinuidades superficiales, como aceptación final de la prueba se anexa formato de liberación de inspección visual el cual da por aceptada la soldadura.

Según lo anterior se evaluó la calidad por medio de inspección visual de discontinuidades en uniones soldadas, implementando herramientas de inspección como la lupa, galga y escuadra. Donde se observó que al aumentar la intensidad de corriente la sobremonta es de menor tamaño y directamente proporcional a su ancho, la medida de cada sobremonta está dentro de los parámetros de aceptación.



**Gráfica 32.** Zona de análisis inspección visual, fuente propia

Se identificaron los tipos de discontinuidades y se dimensionaron utilizando galgas para inspección visual recomendados por la sociedad americana de soldadura, la evaluación se realizó de acuerdo al código de soldadura AWS D1.1 [7]. Se identificaron algunas discontinuidades superficiales como porosidades, socavado lateral, grietas longitudinales en el cordón de soldadura. Los resultados indican que visualmente no se constituyen defectos que lleven al rechazo de la prueba, las medidas recolectadas se encuentran en la tabla 15 y 16.

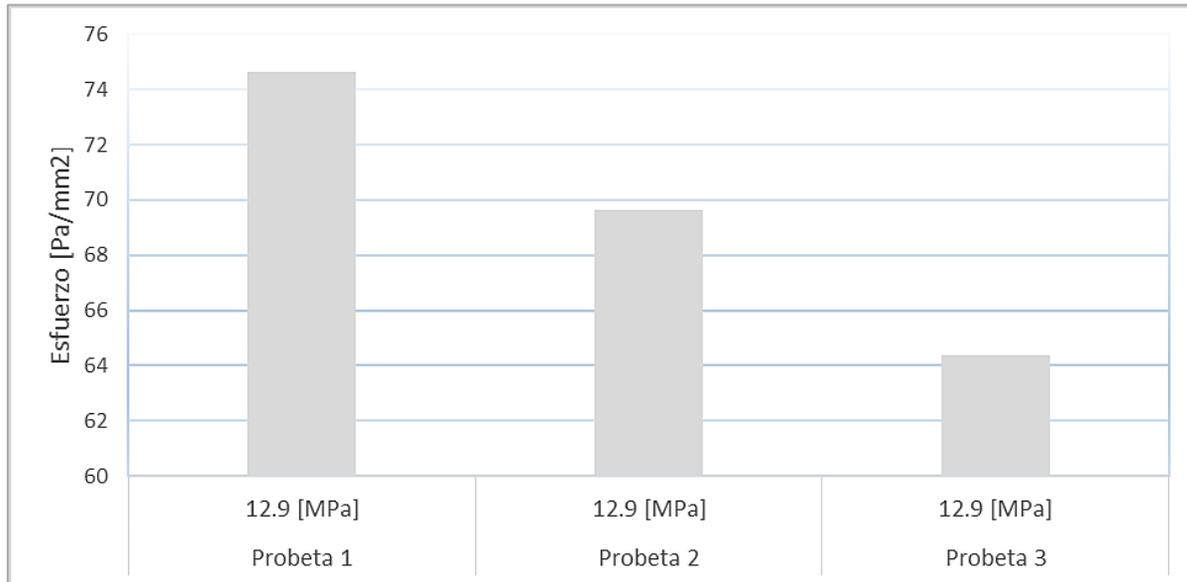
Probeta	Socavado (mm)	Sobre Espesor (mm)	Refuerzo de la soldadura (mm)
1	0.8	2.7	1.9
2	0.9	2.8	2.4
3	0.6	2.5	2

**Tabla 15.** Medidas de inspección visual

Probeta	Corriente [A]	Altura de Garganta [mm]	Longitud del Cordón [mm]
1	196.67	8.64	200
2	246.67	9.26	200
3	286.67	10.02	200

**Tabla 16.** Medidas altura de garganta

Al analizar los datos obtenidos se puede deducir que al usar un mayor valor de corriente de trabajo, aumenta proporcionalmente la medida de la altura de garganta. A partir de estas mediciones se halla la resistencia a la tracción o compresión de la soldadura, usando la ecuación 5 se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente gráfica.



**Grafica 33.** Resistencia a la tracción de las soldaduras. Fuente propia

Se evidencia de acuerdo a la gráfica 33 que al aplicar el mismo valor de presión sobre las tres probetas, en la número tres se genera el menor esfuerzo en el material, lo cual se puede atribuir a que esta es la probeta que presenta la mayor dureza.

## 2.4 Líquidos Penetrantes

Con la realización de esta prueba se busca principalmente poner de manifiesto todas aquellas discontinuidades superficiales sobre la soldadura, independientemente de su geometría o material. Inicialmente se realiza limpieza de las superficies, deben estar libres de cualquier sustancia extraña como grasas, óxidos, escoria, la limpieza se realizó con grata, grid o sand blasting como se indica en reporte de examinación (anexo E).

La aplicación de los líquidos se realizó teniendo en cuenta el procedimiento de aplicación del penetrante, que para este caso fue por spray, liquido penetrante tipo II (tinta visible) y método C (removible con solvente), el tiempo de penetración fue de 10 minutos y el tiempo

de revelado 5 minutos (anexo A). Al evaluar la soldadura no se permite defectos de poros, socavado, falta de fusión, grietas superficiales u otros que no cumplan con los criterios de aceptación según la norma AWS D1.1.

Para la primera fase de las pruebas en la cual se usaron tres valores de corriente de trabajo, lo revelado por el ensayo son indicaciones presentadas de color rosado tenue como se observan en la gráfica 34; las cuales no afectan la integridad de la soldadura.

Al analizar las probetas se puede determinar que al aumentar la corriente de trabajo se generan menores indicaciones como lo son escoria y rebabas presentadas durante el proceso de soldado, de igual manera no se encontraron defectos como fisuras, poros o grietas que afecten la aceptación de la prueba.

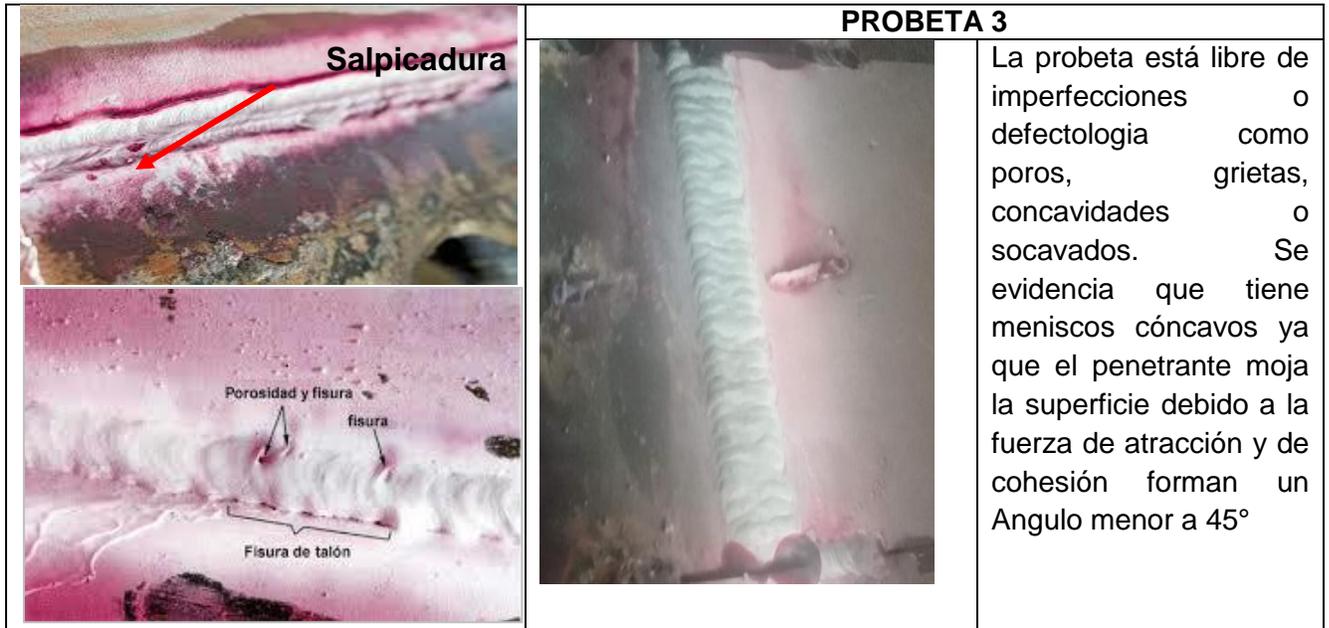
La probeta número 3 presenta las mejores características en el cordón de soldadura, en el reporte de inspección se indica que no presenta grietas, socavados, ni otras discontinuidades superficiales o sub-superficiales y cumple con los criterios de aceptación requeridos en la norma AWS D1.1.



**Gráfica 34.** Prueba de líquidos penetrantes, (a) probeta 1, (b) probeta 2, (c) probeta 3, Fuente propia.

A continuación se describen los hallazgos del ensayo para cada una de las condiciones de corriente.

Defectos ejemplo	Probeta	Análisis
	<p style="text-align: center;"><b>PROBETA 1</b></p> 	<p>La probeta uno se evidencia salpicadura que se presenta en el proceso de soldado. Se elimina el defecto ya que no ejerce un esfuerzo a la soldadura. Se analiza que el ángulo de contacto es menor a <math>90^\circ</math> por lo que la humectación del líquido es mayor.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>PROBETA 2</b></p> 	<p>En la revisión de la probeta se evidencias indicaciones de socavado, el cumple con los criterios de aceptación donde se indica que debe ser de un milímetro de profundidad, la medida realizada sobre la probeta es de 0.8 mm.</p>



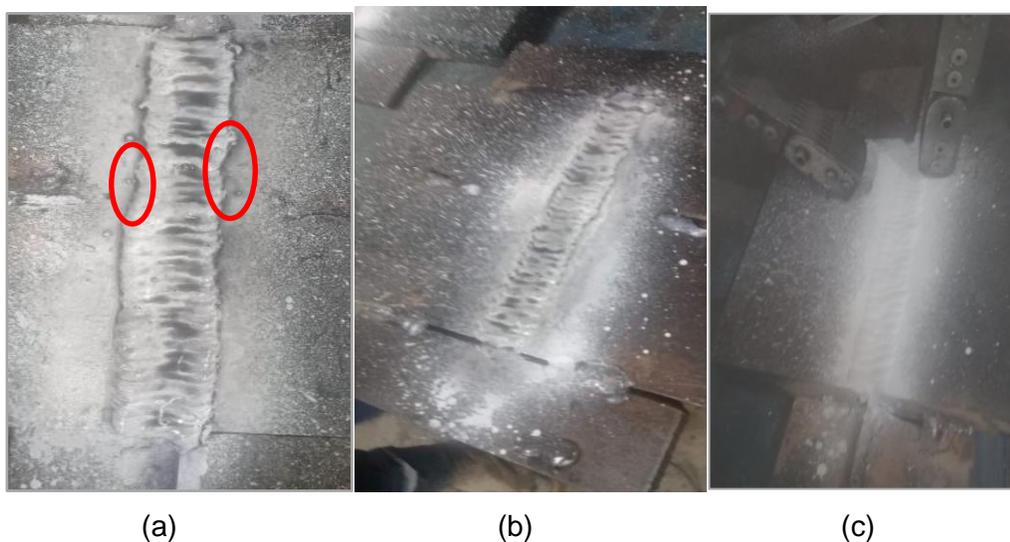
\*Defectos ejemplo, fuente [20]

De acuerdo a los resultados obtenidos en la inspección de las probetas, se puede determinar que al usar el menor valor de corriente en la aplicación de la soldadura, las indicaciones, discontinuidades y defectos son mayores, en comparación con la corriente usada en la probeta número 3 en la cual no se encuentran defectos importantes en el cordón de soldadura.

## 2.5 Partículas magnéticas

El análisis de esta prueba se realiza sobre el área de las uniones soldadas con el fin de detectar discontinuidades sobre o alrededor del cordón de soldadura. Inicialmente se realiza la limpieza de impurezas como polvo, aceite, oxido, laminilla, o salpicaduras que puedan restringir el movimiento de las partículas, la limpieza sobre las superficies se realiza con grata como se indica en reporte de inspección (anexo F).

Para la aplicación se debe tener en cuenta la polaridad y la corriente del yugo, al evaluar las indicaciones de las partículas no pueden presentar defectos sub-superficiales ni superficiales.



**Grafica 35.** Discontinuidades prueba de partículas magnéticas (a) probeta 1, (b) probeta 2, (c) probeta 3, fuente propia

En la primera fase de trabajo en la cual se realizan las variaciones de corriente, se analiza la formación lineal de las partículas magnéticas, generadas por el campo magnético, se evidencian algunas discontinuidades a lo largo del cordón de soldadura, a continuación se presentan los hallazgos de la prueba.

DEFECTOS EJEMPLO	PROBETAS	ANÁLISIS
 <p><b>Poros</b></p>  <p><b>Grieta</b></p>  <p><b>Agrupación de poros</b></p>  <p><b>Concavidades a lo largo del Cordón</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Probeta 1</b></p>  <p><b>Socavados y concavidade</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Probeta 2</b></p>  <p><b>Socavados</b></p>	<p>En la probeta 1 se presenta socavado y concavidades, esto se evidencia ya que se presenta una fuga de campo magnético a lado derecho de la junta. La medida del socavado es de 0.2 mm, lo cual está dentro de los criterios de aceptación.</p> <p>En la probeta 2 se presenta socavado, la fuga de campo magnético se presentó al lado izquierdo de la junta. Al medir el socavado indica 0.5 mm, al estar sobre toda la junta se da como resultado el rechazo de la probeta; se realiza el arreglo de la pieza soldada. De acuerdo a esto se puede indicar que con la corriente número tres la junta presenta este tipo de discontinuidades mas frecuentemente.</p>

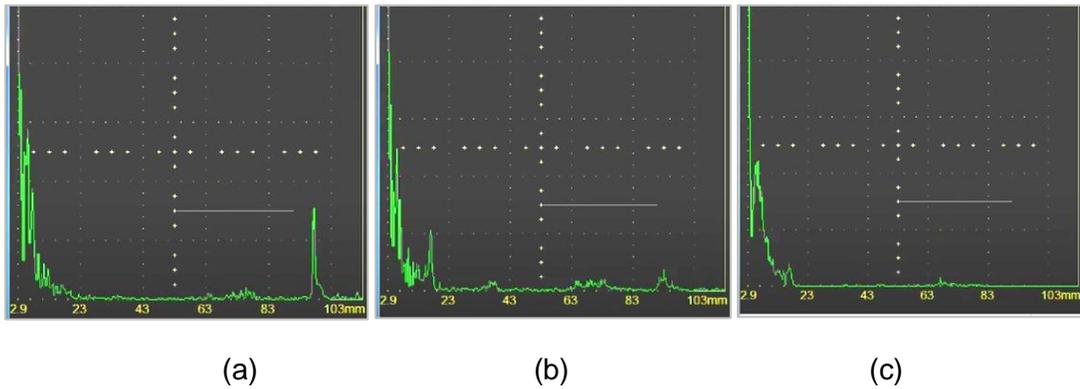
 <p><b>Socavado</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Probeta 3</b></p>  <p><b>Salpicadura y concavidades</b></p>	<p>En la probeta se evidencian varias salpicaduras que se presenta en el cordón de soldadura. También se presentan concavidades lo que nos indica que la junta no tiene forma homogénea. De esta prueba podemos indicar que la corriente de esta probeta proporciona menos defectología en comparación a la 1 y 2.</p>
--	---	--

\*Defectos ejemplo, fuente [21]

De acuerdo al análisis de las probetas para la primera fase, la fuga de campo magnético se presentó en la probeta 1 y 2 generando socavados como se muestra la tabla anterior, la tercera probeta si bien presenta salpicaduras no presento defectología importante en el cordón de soldadura; por lo que podemos indicar que la corriente número 3 muestra menos indicaciones que puedan generar esfuerzos o daños en la junta.

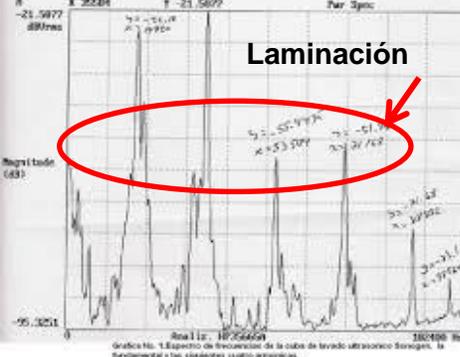
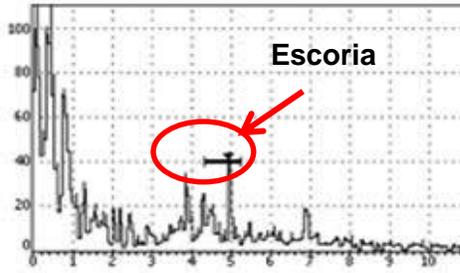
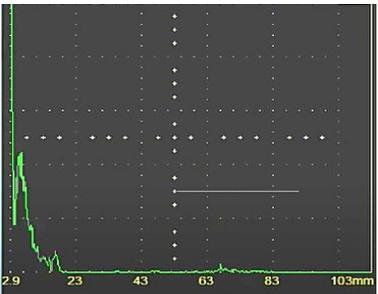
## 2.6 Ultrasonido

La Prueba de ultrasonido tiene como fin determinar la naturaleza de una discontinuidad presente en una soldadura, esta puede ser determinada al observar el comportamiento de las indicaciones sobre la pantalla del Scan cuando el transductor es manipulado y es interceptado el haz ultrasónico por la discontinuidad. A continuación se presentan los espectros producto de la inspección para cada una de las condiciones de corriente de trabajo durante la aplicación de las soldaduras.



**Gráfica 36.** Espectro de ultrasonido primera fase. (a) Probeta 1, (b) Probeta 2, (c) Probeta 3, fuente propia

Las especificaciones de reporte nos indican que al calibrar la ganancia y el factor de atenuación la clasificación de la indicación cumple con los criterios de aceptación 6.2 y 6.3 (anexo G) de la norma AWS D1.1, se determina que a mayor corriente de trabajo los picos mostrados en las indicaciones son más bajos, lo cual revela que hay una buena fusión en la soldadura.

DEFECTOS EJEMPLO	PROBETAS	ANÁLISIS
 <p><b>Grietas, Porosidad</b></p>  <p><b>Laminación</b></p>  <p><b>Escoria</b></p>	<p><b>Probeta 1</b></p>  <p><b>Probeta 2</b></p>  <p><b>Probeta 3</b></p> 	<p>En esta probeta se genera una escoria interna en el material base ya que esta fuera de los parámetros de ganancia y niveles de sensibilidad. Esto se presenta en el proceso de creación del acero, se mezcló con escoria.</p> <p>Esta probeta presenta indicaciones como salpicaduras o concavidades. Estas se presentan dentro de los parámetros, el tamaño medido esta entre 0,76mm-0,84 mm.</p> <p>En el ensayo se evidencia que la probeta no presenta ninguna indicación esto sucede cuando la fusión entre el material base y el material de aporte fue la adecuada.</p>

\*Defectos ejemplo, fuente [22]

De acuerdo al análisis de cada uno de los espectros obtenidos para cada una de las condiciones de corriente, se puede determinar que no se encuentran discontinuidades internas en ninguna de las probetas. La evidencia de indicaciones nos permite decir que la condición de corriente 3 cumple con todos los criterios de aceptación de la soldadura y no presenta ninguna indicación en la homogeneidad del cordón de soldadura.

## Fase 2. Variación de la velocidad de avance

En esta sección se analizarán las mismas pruebas mecánicas y no destructivas realizadas en la fase uno de este trabajo. Para esta segunda fase se tomará el valor de corriente número tres, seleccionado durante las pruebas de la fase uno y se realizarán variaciones en la velocidad de avance con el fin de realizar el mismo análisis de la fase anterior bajo estas nuevas condiciones.

Para la segunda fase se realizó el depósito de soldadura a dos probetas diferentes, para cada una de las tres variaciones en la velocidad de avance, las cuales se muestran a continuación.

Longitud platina (mm)	Tiempo (s)	Velocidad (mm/s)
200	1.152 ± 2,86	0.17
200	1.646 ± 3,30	0.12
200	2.046 ± 1.89	0.10

**Tabla 17.** Velocidad de avance fase 2.

Durante la aplicación de la soldadura se mantuvieron constantes los valores de voltaje y corriente, estos parámetros se encuentran establecidos en el WPS (anexo D) los valores se encuentran detallados en la siguiente tabla:

# Probeta	Corriente [A]	Voltaje [V]	Velocidad de avance [ mm/s]
<b>1</b>	286,67	24	0.17
<b>2</b>	286,67	24	0.12
<b>3</b>	286,67	24	0.10

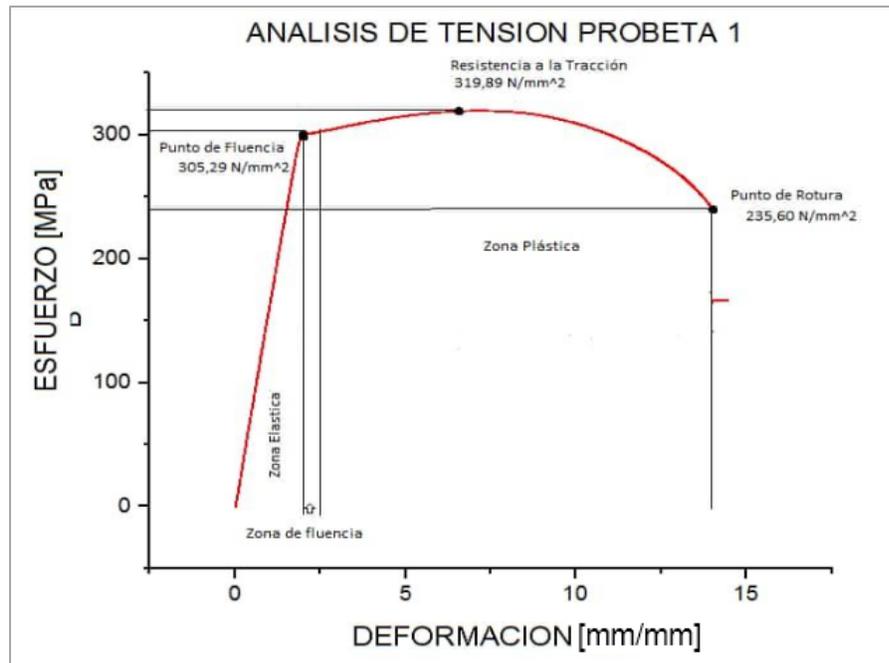
**Tabla 18.** Parámetros de trabajo fase 2

## 2.7 Ensayo de tensión

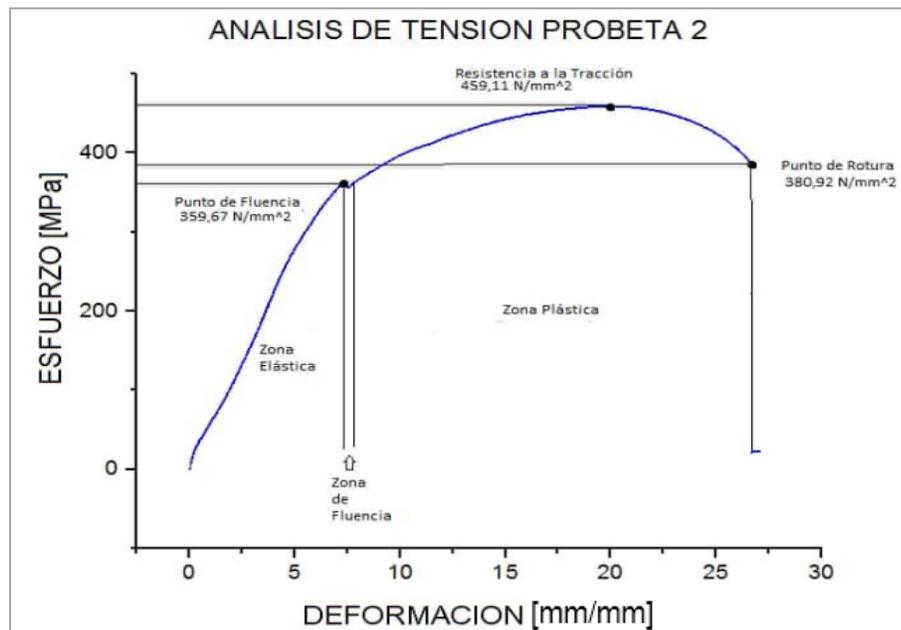
El objetivo de este ensayo es determinar la velocidad de avance que entrega las mejores propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, % de elongación, etc., a una soldadura de tipo flux cored, teniendo en cuenta el valor de corriente constante que se seleccionó en la primera fase del procedimiento de este trabajo. Se analizaran los cambios de las diferentes medidas obtenidas en la prueba, en relación con los datos calculados inicialmente a una velocidad de avance constante.

El análisis de la zona de fractura permitió identificar una fractura dúctil al igual que la fase uno, debido a la apariencia “copa y cono” en el punto de ruptura y el ángulo de la fractura respecto a la dirección de la fuerza aplicada, estos resultados concuerdan con los análisis realizados en las curvas de esfuerzo deformación de las probetas para la fase 2, las cuales muestran una variación plástica promedio, entre los (317 – 374) MPa, y un rango de deformación promedio entre los (6 -22) *mm/mm*. En contraste con los valores obtenidos en la fase 1, se encuentra una disminución promedio del 5% en el rango de esfuerzo aplicado en el cual hay deformación plástica del material, indicando que la variación de la velocidad tiene un efecto sobre la ductilidad del material, haciéndolo más frágil.

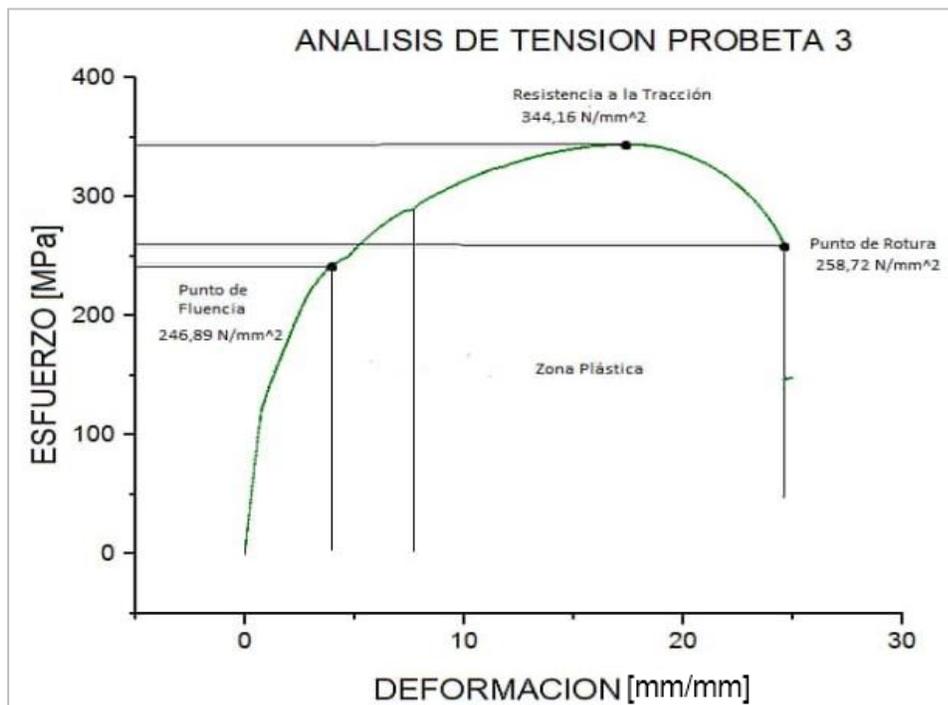
A continuación se presentan las curvas de esfuerzo- deformación obtenidas para cada una de las condiciones de velocidad de avance.



**Grafica 37.** Curva esfuerzo Vs deformación fase 2-Probeta 1. Fuente propia



**Grafica 38.** Curva esfuerzo Vs deformación fase 2-Probeta 2. Fuente propia



**Gráfica 39.** Curva esfuerzo Vs deformación fase 2-Probeta 3. Fuente propia

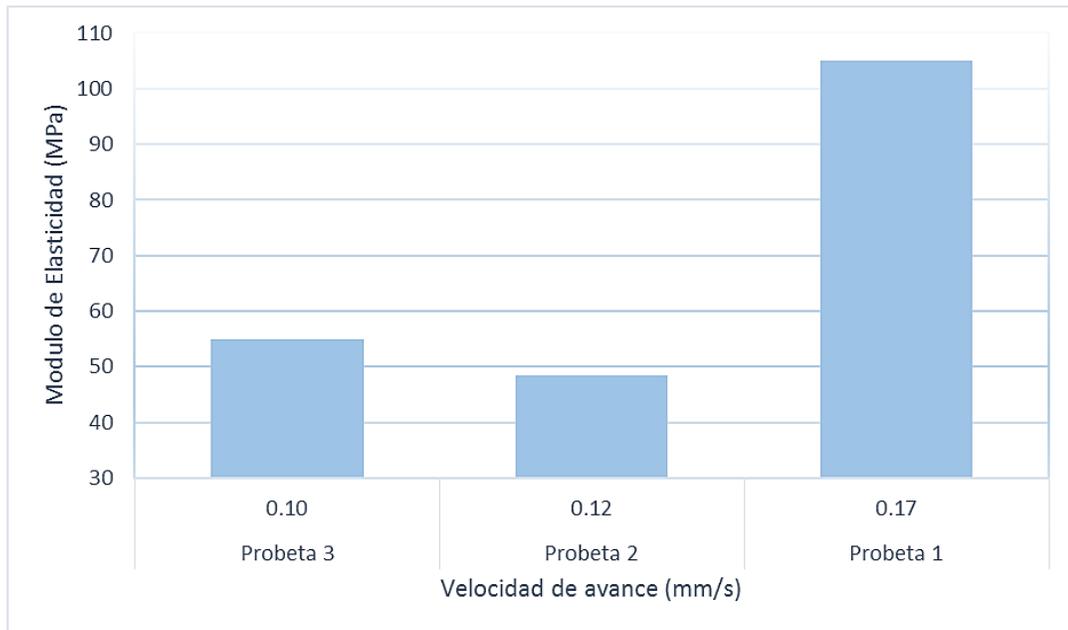
En la siguiente tabla se resumen los valores promedio de las propiedades mecánicas calculadas para cada una de las probetas por cada variación de la velocidad de avance.

PARAMETRO	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3
Punto de fluencia [N/mm <sup>2</sup> ]	305,29 ± 18,13	359,67 ± 15,32	246,90 ± 17,22
Módulo elástico [MPa]	104,97 ± 4,35	48,34 ± 7,12	54,85 ± 6,21
Resistencia a la tracción [N/mm <sup>2</sup> ]	319,89 ± 23,67	459,11 ± 28,87	344,16 ± 20,34
Punto de rotura [N/mm <sup>2</sup> ]	235,61 ± 31,21	380,93 ± 35,67	258,72 ± 38,20
Resiliencia [MPa]	334,38 ± 59,47	815,59 ± 54,42	469,00 ± 47,56
Tenacidad [MPa]	4033,79 ± 97,43	9775,01 ± 88,31	7201,44 ± 80,47

**Tabla 19** Cálculos prueba de tensión fase 2

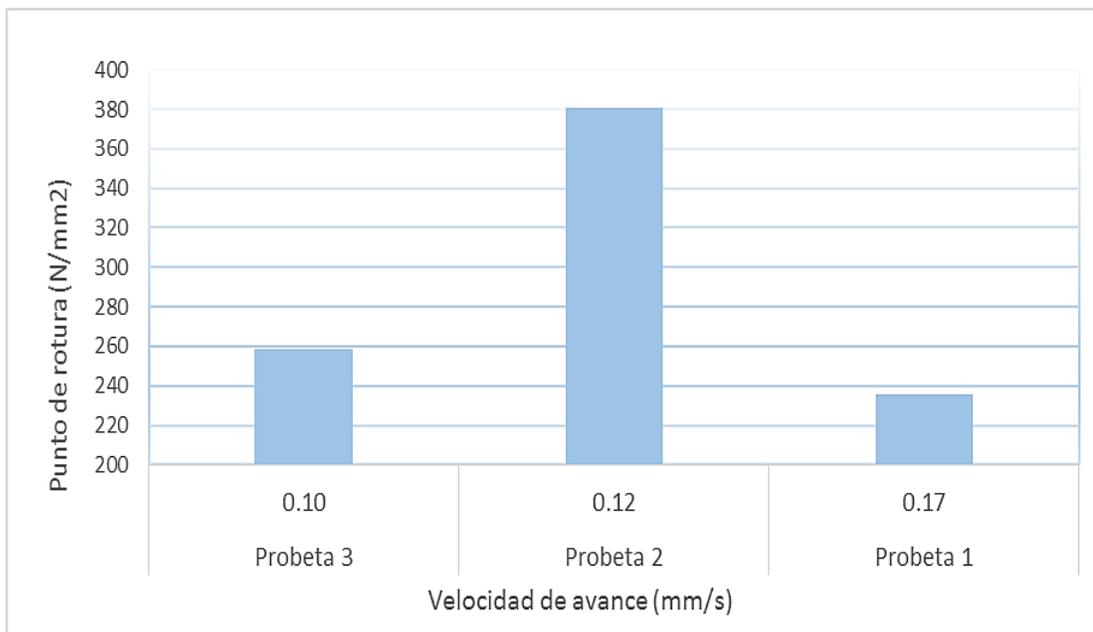
De acuerdo a las gráficas obtenidas se puede determinar que la probeta número uno en la cual se usó la velocidad de avance más alta, tiene un comportamiento en la zona elástica entre los 0-305 MPa con mínima deformación, y una zona de fluencia muy pequeña en comparación con las otras dos probetas. Lo cual nos indica la probeta puede soportar carga con una deformación mínima en el material, que es una de las principales características que se buscan para el trabajo al cual va a ser sometido este tipo de acero.

Además al comparar el módulo de elasticidad obtenido, podemos comprobar que la mayor velocidad de avance usada, genera una mayor fragilidad en el material, como se observa en la probeta uno, la cual alcanzó el mayor módulo elástico como se muestra en la gráfica 40.



**Grafica 40.** Módulo de Elasticidad Vs Velocidad de avance fase 2. Fuente propia

Al igual que en los resultados de la fase uno, la probeta con el mayor módulo de elasticidad tiene el menor punto de rotura, esto debido a que el material se comporta de manera más frágil, llegando a su la ruptura con una deformación menor, soportando un 40% menos la deformación en comparación a las otras dos probetas.



**Grafica 41.** Punto de rotura Vs velocidad de avance fase 2. Fuente propia

Para la prueba de tensión, la probeta que presenta las mejores propiedades en el material es la numero uno, en la cual se usó la mayor velocidad de avance, ya que al tener el modulo elástico superior a las otras dos probetas, nos indica que las características del material son óptimas para el trabajo al cual vaya a ser sometido, ya que se busca que las deformaciones sean mínimas en la zona elástica al ser sometidos a carga, y el material no sufra deformaciones permanentes.

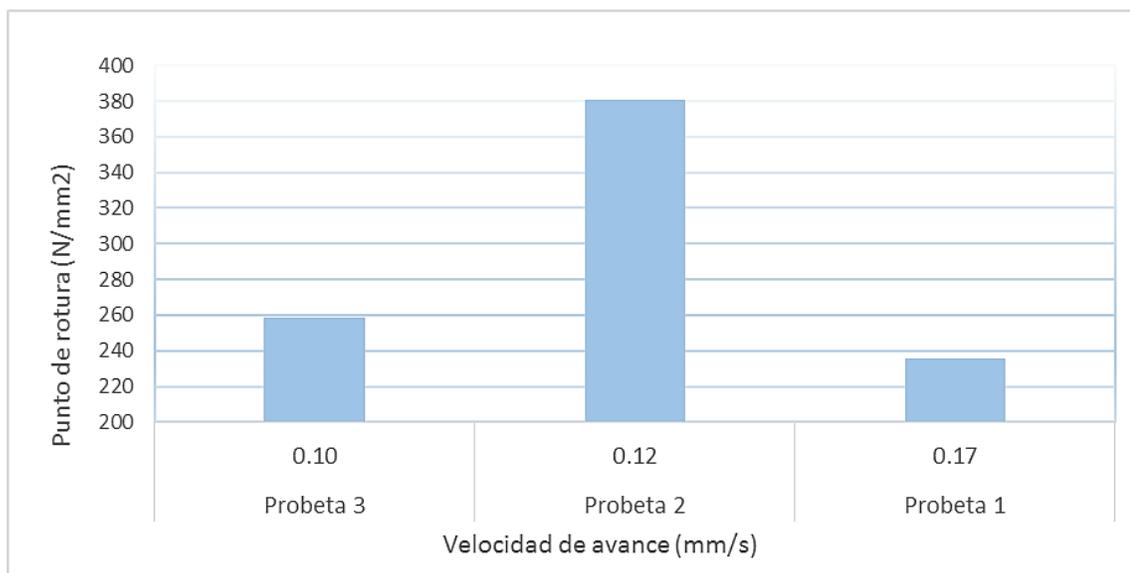
## 2.8 Ensayo de Microdureza

Para la fase dos de esta prueba al igual que en la fase uno, se realizaron 30 medidas de indentación para cada probeta, realizando una distribución aleatoria de las mediciones, se usó una fuerza de 0,98 N en la zona de aplicación de la prueba, a continuación se presentan los resultados obtenidos en la dureza, para cada una de las variaciones de velocidad de avance.

PROBETA	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/s)	MICRODUREZA (HV)
1	0,17	199,82± 8.34
2	0,12	191,38 ± 7,48
3	0,10	199,76 ± 7,36

**Grafica 42.** Dureza Vs Velocidad de avance

De acuerdo a los datos obtenidos los cambios en la velocidad de avance no representan variaciones significativas en la dureza del material, con variación máxima del 5% entre las tres probetas.



**Grafica 43.** Punto de rotura Vs Velocidad de avance. Fuente propia

La variación de la velocidad indica que la probeta número dos en la cual se usó una velocidad promedio de 0.12 mm/s, se obtuvo una mayor resistencia a la tracción, alcanzó el valor más alto en su punto de rotura, pero a su vez logrando una mayor deformación plástica a lo largo de la curva de esfuerzo-deformación, ya que para alcanzar los 380 N/mm<sup>2</sup> el material llega hasta los 26 mm/mm en deformación siendo este el más alto entre las tres probetas.

## 2.9 Inspección Visual

Se identificó el tipo de discontinuidades y se dimensiono utilizando galgas para inspección visual recomendados por la sociedad americana de soldadura y la evaluación se realizó de acuerdo al código de soldadura AWS D1.1 [1]. Se identificaron algunas discontinuidades superficiales como socavados y variaciones en el ancho del cordón de soldadura. Los resultados indican que visualmente no se constituyen defectos que lleven al rechazo de la prueba, las medidas recolectadas se encuentran en la tabla 20.

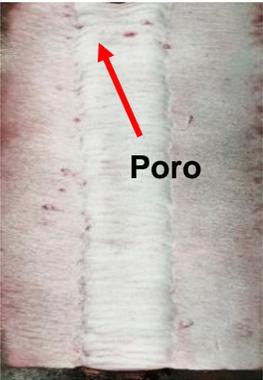
Probeta	Velocidad (mm/s)	Ancho cordón de soldadura (mm)
1	0.17	14.1
2	0.12	14,6
3	0.10	17,2

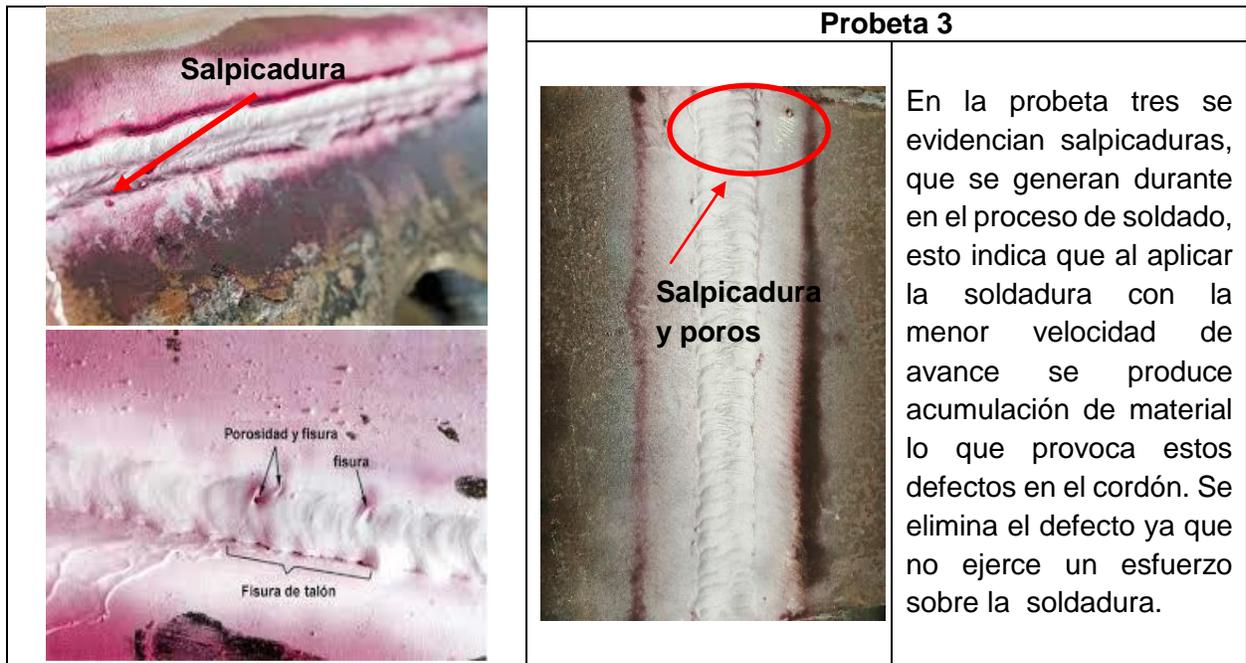
**Tabla 20.** Ancho cordón de soldadura

Las variaciones en el acho del cordón son debidas a que velocidades de avance más bajas, generan que la tasa de depósito del material de aporte sea mayor al igual que la penetración a lo largo que se avanza en la unión de las juntas; al haber mayor material de aporte a su vez el cordón será de mayor ancho en el baño de fusión de la soldadura.

## 2.10 Líquidos Penetrantes

A continuación se describen los hallazgos del ensayo para cada una de las variaciones de velocidad de avance.

DEFECTOS EJEMPLO	PROBETA	ANÁLISIS
	<p style="text-align: center;"><b>Probeta 1</b></p> 	<p>La probeta está libre de imperfecciones o defectología como poros, grietas, concavidades o socavados. Se determina que la mayor velocidad de avance usada, permite que la probeta no presente deformaciones ni discontinuidades que afecten el proceso.</p>
	<p style="text-align: center;"><b>Probeta 2</b></p> 	<p>En la probeta dos se evidencian poros sobre el cordón de soldadura; con una medida de 0,5 mm, esta medida se encuentra dentro de los criterios de aceptación donde, indica que debe ser menor a un milímetro.</p>



\*Defectos ejemplo, fuente [20]

Con este ensayo se analiza que a menor velocidad de avance se presentan más discontinuidades a lo largo del cordón de soldadura, debido a que se producen mayores tasas de depósito de material de aporte originando indicaciones como salpicaduras y poros las cuales podrían generar rotura o fallas en la soldadura al ser sometidos a carga. De acuerdo a estos resultados la condición número uno de velocidad de avance es la más óptima para la aplicación de las soldaduras.

## 2.11 Partículas Magnéticas

A continuación se describen los hallazgos del ensayo para cada una de las variaciones de velocidad de avance.

DEFECTOS EJEMPLO	PROBETAS	ANÁLISIS
<p><b>Poro</b></p>  <p><b>Grieta</b></p> 	<p><b>Probeta 1</b></p> 	<p>Esta probeta no presenta discontinuidades a lo largo del cordón ya que no se evidencia fugas en el flujo del campo magnético. Estos resultados nos indican que esta velocidad de avance no generó defectología en la soldadura.</p>
<p><b>Agrupación de poros</b></p>  <p><b>Concavidades a lo largo del Cordón</b></p> 	<p><b>Probeta 2</b></p>  <p><b>Concavidad</b></p>	<p>En esta probeta se evidencian concavidades a lo largo de la junta, debido a esto el flujo magnético es interrumpido. Estas concavidades se presentan por la forma del Cordón. Se evalúa el tamaño de la concavidad para descartar falta de fusión. Al realizar la medición se indica 0.8 mm, lo que está dentro de los criterios de aceptación para este tipo de indicación.</p>

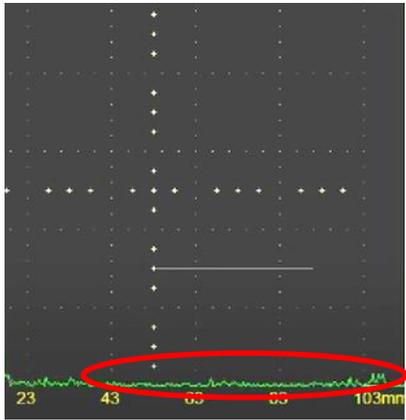
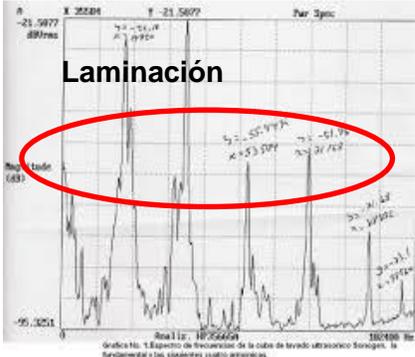
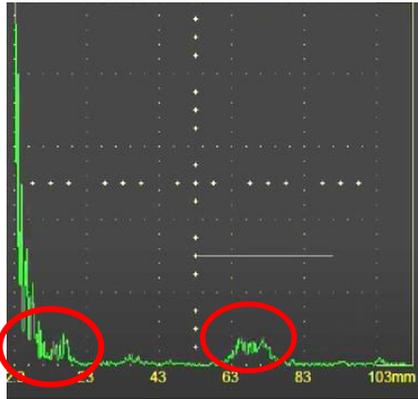
 <p><b>Socavado</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Probeta 3</b></p>  <p>En esta probeta el flujo magnético es interrumpido en todo el cordón, se evaluaron las concavidades y fue rechazada debido a que su espesor es mayor 1.2 mm. Se requiere el arreglo de la junta para la aceptación de la probeta.</p>
--	---

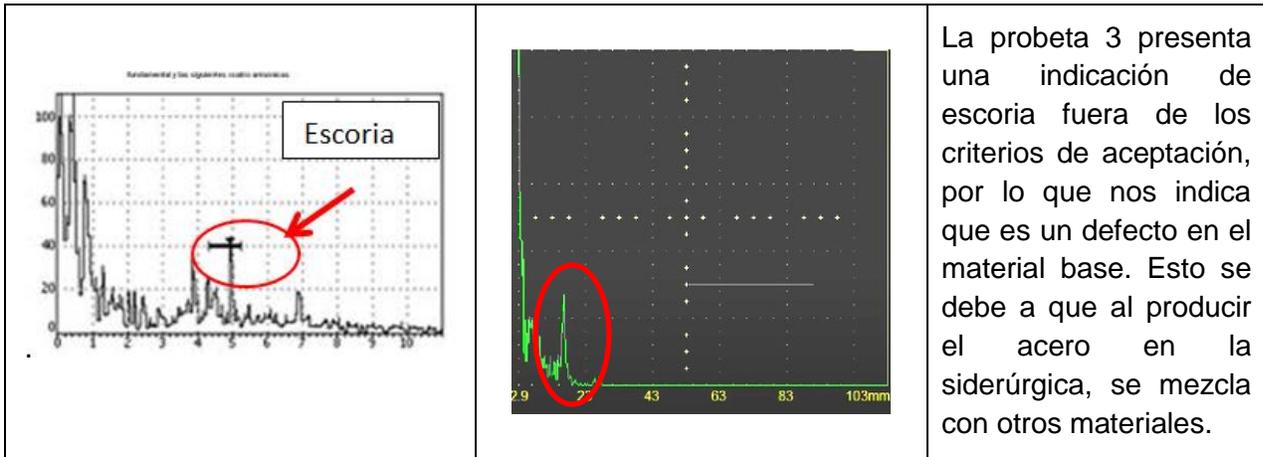
\*Defectos ejemplo, fuente [21]

De los resultados de esta prueba se puede determinar que al usar bajas velocidades de avance durante la aplicación de la soldadura, se evidencian mayores interrupciones o fugas en el flujo magnético; al realizar la prueba sobre la probeta número tres se encontraron concavidades que superan los criterios de aceptación. Estas indicaciones son producto de poco depósito del material de aporte en el relleno interno del cordón.

## 2.12 Ultrasonido

A continuación se presentan los hallazgos de la prueba de ultrasonido, para cada variación de velocidad de avance en el proceso de soldadura.

DEFECTOS EJEMPLO	PROBETAS	ANÁLISIS
<p><b>Grietas, poros</b></p> 	<p><b>Probeta 1</b></p> 	<p>La probeta uno no presenta discontinuidades como lo indica la prueba, ya que las ondas de ultrasonido no registraron indicaciones. Esto se debe a que la velocidad de avance fue la adecuada para la fundición de la unión entre material base y material de aporte</p>
<p><b>Laminación</b></p> 	<p><b>Probeta 2</b></p> 	<p>En la probeta 2 nos indica que muestra escoria, esto se debe a que durante el proceso no se generó una buena limpieza del material. Las ondas de ultrasonido indicaron que tiene una ganancia de 0.66 dB el cual cumple con los criterios de aceptación según la norma AWS D1.1.</p>
<b>Probeta 3</b>		



\*Defectos ejemplo, fuente [22]

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba, se puede determinar que la probeta número uno es la que presenta mejores condiciones según los espectros evaluados en la prueba de ultrasonido, al no encontrarse ninguna discontinuidad a lo largo del cordón de soldadura. La velocidad de avance más alta para esta prueba, mostro que no se presentan defectos como escoria que son producidos por altas deposiciones de material de aporte, al usar bajas velocidades de avance en la aplicación de la soldadura.

Las especificaciones para la aplicación de la prueba fueron las siguientes:

<b>Ganancia</b>	54.3 d.B
<b>Velocidad</b>	2876 m/s
<b>Cero</b>	12805 $\mu$ s
<b>Angulo</b>	45,6°
<b>Frecuencia</b>	1,75 MHz
<b>PHR</b>	445 Hz
<b>Energia</b>	100V
<b>Rango</b>	70
<b>Modo</b>	Pulso-Eco
<b>Espesor</b>	0

**Tabla 21.** Especificaciones ultrasonido

## 2.13 Simulación del espectro de difracción de rayos x y la estructura cristalina del acero

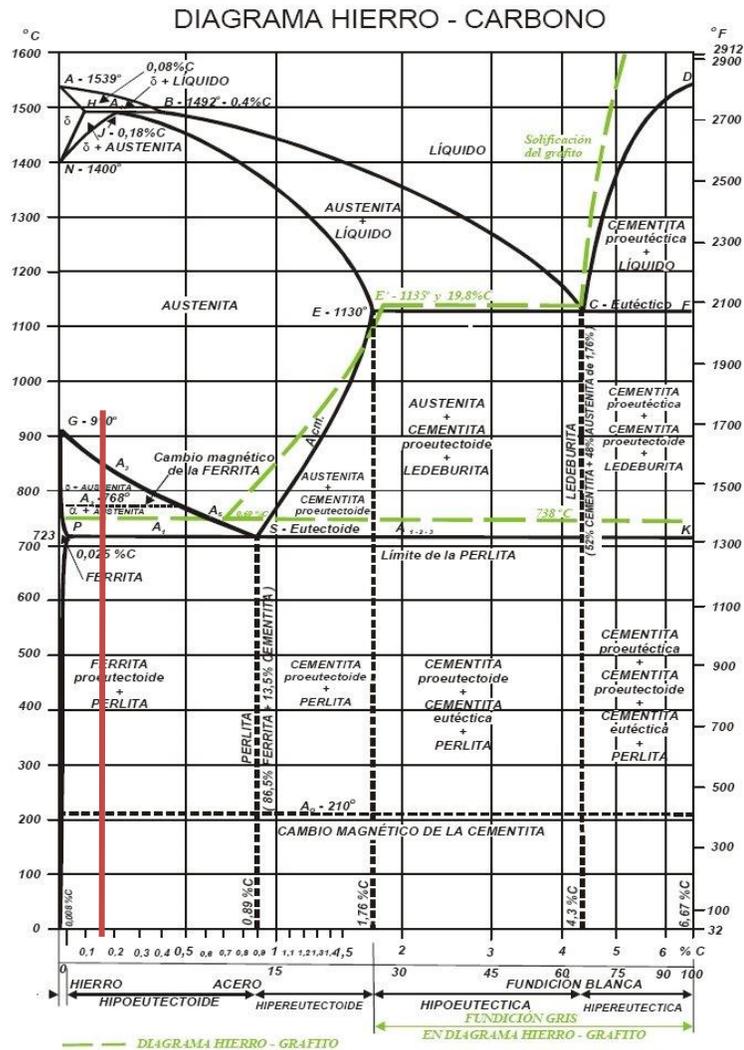
En esta sección se presentan los resultados del proceso de simulación de la estructura cristalina del material base de trabajo, para el análisis estructural del acero se debe tener en consideración que este material tiene una aleación de hierro mínimo del 98%, con contenidos de Carbono menores a 1% y otras cantidades de minerales como magnesio, cromo, fosforo etc.

La siguiente tabla muestra la composición química del acero A572, datos obtenidos tras una prueba de espectroscopia de masa [23].

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA EN % DEL ACERO ASTM A572 GR 50</b>			
Fe	98,091	Co	0,006
Si	0,204	B	0,0002
Mo	0,014	P	0,004
Al	0,027	Cr	0,347
C	0,167	Ti	0,001
Cu	0,009	Pb	0,011
W	0,01	S	0,003
Mn	1,056	Sn	0,001
Ni	0,017	Mg	0

**Tabla 22.** Composición química del acero A572. [23]

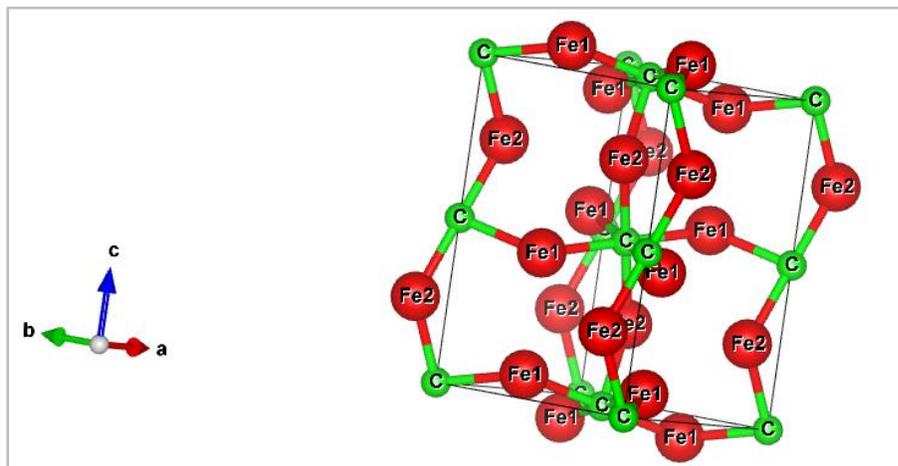
De acuerdo al diagrama de hierro-carbono podemos determinar las fases en la que se encuentra el acero A572 el cual se muestra en la siguiente imagen:



Gráfica 44. Diagrama hierro-carbono [23].

El acero A572 al tener una composición de carbono en un intervalo de 0.008% y 0.89% (0,16% C), se clasifica como acero hipoeutectoide, que a su vez está formado por una mezcla de ferrita más perlita.

Se realizó la simulación del compuesto  $\text{Fe}_3\text{C}$ , el cual se extrajo de las tablas internacionales de cristalografía, teniendo como precedente que el compuesto a analizar es la cementita o carburo de hierro, que es un constituyente de acero. Por medio del software VESTA, se generó la siguiente estructura y resultados, donde se observan los átomos de Fe en rojo y átomos de C en verde:



**Grafica 45.** Estructura tridimensional  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Fuente propia

Resultados obtenidos de la simulación en software VESTA:

- Tipo de celosía:

Lattice type P

- Nombre del grupo espacial:

Space group name P b n m

- Número de grupo espacial:

Space group number 62

- Número de configuración:

Setting number 3

- Parametros de red:

Lattice parameters

a	b	c	alpha	beta	gamma
4.51800	5.06900	6.73600	90.0000	90.0000	90.0000

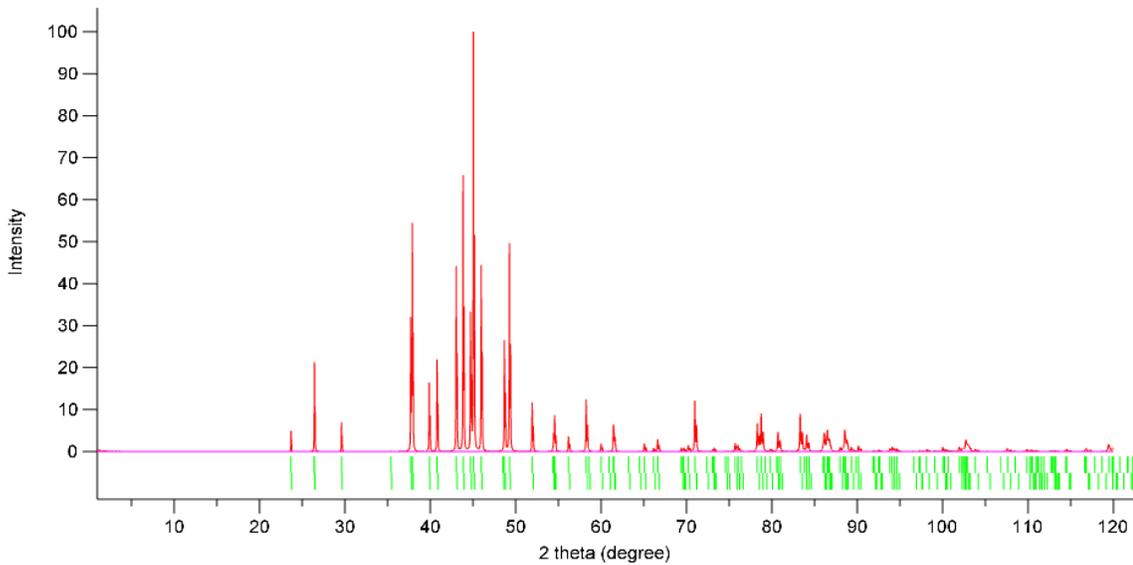
- Volumen de celda Unitaria

Unit-cell volume = 154.266133 Å<sup>3</sup>

- Parametros de estructura:

Structure parameters

		x	y	z	Occ.	B	Site	Sym.	
1	Fe	Fe1	0.34000	0.17000	0.06500	1.000	1.000	8d	1
2	Fe	Fe2	-0.16000	0.05000	0.25000	1.000	1.000	4c	.m.
3	C	C1	0.00000	0.00000	0.00000	1.000	1.000	4a	-1



**Grafica 46.** Patrón de difracción Fe<sub>3</sub>C. Fuente propia

Number of polygons and unique vertices on isosurface = 0 (0)  
 37 atoms, 44 bonds, 0 polyhedra; CPU time = 50 ms

	a1	a2	a3	a4	a5	c
	b1	b2	b3	b4	b5	bc
Fe:	12.311098	1.876623	3.066177	2.070451	6.975185	-0.304931

	5.009415	0.014461	18.743041	82.767874	0.346506	9.450000
C:	2.657506	1.078079	1.490909	-4.241070	0.713791	4.297983
	14.780758	0.776775	42.086843	-0.000294	0.239535	6.646000

- Coeficiente de dispersión de rayos x:

X-ray dispersion coefficients for  $\lambda = 0.154059 \text{ nm}$

	$f'$	$f''$	$f_{\text{NT}}$	$\mu/\rho \text{ (cm}^2/\text{g)}$
Fe:	-1.22967E+000,	3.18044E+000,	-6.64030E-003,	3.00096E+002
C:	1.77875E-002,	9.05508E-003,	-1.64420E-003,	4.30679E+000

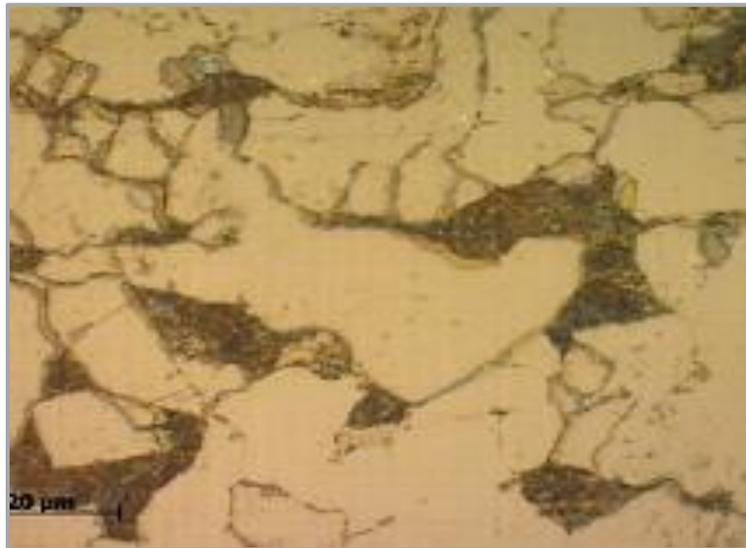
- Resultados de los ángulos de difracción y distancias interplanares:

Conditions		Reflections	Plot										
No.	h	k	l	d (Å)	F(real)	F(imag)	F	2 $\theta$	I	M	$\lambda$	Phase	
1	1	0	1	3.75216	14.4723	2.17065	14.6342	23.6934	3.3831	4	1	1	
2	1	0	1	3.75216	14.4581	2.17838	14.6213	23.7516	1.6799	4	2	1	
3	1	1	0	3.37275	16.5013	-0.0477151	16.5014	26.4695	1.7036	4	2	1	
4	1	1	0	3.37275	16.5005	-0.0475952	16.5005	26.4044	3.4246	4	1	1	
5	0	0	2	3.36800	46.8391	4.62861	47.0673	26.4423	13.8898	2	1	1	
6	0	0	2	3.36800	46.8094	4.64514	47.0393	26.5075	6.9006	2	2	1	
7	1	1	1	3.01583	16.1366	2.57586	16.3409	29.67	2.6209	8	2	1	
8	1	1	1	3.01583	16.1533	2.56672	16.356	29.5967	5.2794	8	1	1	
9	0	2	0	2.53450	-5.2125	-3.17883	6.10533	35.3869	0.1249	2	1	1	
10	0	2	0	2.53450	-5.19121	-3.1901	6.09306	35.4755	0.0619	2	2	1	
11	1	1	2	2.38321	-47.8628	-10.4716	48.9949	37.7152	27.9816	8	1	1	
12	1	1	2	2.38321	-47.7939	-10.5089	48.9356	37.81	13.8798	8	2	1	
13	0	2	1	2.37214	-88.7035	-15.3683	90.025	37.9933	23.2377	4	2	1	
14	0	2	1	2.37214	-88.8035	-15.3138	90.1143	37.898	46.8267	4	1	1	
15	2	0	0	2.25900	-75.4324	-15.4386	76.9961	39.8744	15.2719	2	1	1	
16	2	0	0	2.25900	-75.331	-15.4935	76.9078	39.9751	7.5759	2	2	1	
17	1	2	0	2.21044	-63.3007	-11.235	64.29	40.7888	20.2463	4	1	1	
18	1	2	0	2.21044	-63.2273	-11.275	64.2247	40.892	10.0459	4	2	1	
19	1	2	1	2.10025	69.0298	12.5308	70.1579	43.0323	42.7765	8	1	1	
20	1	2	1	2.10025	68.948	12.5754	70.0854	43.1418	21.2226	8	2	1	
21	2	1	0	2.06338	122.277	22.3781	124.308	43.8408	64.3938	4	1	1	
22	2	1	0	2.06338	122.131	22.4577	124.178	43.9525	31.9464	4	2	1	
23	0	2	2	2.02514	-88.7219	-18.4302	90.6159	44.7127	32.7333	4	1	1	

**Grafica 47.** Tabla de resultados de distancias interplanares y ángulos de difracción.  
Fuente propia

La presencia de elementos de aleación: Cr, Ni, Mo, W, etc. no se puede determinar en el examen microscópico, porque las estructuras perlíticas, martensítica, etc. son iguales en un acero al carbono o en aceros aleados.

En el estudio realizado por Alonso Domínguez [24] se examinó la microestructura del acero ASTM A 572 Grado 50, de acuerdo a los resultados obtenidos, se estableció que el material en estado base está constituido por una estructura Ferrítico - Perlitica. En la gráfica 48 se pueden evidenciar las dos fases que componen este acero, fase A (zona oscura) y fase B (zona clara), las zonas oscuras corresponden a estructuras perlíticas y las zonas más claras a la ferrita.



**Grafica 48.** Metalografía acero A572. Aumento 1000x [24]

### 3. Conclusiones

- La soldadura de tipo flux Cored permite usar velocidades de avance mayores a otras técnicas de soldadura, genera mayores tasas de deposición y mejor apariencia en los cordones de soldadura.
- Según los datos obtenidos a menores velocidades de deposición, se presentan mayores defectos en la soldadura, debido a que las altas tasas de deposición generan un mayor volumen en el charco fundido, razón por la cual se presenta excesos de material e indicaciones.
- Se observa que al usar altos valores de corriente en la aplicación de la soldadura, aumenta la dureza de la unión soldada, por tanto el material se comporta de manera más frágil ante la aplicación de carga.
- Los resultados permiten observar que al usar la mayor velocidad de avance en la aplicación de la soldadura, se produce una disminución en los valores de ancho de cordón, penetración y sobremonta. El incremento de la potencia eléctrica genera aumentos en el ancho de cordón y la penetración de la soldadura.
- Los resultados permiten observar que la velocidad de avance está relacionada proporcionalmente al módulo de elasticidad calculado, al aplicar la soldadura con una mayor velocidad se obtiene un mayor módulo de elasticidad en el material sometido a la prueba.
- Con los resultados obtenidos en la prueba de microdureza, se observa que la variación de la dureza no es significativamente susceptible a los cambios de corriente durante la aplicación de soldadura, ya que las diferencias están alrededor del 4% entre los valores calculados para las tres variaciones de corriente.

- Las propiedades mecánicas del acero se pueden ver afectadas al momento de producir una soldadura, en la zona afectada por el calor y sus alrededores, dado que si bien los tiempos de exposición a altas temperaturas son relativamente cortos en su periodo de calentamiento, las temperaturas alcanzadas tanto por el arco eléctrico como por el charco de soldadura, son lo bastante elevadas para hacer que la microestructura del acero cambie.

**ANEXOS**

Anexo A. Procedimiento de inspección por líquidos penetrantes

Anexo B. Procedimiento de inspección por partículas magnéticas

Anexo C. Procedimiento de inspección por ultrasonido

Anexo D. WPS Y PQR FCAW 3G T04F

Anexo E. Reporte de examinación con líquidos penetrantes

Anexo F. Reporte Partículas Magnéticas V.8

Anexo G. Criterios de aceptación

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ESAB. (2019). CENTRO DE CONOCIMIENTO ESAB. Obtenido de Proceso de Soldadura FCAW: Obtenido de <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-fcaw-alambre-tubular-relleno-de-fundente-definiciones-del-proceso.cfm>
- [2] Metalurgia. (Septiembre de 2007). Blogspot. Obtenido de <http://metalurgia-metalurgia.blogspot.com/2007/09/soldadura-por-arco-con-nucleo-de.html>
- [3] Herrera, I. A. (2016). Soldadura y Estructuras. Recuperado el 5 de Marzo de 2019, de <http://soldadurayestructuras.com/proceso-fcaw.html>
- [4] Pacheco, J. D. (2014). ESTUDIO COMPARATIVO DE ALAMBRES TUBULARES METAL CORED Y TUBULARES FLUX CORED EN PROCESOS DE SOLDADURA SEMIAUTOMÁTICOS. Bogotá. Recuperado el 3 de Marzo de 2019
- [5] Soldexa. (2019). ESAB. Recuperado el 15 de Octubre de 2019 de <https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/index.cfm>
- [6] Cano, H. B. (2019). Supervisión de Estructuras de Concreto y de Acero. Recuperado el 6 de Marzo de 2019, de <https://sites.google.com/site/construyetuingenio2013/5-procesos-de-soldadura-y-corte/5-4-soldadura-por-arco-con-nucleo-de-fundente-fcaw>
- [7] American Welding Society. (2015). Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding. United States of America: American Welding Society. Recuperado el 5 de Marzo de 2019
- [8] Moreno, Carlos. Soldadura y robótica. (2012). Gases de protección para soldadura MIG-MAG-GMAW. Recuperado el 20 de Mayo de 2020 de <https://www.josecarlosmoreno.com/copia-de-mig-mag-gmaw-tipos-de-arco>
- [9] Ribas José. (2010). Técnicas de soldadura y gases de protección. Recuperado el 10 de Abril de 2020 de <https://dissenyproducte.blogspot.com/2016/05/tecnicas-de-soldadura-y-gases-de.html>
- [10] ASTM A572-GR50. (8 de Mayo de 2018). Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural. A572/A572M. Recuperado el 10 de Marzo de 2019
- [11] Canelo, Carlos. Ensayo a tracción del acero 1045. Recuperado el 10 de Junio 2020 de [https://www.researchgate.net/publication/331310934\\_Ensayo\\_a\\_traccion\\_de\\_acero\\_1045](https://www.researchgate.net/publication/331310934_Ensayo_a_traccion_de_acero_1045)
- [12] García Romero, introducción a la ciencia de los materiales y sus propiedades (I). 2018. Universidad de País Vasco. Recuperado el 5 de Junio de 2020, de

[https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/17292/mod\\_resource/content/0/Tema%207Rotura%20y%20fallo%20mec%C3%A1nico%20de%20los%20materiales.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/17292/mod_resource/content/0/Tema%207Rotura%20y%20fallo%20mec%C3%A1nico%20de%20los%20materiales.pdf)

[13] Ensayo de microdureza. Recuperado el 10 de mayo de 2020 de <https://matensayos.webcindario.com/ensayos/microdurezas.htm>

[14] FRADE, Rubén. Propiedades físico-mecánicas de los materiales. Recuperado el 20 de noviembre de 2019 de [fradeblogs.wordpress.com/2013/11/21/propiedades-fisico-mecanicas-de-los-materiales/](http://fradeblogs.wordpress.com/2013/11/21/propiedades-fisico-mecanicas-de-los-materiales/).

[15] Metfusion. (2013) Discontinuidades internas. Recuperado el 20 de Mayo de 2020 de <https://metfusion.wordpress.com/2013/08/10/imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades/>.

[16] AEND. Ensayos no destructivos partículas magnéticas. Fundación Confametal. Recuperado el 25 de Mayo de 2020.

[17] Barrera, Lizeth. (2011). Desarrollo y procedimientos para la utilización de técnicas de ensayos no destructivos con ultrasonido para la inspección de tuberías. Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado el 20 de Mayo de 2020 de [http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital\\_21062.pdf](http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_21062.pdf)

[18] Textos científicos. (2020). El acero. Recuperado el 30 de abril de 2020 de <https://www.textoscientificos.com/quimica/acero>

[19] Hernández, Yodi. (2018). Estudio de la soldabilidad del acero estructural ASTM A572 grado 50 con proceso SMAW. Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia. Recuperado el 10 de Mayo de 2020 de [https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3046/1/TGT\\_1630.pdf](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3046/1/TGT_1630.pdf)

[20] AEISA. 2019. Líquidos penetrantes. Recuperado el 10 de mayo de 2020 de <https://www.aeisa.com.mx/liquididos-penetrantes-todo-lo-que-quieres-saber-sobre-esta-prueba-no-destructiva/>

[21] Metfusion. 2013. Imperfecciones en la soldadura tipos de discontinuidades. Recuperado el 10 de mayo de 2020 de <https://metfusion.wordpress.com/2013/08/10/imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades/>

[22] Romero Bernardo, Proboste Felipe. 2013. Aplicación de ultrasonido al control de calidad de procedo de soldadura. Universidad del BIO BIO. Facultad de ingeniería, recuperado el 20 de mayo de 2020 de [http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero\\_Reyes\\_Bernardo.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf)

[23] Universidad Tecnológica de Pereira. Metalografía. (2020) Recuperado el 20 de mayo de 2020, de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/5-diagrama-hierro-carbono/>

[24] Domínguez, Alonso. (2017) Caracterización microestructural de un acero de bajo carbono y contenido de manganeso cercanos al 1.5%, templado a temperaturas intercríticas y revenido. Bogotá. Recuperado el 30 de Mayo de 2020 de <http://www.crystallography.net/cod/result.php>