

**ANÁLISIS DE SOLDABILIDAD DEL ACERO ESTRUCTURAL ASTM A572  
GRADO 50 CON EL PROCESO DESOLDEO AL ARCO ELÉCTRICO CON  
ELECTRODO TUBULAR AUTOPROTEGIDO (FCAW-S) Y COMPARARLA CON  
EL PROCESO DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO METÁLICO  
REVESTIDO (SMAW)**

**MANUEL ALFREDO SÁNCHEZ OSORIO  
EDWIN EDUARDO RINCÓN REINA**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTA  
2017**

**ANÁLISIS DE SOLDABILIDAD DEL ACERO ESTRUCTURAL ASTM A572 GRADO 50 CON EL PROCESO DESOLDEO AL ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO TUBULAR AUTOPROTEGIDO (FCAW-S) Y COMPARARLA CON EL PROCESO DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO METÁLICO REVESTIDO (SMAW)**

**MANUEL ALFREDO SÁNCHEZ OSORIO**

**EDWIN EDUARDO RINCÓN REINA**

**TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**ASESOR**

**JOSE DAVID CASTRO CASTRO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**BOGOTA**

**2017**

## Agradecimientos

Manuel Alfredo Sánchez Osorio

Agradezco a mis padres Manuel Alfredo Sánchez Gómez y Blanca Livia Osorio Rivera, que con todo su esfuerzo y apoyo me sacaron adelante.

A mis hermanas, Leidy Alejandra Sánchez Osorio y Yeimi Smith Sánchez Osorio, que me alentaban durante todas las adversidades a lo largo de la carrera.

A todos los que hicieron parte del desarrollo del proyecto de grado como a mi compañero Edwin Eduardo Rincón Reina.

Edwin Eduardo Rincón Reina

Agradezco profundamente a mi grupo familiar por esos grandes aportes que durante todo mi proceso académico me brindaron cada uno de ustedes. Gracias inmensas

Finalmente a todas las personas que se me escapan en este momento y que estuvieron conmigo durante el tiempo de formación profesional.

Agradecemos todos los que hicieron parte del desarrollo de este proyecto, como lo fueron Tecnoestructuras Welding SAS, Lincoln Electric, Hivo Alfonso Patorroyo Pulido experto temático y Jose David Castro director de proyecto.

## **INTRODUCCION**

Actualmente, la industria ha implementado una gran variedad de materiales para hacer realidad las ambiciones de la humanidad. En el sector de la construcción, históricamente se implementado los metales como fundamento en las edificaciones, lo que ha impulsado el desarrollo del sector inmobiliario hasta nuestros días. En la búsqueda de optar por metales que tienen mejores propiedades mecánicas para la construcción, el acero ASTM A 572 se ha venido ampliamente utilizando por sus buenas prestaciones en cuanto a sus propiedades mecánicas como en cuanto a costos. Basándonos en este hecho, la presente investigación se basa en el análisis de soldabilidad del acero estructural ASTM A 572 grado 50 con el proceso de soldeo al arco eléctrico con electrodo tubular auto protegido (FCAW-S) y compararla con el proceso de soldadura al arco con electrodo metálico revestido (SMAW). De acuerdo con esto, se pretende realizar un análisis del rendimiento en producción y la optimización de tiempos y costos en el montaje de una estructura metálica desde el punto de vista de la soldadura. Para hacer este análisis, se ha propuesto dos procesos de soldadura, uno manual y otro semiautomático. Estos fueron: Shield metal Arc Welding o SMAW y Flux Cored Arc Welding – Self o FCAW – S. la posición a soldar elegida en el proceso comparativo fue una posición 3F (vertical ascendente), la cual es muy común de encontrar en los ensambles de estructuras metálicas.

Para el desarrollo de este proyecto de tesis, se trabajará con las indicaciones que nos entrega la norma NSR 2010 que nos remite al código AWS D1.1 donde se indican las especificaciones de las juntas a soldar.

## **PALABRAS CLAVES**

NSR, AWS, WPS, PQR, SMAW, FCAW – S, MATERIAL BASE, MATERIAL DE APORTE, ASTM, SOLDADURA

## **ABSTRACT**

Actually, the industry has implemented a variety of materials to realize the ambitions of humanity. In the construction sector, metals have historically been implemented as a foundation in buildings, which has boosted the development of the real estate sector to this day. In the quest for metals that have better mechanical properties for construction, ASTM A572 steel has been widely used for its good performance in terms of mechanical properties as well as costs. Based on this fact, the present research is based on the welding analysis of structural steel ASTM A 572 grade 50 with the arc welding process with the self-protected tubular electrode (FCAW-S) and the process of arc welding with the coated metal electrode SMAW). Accordingly, an analysis of the performance in the production and the optimization of the times and the costs in the construction of a metallic structure from the point of view of the welding are carried out. To do this proposed sea analysis of the welding processes one manual and another semi-automatic. Like the son; Shield metal arc welding or SMAW and the process Flux Cored arc welding Self, FCAW-S. The welding position chosen in the comparative process was a 3F (vertical ascending) position, which is very common to find in the assemblies of metallic structures.

For the development of this thesis project, we will work with the indications that do not deliver the NSR 2010 standard that does not refer us to the AWS code D1.1 where it does not indicate the specifications of the joint a weld.

## **KEYWORDS**

NSR, AWS, WPS, PQR, SMAW, FCAW - S, MATERIAL BASE, MATERIAL SUPPORT, ASTM, WELDING.

## CONTENIDO

GLOSARIO.....	9
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	10
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	11
JUSTIFICACIÓN .....	12
OBJETIVOS .....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
1. MARCO TEÓRICO. ....	14
1.1 LÍNEA HISTÓRICA .....	14
1.2 PROCESO DE SOLDADURA .....	15
1.3 TIPOS DE JUNTAS Y POSICIONES DE SOLDEO .....	16
1.4 PRECALENTAMIENTO .....	17
1.5 TIPO DE SOLDADURAS .....	18
1.5.1 Soldadura por presión .....	18
1.5.2 Soldadura por Fusión.....	19
1.6 PROCESO DE SOLDADURA SMAW.....	19
1.6.1 Diagrama esquemático del equipo SMAW .....	19
1.6.2 Ventajas de SMAW. ....	20
1.6.3 Desventajas de SMAW. ....	20
1.7 PROCESO DE SOLDADURA FLUX CORED METAL ARC WELDING SELF SHIELD (FCAW-S).....	21
1.7.1 Ventajas de FCAW-S. ....	22
1.7.2 Desventajas de FCAW-S. ....	22
1.8 POLARIDAD. ....	22
1.9 MATERIAL DE APORTE. ....	23
1.9.1 Electrodo.....	23
1.9.1.1 Clasificación. ....	23
1.9.1.2 Fundentes de un electrodo.....	24
1.9.1.3 Electrodo AWS E7018 .....	24
1.9.1.4 Electrodo AWS E71T-11 .....	25

1.10	DISCONTINUIDAD DE UNA SOLDADURA. ....	26
1.10.1	Causas de discontinuidades .....	26
1.11	ACERO ESTRUCTURAL ASTM A572 GRADO 50. ....	26
1.11.1	Límite de elasticidad. ....	27
1.11.2	Resistencia a la tracción.....	27
1.12	METALOGRAFIA. ....	27
1.12.1	Micrografía. ....	28
1.12.2	Macrografía. ....	28
2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL. ....	29
2.1	Preparación de probetas.....	30
2.2	Pruebas de caracterización .....	32
2.2.1	Ensayo de Macro-ataque .....	32
2.2.2	Ensayo de Microataque.....	33
2.2.3	Prueba de Dureza. ....	33
2.2.4	Dilución .....	33
3	ENSAYOS, ANALISIS Y RESULTADOS .....	34
3.1	Caracterización del material base (ASTM A572 grado 50) .....	34
3.2	Caracterización del material con proceso de soldeo FCAW-S.....	35
3.3	Caracterización del material con proceso de soldeo SMAW .....	38
4	FACTOR ECONÓMICO .....	43
4.1	Ecuaciones para hallar costos .....	43
4.1.1	Área de sección transversal.....	43
4.1.2	Peso de metal depositado. ....	43
4.1.3	Tasa de depósito .....	43
4.1.4	Tiempo de arco .....	44
4.1.5	Costo mano de obra.....	44
4.1.6	Costo del electrodo .....	44
4.2	Solución de ecuaciones y análisis de resultados.....	44
	CONCLUSIONES .....	46
	RECOMENDACIONES.....	47

**BIBLIOGRAFÍA.....48**  
**ANEXOS.....50**

## GLOSARIO

- **ACERO ESTRUCTURAL:** Se define como el resultado que se obtiene al combinar hierro, carbono y pequeños porcentajes de otros elementos como son silicio, manganeso, cobre, azufre, fósforo entre otros el cual permite un conjunto de propiedades determinadas, utilizado comúnmente para la industria de la construcción.
- **ASTM:** American Society for Testing and Materials; Sociedad Americana de Pruebas y Materiales.
- **AWS:** American Welding Society; Sociedad Americana de Soldadura.
- **DUREZA:** Grado de resistencia que opone un mineral a ser rayado por otro.
- **EPP:** Elementos de Protección Personal.
- **FILETE:** Soldadura de una sección aproximadamente triangular, uniendo dos superficies que están relativamente en ángulo recto una de otra, en uniones sobrepuestas, en "T" o esquinas.
- **FCAW - S:** Es un proceso de soldadura semiautomático que usa un electrodo tubular auto protegido el cual produce un blindaje para proteger el arco de los contaminantes en el acero
- **OSHA:** Occupational Safety and Health Administration; Administración de Seguridad y Salud Ocupacional. Departamento que tiene como responsabilidad la protección de la seguridad y salud de los trabajadores.
- **PQR:** Procedure Qualification Record; Registro de Calificación del Procedimiento.
- **SMAW:** (Shield Metal Arc Welding) proceso de soldadura en el cual se unen dos metales mediante fusión producida por un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo metálico cubierto.
- **SOLDADURA:** Es un proceso de unión que produce la fusión granular del material por calentamiento a la temperatura de soldadura con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso de metal de relleno.
- **WPQ:** Welder Performance Qualification; Procedimiento de Calificación del as Habilidades del Soldador.
- **WPS:** Welding Procedure Specification; Especificación del Procedimiento de Soldadura.
- **ZAC:** Zona Afectada por el Calor.

## **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

En la industria colombiana de la construcción civil, específicamente en el área de las estructuras metálicas, se viene trabajando el acero ASTM A572 grado 50. El proceso de soldadura más usado en dicha industria es el proceso de soldeo por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). Sin embargo, hay procesos de soldeo que se han venido implementando de manera reciente como lo es el proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo tubular auto protegido (FCAW-S) que es semiautomático, lo que permite ahorrar tiempo en la ejecución de los proyectos de ingeniería. Aunque en comparación de costos de los equipos y precios de los materiales de aporte son muy diferentes, siendo el FCAW-S más costoso, no se tiene documentación en cuanto a si la implementación del proceso de soldeo FCAW-S afecta las propiedades fisicoquímicas del material. Por ello, se requiere la comparación de estos procesos cumpliendo el código de soldadura AWS D1.1 y comparando las microestructuras del acero ASTM A512 grado 50, así como su dureza.

## **PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Las uniones soldadas configuradas en una junta en T con el acero ASTM A572 grado 50 espesor de 9mm en una posición 3F (vertical ascendente) sin ningún tipo de bisel soldadas con los procesos FCAW-S y SMAW y caracterizadas de acuerdo a los requisitos normativos del código de soldadura estructural AWS D1.1, pueden poseer características similares en cuanto a sus propiedades mecánicas y metalúrgicas?

## **JUSTIFICACIÓN**

Según compañías reconocidas en el sector de la soldadura (Lincoln electric, West Arco, entre otras), el proceso de soldadura predominante en el país es SMAW por más del 90%. El cual, está siendo aplicado en las uniones estructurales de aceros ASTM A 572 grado 50. Este acero ha remplazado al acero estructural ASTM A36 en aplicaciones de tipo estructural (edificios y grandes superficies).

Esta investigación analizará la soldabilidad del acero ASTM A572 Grado 50, utilizando los procesos de soldadura antes mencionados, con el fin de caracterizar y comparar propiedades mecánicas y metalográficas, como también los costos que generan cada uno de estos.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar la soldabilidad del acero estructural ASTM A 572 grado 50 con el proceso de soldeo al arco eléctrico con electrodo tubular auto protegido (FCAW-S) y compararla con el proceso de soldadura al arco con electrodo metálico revestido (SMAW).

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar juntas soldadas con el procedimiento que indica la norma AWS D1.1. para los procesos de soldadura FCAW-S y SMAW con el acero ASTM A572 grado 50.
2. Caracterizar la junta soldada por el procedimiento FCAW-S y SMAW por medio de ensayos de micrografía, macrografía, dureza y dilución.
3. Comparar los resultados de las uniones soldadas con procesos FCAW -S y SMAW.

# 1. MARCO TEÓRICO.

## 1.1 LÍNEA HISTÓRICA

La soldadura como procedimiento para la unión de materiales metálicos se remonta a la edad de bronce, donde se encuentran los primeros rastros de procesos de soldadura utilizados para fines de ornamentación.

De la edad de hierro, se han encontrado piezas de hierro forjado las cuales habrían sido unidas calentándolas y martillándolas juntas, dando origen a la soldadura por forjado.

En la Edad Media, la soldadura en fase sólida se utilizaba para reducir el mineral de hierro a hierro metálico sin necesidad de fundirlo. Sin embargo, el problema de unir chapa fue solucionado por la soldadura por fusión, en la cual se cuenta con una fuente de calor suficientemente intensa como para fundir los bordes de dos chapas a unir y este calor es desplazado a lo largo de la junta[1].

Fuentes de calor suficientemente intensas estuvieron disponibles a escala industrial al final del siglo XIX, cuando hicieron su aparición la soldadura oxi-gas, la soldadura por arco eléctrico y la soldadura por resistencia.

La soldadura por arco eléctrico con electrodo consumible, el más importante de los procesos de soldadura por fusión a día de hoy, tuvo un desarrollo más lento debido a su complejidad en la aplicación. Inicialmente, se utilizaron electrodos de alambre desnudo pero el metal de soldadura resultante contenía alto nitrógeno que le confería fragilidad. Recubriendo el alambre con asbestos o papel, se mejoraron las propiedades de los depósitos soldados. La factibilidad de este proceso surge del descubrimiento de Sir Humphry Davy en 1809, según el cual la electricidad puede ser conducida a través del aire entre dos electrodos de carbono (grafito) conformando lo que hoy conocemos como descarga gaseosa. Posteriormente en 1885, Bernados y Olszewski patentaron un proceso donde era posible reproducir este fenómeno entre un electrodo de carbono y una pieza metálica. Como consecuencia del calor generado, se logra una fusión localizada que puede ser utilizada para unir piezas. Sin embargo, se encontró necesario aportar metal adicional para llenar el hueco existente entre las dos chapas a unir a través de una varilla hundida dentro de la pileta líquida[1].

En 1892, Slawianoff encontró que, si la varilla de aporte fuera usada como cátodo en lugar del electrodo de carbono, ésta se fundiría por el calor generado en el cátodo y una mayor proporción del calor disipado en el arco eléctrico entraría a la soldadura. Sin embargo, las soldaduras producidas por esta técnica eran de muy baja calidad debido a la reacción del metal fundido con la atmósfera del arco a alta temperatura. En este sentido, parece haber sido fortuito el éxito de la soldadura por arco con electrodo de carbono, ya que, al establecerse el arco, generaba una

atmósfera de CO<sub>2</sub> y CO, que protegía la pileta líquida del aire, rico en oxígeno y nitrógeno[1].

Esto llevó a la idea de aplicar recubrimientos protectores al electrodo, siendo las primeras patentes en 1907 adjudicadas al sueco O. Kjellberg. Posteriormente fue quien fundó la empresa ESAB. Una técnica inicial, fue desarrollada en Gran Bretaña utilizando una tela impregnada con asbestos alrededor del alambre metálico produciendo una mejor protección contra la contaminación. En Estados Unidos, fue necesario utilizar esta técnica de soldeo para la Primera Guerra Mundial. Sin embargo, no se contaba con asbestos por lo que fue necesario usar fibras de algodón impregnadas en silicato de sodio húmedo como sustituto. Este revestimiento era capaz de estabilizar el arco, crear una atmósfera protectora del aire y la escoria, que son los principales requerimientos de un revestimiento moderno. De hecho, los electrodos celulósicos se siguen utilizando hasta la actualidad[1].

Así, la soldadura adquiría una posición de importancia en la construcción de estructuras de ingeniería. Esta tendencia ha continuado y desde la invención, en 1943, del proceso de soldadura con protección por gas inerte los procesos de soldadura que se han desarrollado y multiplicado a una gran velocidad, dando como resultado que la gran mayoría de los materiales metálicos utilizados actualmente en la industria puedan ser soldados por algunos de los procesos de soldadura existentes[1].

A partir de la década de los 70, la investigación en soldadura comenzó a realizarse de forma más sistemática, encarando temas fundamentales para la investigación y el desarrollo de la soldadura en forma extensa a través de programas de investigación. Este nuevo enfoque en la forma de trabajo de los investigadores fue fundamentalmente liderado por los trabajos de Evans en relación con las variables del proceso, W. Savage en solidificación y otros, junto con aportes importantes realizados por las comisiones del Instituto Internacional de Soldadura (IIW) y por The Welding Institute (TWI)[1].

## **1.2 PROCESO DE SOLDADURA**

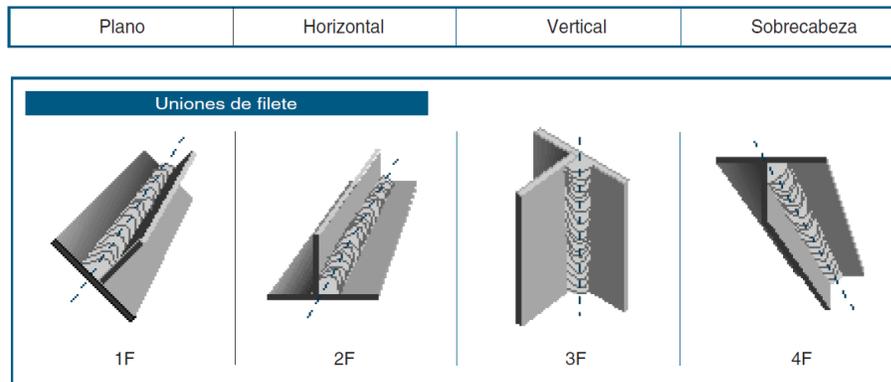
La soldadura es un proceso de unión de dos materiales o más por medio de la aplicación de energía térmica aportando o no, material nuevo para darle continuidad a esos elementos unidos. Para lograr este proceso, se debe eliminar la capa de óxido y de humedad de los materiales que se quieren unir[2].

Los efectos de la suministración de calor en cuanto a las características del material de aportación, pueden ser perjudiciales para los elementos que se quieren unir, produciendo defectos como deformaciones, porosidades, grietas entre el metal base y el metal de aporte, zonas duras y quebradizas y discontinuidades. Para evitar estos defectos, se debe hacer un previo estudio de

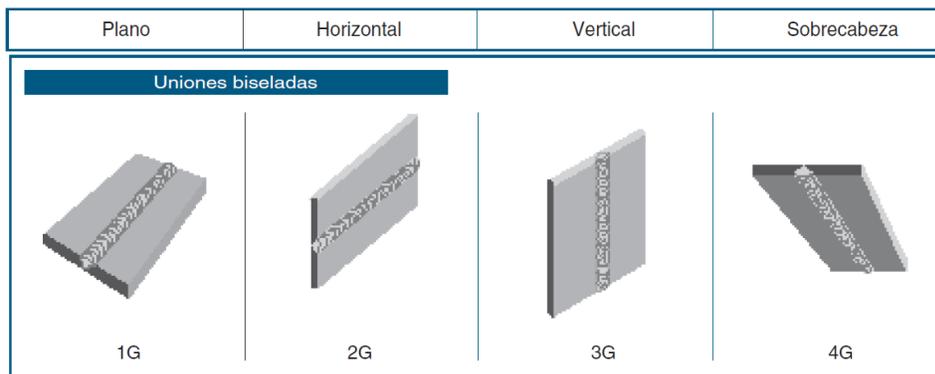
los electrodos a usar donde los elementos de aleación sean los correctos, sujetar los metales a unir y a veces, se realizan precalentamientos o tratamientos térmicos[2].

### 1.3 TIPOS DE JUNTAS Y POSICIONES DE SOLDEO

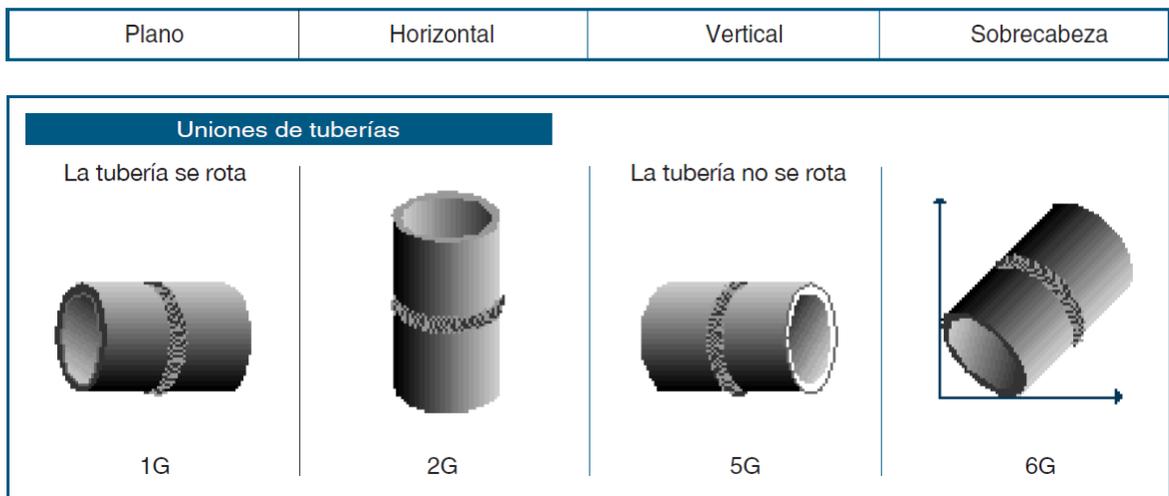
Existen varios tipos de posiciones a la hora de realizar cualquier proceso de soldadura y según lo requiera la pieza a soldar, así como también varios tipos de juntas.



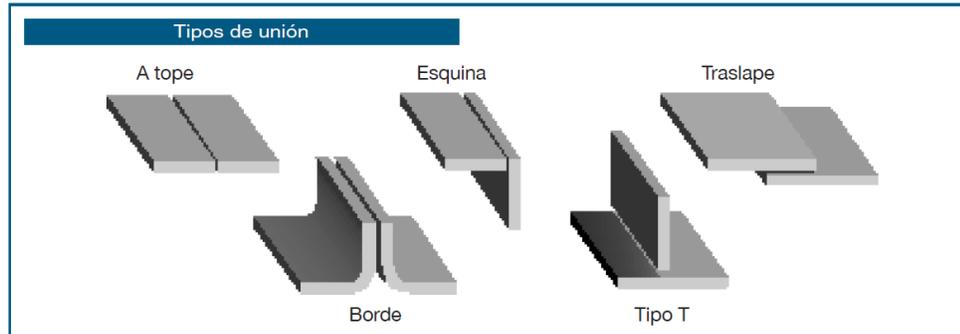
**Figura 1.** Uniones en filete[3]. Las uniones en filete, también llamados juntas en filete, en este caso según lo muestra la figura 1, son las más usadas, casi en un 80%, en proyectos de construcción con estructuras metálicas, el otro 20% en juntas a tope como se puede observar en la figura 2.



**Figura 2.** Uniones biseladas [3].



**Figura 3.** Uniones en tuberías [3]



**Figura 4.** Tipos de juntas [3].

También, existen aplicaciones de soldadura en tuberías de metal, como en el caso de la industria petroquímica y soldadura de juntas según se necesite. Ejemplos de esto, se muestran en las figuras 3 y 4 respectivamente.

#### 1.4 PRECALENTAMIENTO

El principio de aplicar calor hasta alcanzar una cierta temperatura y luego mantenerla como un mínimo, se usa para controlar la tasa de enfriamiento del metal de soldadura y del metal adyacente. Las temperaturas altas permiten una difusión más rápida del hidrogeno y reduce la tendencia de fisuración en frío.

Antes de realizar cualquier proceso de soldadura, se recomienda realizar una breve preparación de los materiales a soldar, entre ellos, el precalentamiento debido, según el código AWS D1.1, y estudios que se han realizado, sin dejar atrás la experiencia, recomiendan una serie de temperaturas para cada acero (Ver Anexo 4).

Existe una gran variedad de factores que afectan la soldadura por figuración a causa del hidrogeno, de ello depende la composición química de los materiales de aporte, el ambiente donde se realizará dicho proceso, los detalles de raíz de soldadura o segregación local de algunos elementos químicos. Esto hace que sea difícil predecir las condiciones necesarias para realizar un precalentamiento más preciso siendo realmente necesario para evitar estas fisuraciones por hidrógeno.

## 1.5 TIPO DE SOLDADURAS

Son múltiples las posibilidades y procesos de soldadura. Su aplicación depende del material a soldar, el espesor del material a unir, de los requisitos que debe tener el cordón de soldadura, así como también el tipo de construcción que se desee realizar.

La gran variación de cordones de soldadura, tanto la forma y las aplicaciones, ha conducido al desarrollo de diferentes procesos de soldadura. La elección del tipo de proceso a usar depende de la necesidad a suplir, sin dejar afuera el tiempo que llevaría realizar cualquier proceso de soldadura. Asimismo, la parte económica que llevaría ejecutar dicha acción, atacando costos de tiempo de operación, costos por desgaste de electrodos, costos por los equipos de soldadura, entre otros[3].

Los procesos de soldadura se pueden clasificar en dos grandes grupos, como lo son por presión o por fusión.

### 1.5.1 Soldadura por presión

Este proceso se realiza aplicando una presión reciproca en los objetos metálicos a unir. En algunas ocasiones, se aplica un poco de calor evitando que dichos materiales lleguen a su punto de fusión y cuando el material se encuentra en una zona plástica, se procede a forjarlas. En la figura 5, se muestran los diferentes tipos de soldadura por presión [3].

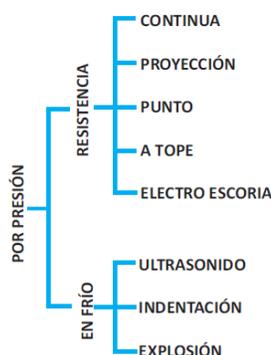
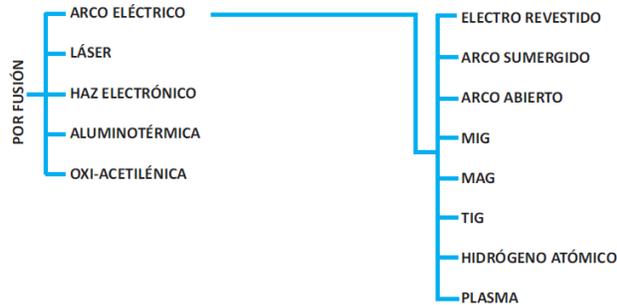


Figura 5: Esquema de la soldadura por presión [4].

### 1.5.2 Soldadura por Fusión.

Otra manera de unir objetos metálicos es mediante la aplicación de energía térmica para fundir el área donde se realizará la junta eliminando las capas de humedad y óxido.



**Figura 6.** Esquema de la soldadura por fusión [4].

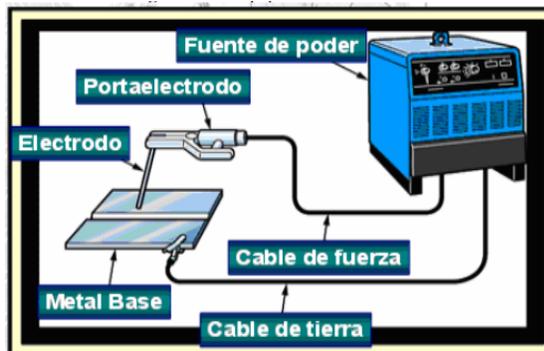
Este tipo de soldadura es la más utilizada actualmente por su facilidad en aplicación, tiempos de trabajo y costo operativo. En la figura 6, se muestran los diferentes tipos de la soldadura por fusión.

Para la elaboración del proyecto, se escoge el proceso de soldadura Shield Metal Arc Welding (SMAW) y el Flux Cored Arc Welding Self Shield (FCAW-S).

### 1.6 PROCESO DE SOLDADURA SMAW

El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), se basa fundamentalmente en unir dos piezas (material de base) por fusión gracias al calor que se obtiene del arco eléctrico que genera el electrodo (Ver figura 7).

#### 1.6.1 Diagrama esquemático del equipo SMAW

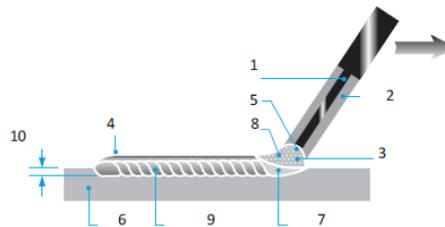


**Figura 7.** Diagrama esquemático de equipo de soldadura[5].

El equipo de soldadura consta de:

- Generador de corriente (Fuente de poder)
- Cables de soldadura.
- Porta-Electrodo.
- Masa o tierra.
- Electrodo.
- Pieza de trabajo.

El principio de la soldadura por arco eléctrico consta en cerrar un circuito entre los dos materiales a unir y el electrodo (Ver figura 7) donde este tiene que tocar el material base y retirarla inmediatamente entre una distancia de 1,5 a 3 mm donde se formará el arco eléctrico. El calor proporcionado por dicho arco funde las piezas que se desean unir junto con el electrodo que a su vez se involucra el revestimiento que por sus fundentes crean dos capas protectoras, una de gas que protege el charco fundido y la segunda protege el cordón de soldadura por la escoria que se forma en ella (ver figura 8).



**Figura 8.** Fusión del electrodo. Las partes involucradas son: 1. Núcleo metálico, 2. Revestimiento, 3. Gota en formación, 4. Escoria, 5. Arco eléctrico, 6. Metal base, 7. Bala de fusión y cráter de metal base en fusión, 8. Protección gaseosa, 9. Cordón depositado, 10. Penetración. [6].

### 1.6.2 Ventajas de SMAW.

- Equipos sencillos y de bajo costo.
- La variación de posiciones, tipos de metales y espesores de metales son altos.
- Buena penetración.
- Buena presentación.
- Aplicable en espesores de 3 a 38 mm.

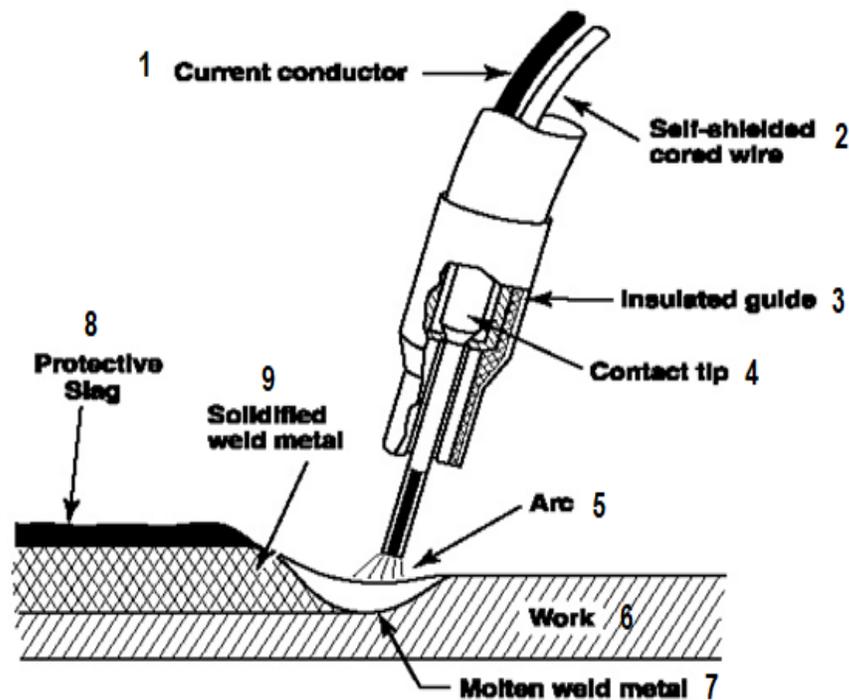
### 1.6.3 Desventajas de SMAW.

- Es un proceso discontinuo debido a la corta longitud del material de aporte.
- Se necesita de gran habilidad del soldador para un cordón de soldadura aceptable.

- El cordón puede tener inclusiones de escoria.
- Gran aporte de calor.
- Por cada electrodo, se debe desperdiciar una longitud mínima de 5 cm.
- Es un proceso lento.

### 1.7 PROCESO DE SOLDADURA FLUX CORED METAL ARC WELDING SELF SHIELD (FCAW-S).

El proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo tubular auto protegida se considera como un proceso semiautomático en donde logra su función mediante un arco entre un electrodo tubular (material de aporte) y el material o la junta a soldar (material de base). La protección del cordón de soldadura se obtiene mediante un fundente que se encuentra dentro del electrodo tubular. (Ver figura 9).



**FIGURA 9.** Fusión del electrodo tubular y partes de la antorcha. Las partes involucradas son: 1. Cable de corriente, 2. Alambre tubular auto-protegido, 3. Guía aislada, 4. Punta de contacto, 5. Arco, 6. Material base, 7. Charco, 8. Escoria, 9. Deposito solidificado[7].

El material de aporte o electrodo es un consumible que viene en rollo, el cual es alimentado automáticamente por un alimentador desde un carrete, el alambre viaja por una serie de manguera guiado por una bobina hasta una antorcha donde tiene una punta de contacto. La velocidad de alimentación del alambre determina la

cantidad de corriente de soldar que se suministra al arco. De esta manera, el control de velocidad de alimentación es, esencialmente, el ajuste de la corriente de soldar.

### **1.7.1 Ventajas de FCAW-S.**

Las ventajas del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo tubular y fundente en el interior de este, son propias a comparación de otros procesos de soldadura como el SMAW, en donde se destacan las siguientes:

- Proceso semiautomático.
- Tasa de deposición de alta calidad.
- Buena penetración.
- Excelente penetración.
- Una variedad de metales a soldar amplios.
- Produce menos distorsión de calor.
- Alta productividad en elaboración de cordones de soldadura.
- Bajos desperdicios de material de aporte.

### **1.7.2 Desventajas de FCAW-S.**

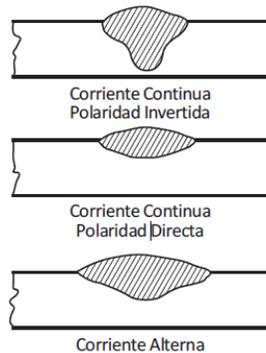
- Costo de equipo relativamente alto.
- Costo de material de aporte relativamente elevado.
- Se limita en la soldabilidad de metales ferrosos y aleaciones a base de níquel.
- El alimentador del alambre tiene que estar relativamente cerca al equipo de soldadura, lo que limitaría algunos lugares a soldar.
- El equipo de soldadura es más complejo que el de SMAW, lo que requiere más mantenimiento.
- Produce salpicaduras por su reacción química.
- Produce más humo que SMAW.

## **1.8 POLARIDAD.**

La dirección del flujo de corriente en el circuito de un proceso de soldadura se denomina polaridad. Si el cable del porta-electrodo es conectado al polo negativo de la fuente de poder y el cable de tierra al polo positivo, el circuito es denominado *polaridad directa o normal*. Asimismo, cuando el cable de la porta-electrodo es conectado al polo positivo (+) de la fuente de poder y el cable de tierra al polo negativo, el circuito es denominado *polaridad invertida o indirecta*[8].

Generalmente, el electrodo conectado al polo positivo (polaridad invertida) permite una mayor penetración y el electrodo conectado al negativo (polaridad directa) da una mayor velocidad de fusión. Sin embargo, los componentes químicos del revestimiento del electrodo pueden hacer variar los efectos de la polaridad y, por

ello, es conveniente seguir las instrucciones del fabricante para conectar el electrodo correctamente, ya sea al polo positivo o negativo (ver figura 10)[8].



**Figura 10.** Efecto de la polaridad y el tipo de corriente [4].

### **1.9 MATERIAL DE APORTE.**

Según la AWS A3-0-2001 (Standard Welding Terms and Definitions), es el material añadido en una junta soldada, también se refiere a los electrodos y a los cordones de soldadura [9].

#### **1.9.1 Electrodo.**

Los electrodos son materiales de metal en forma de varilla o rollos de alambre con composiciones físico-químicas similares a las propiedades de un material base.

##### **1.9.1.1 Clasificación.**

Los electrodos se clasifican por no metálicos y metálicos, en donde los primeros su composición se basa en grafito, carbón y viene recubierto por cobre para darle cuerpo y evitar su fragilidad; los segundos vienen también en varillas y rollos de alambre con composiciones definidos por metales (Acero al carbono, Acero inoxidable, Níquel, Cromo, Manganeso Molibdeno, entre otros)[2].

Dentro de los electrodos metálicos, se encuentran los ferrosos y no ferrosos como lo ilustra la figura 11.

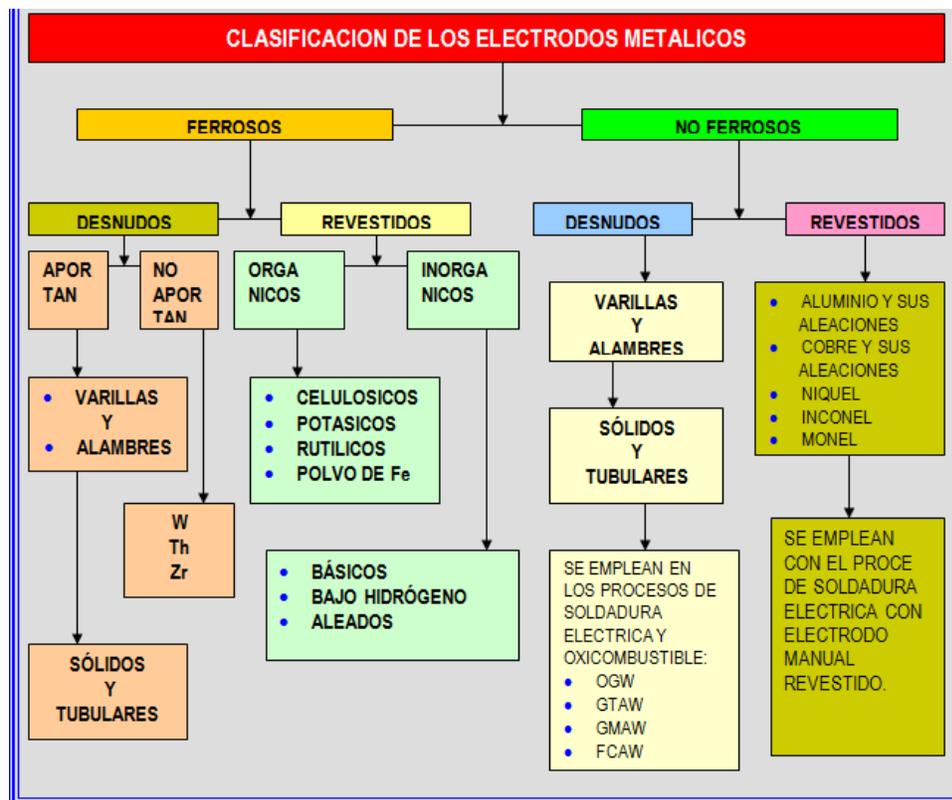


Figura 11. Clasificación de electrodos metálicos [10].

### 1.9.1.2 Fundentes de un electrodo

Los fundentes de un electrodo están caracterizados por ser un recubrimiento en el cordón de soldadura llamado comúnmente como escoria, que lo protege del medio ambiente y le otorga al material fundido ciertas propiedades [8]. En la figura 11 vemos tipos de revestimientos según su composición.

Entre las funciones del revestimiento se encuentran:

- La estabilización del arco.
- La penetración en el material base concentrando la energía del arco.
- Impide el contacto con el oxígeno, evitando así la oxidación, gracias a una capa protectora llamada escoria.
- Adiciona aleantes a la soldadura que permite tener características mecánicas a esta.
- Proporciona un escudo de gas que protege el arco y ayuda a la transferencia del metal.

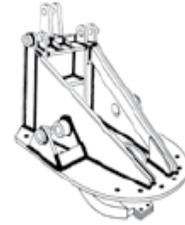
### 1.9.1.3 Electrodo AWS E7018

Este es un electrodo en forma de varilla de revestimiento básico con contenido de hierro en polvo que genera un mejor rendimiento y menos salpicaduras.

Cabe recalcar que, para la utilización de este electrodo, se debe desperdiciar 5 cm de longitud de este, ya que está expuesto a altas temperaturas, tiende a perder propiedades el revestimiento.

**Valores Típicos:**

Composición química: C: 0,08% Mn: (1,0 - 1,40)% Si: (0,30- 0,60)%  
 Resistencia a la tracción: (540 - 610)N/mm<sup>2</sup> (77,14 - 88,73) ksi  
 Límite elástico: (450 - 510) N/mm<sup>2</sup> (62,79 - 72,86) ksi  
 Alargamiento: (L = 5d): (25 - 29) %  
 Resistencia al impacto: (120 - 160) N.m a - 30°C



Diámetro (mm)	Diámetro (pulg)	Longitud (mm)	Intensidad (amp)	Peso Paq. (kg)
2,50	3/32	350	60-100	10
3,25	1/8	350/450	90-140	10/12
4,00	5/32	350/450	120-190	10/12
5,00	3/16	350/450	160-230	10/12
6,00	1/4	450	210-300	12

**Figura 12.** Valores típicos del electrodo AWS E7018 [11].

**1.9.1.4 Electrodo AWS E71T-11**

Electrodo tubular con su fundente en el núcleo, viene en forma de rollo en varias presentaciones por kilogramo. Entre muchas de las características de este material de aporte, encontramos que: su capacidad de soldadura es versátil en una variedad de materiales de aporte, la apariencia del cordón es buena y la remoción de escoria es fácil [11]. En la figura 13, encontraremos las propiedades mecánicas y químicas que le otorgan al cordón de soldadura.

**PROPIEDADES MECÁNICAS<sup>(1)</sup> : como se requiere de acuerdo con AWS A5.20/A5.20M**

	Resistencia a la Cedencia <sup>(2)</sup> MPa (ksi)	Resistencia a la Tensión MPa (ksi)	Elongación %	Dureza Rockwell B
Requerimientos - AWS E71T-11	400 (58) min.	480-655 (70-95)	20 min.	–
Resultados de prueba <sup>(3)</sup> : tal como se soldó	435-475 (63-69)	605-645 (88-94)	22-25	89-92

**COMPOSICIÓN DE ALAMBRE<sup>(1)</sup>: tal como se requiere de acuerdo con AWS A5.20/A5.20M**

	% C	% Mn	% Si	% S	% P	% Al
Requerimientos - AWS E71T-11	0.30 máx.	1.75 máx.	0.60 máx.	0.03 máx.	0.03 máx.	1.8 máx.
Resultados de pruebas <sup>(3)</sup>	0.23-0.26	0.57-0.66	0.17-0.26	≤0.01	≤0.01	1.3-1.6

**Figura 13.** Valores típicos del electrodo AWS E71T-11[11].

### 1.10 DISCONTINUIDAD DE UNA SOLDADURA.

La discontinuidad de una soldadura es la interrupción que se presenta en una estructura soldada [8].

#### 1.10.1 Causas de discontinuidades

Algunas de las causas de este defecto son: Las porosidades, las inclusiones de escoria y tungsteno, la fusión incompleta, la falta de penetración, los golpes de arco, la socavadura, el traslape, los perfiles inadecuados, de la soldadura, las grietas y los materiales extraños que se encuentran en el metal base que se encuentran antes de hacer una debida alistación de las piezas a unir [8].

### 1.11 ACERO ESTRUCTURAL ASTM A572 GRADO 50.

La especificación del material base (acero a soldar), es importante saber tanto al grupo que pertenece, como los elementos que lo componen. También, estas características nos podrán permitir diseñar cualquier tipo de estructura según los procesos de soldadura que su composición permita.

El acero estructural ASTM A572, se caracteriza por tener diferentes tipos de grados, cada uno de ellos se diferencian por los elementos aleantes que le aportan al material distintos tipos de propiedades como el límite de elasticidad ( $\sigma_y$ ), rangos de tracción ( $\sigma_u$ ), resistencia a la fluencia, entre otros (ver anexo 7). Según la norma ASTM que regula este acero, su grado nos permitirá saber el esfuerzo que soporta y su elongación mínima (ver Figura 14) [12].

### 1.11.1 Límite de elasticidad.

Se define como una propiedad mecánica que posee un material para resistir cargas de tensión máxima sin sufrir algún tipo de deformación permanente. Siendo no mayor la carga, al límite de elasticidad, sobre un material, este regresará a su forma original[13].

Grade	Yield Point, min		Tensile Strength, min		Minimum Elongation, % <sup>B,C,D</sup>	
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	in 8 in. [200 mm]	in 2 in. [50 mm]
42 [290]	42	[290]	60	[415]	20	24
50 [345]	50	[345]	65	[450]	18	21
55 [380]	55	[380]	70	[485]	17	20
60 [415]	60	[415]	75	[520]	16	18
65 [450]	65	[450]	80	[550]	15	17

<sup>A</sup> See specimen Orientation under the Tension Tests section of Specification A 6/A 6M.

<sup>B</sup> Elongation not required to be determined for floor plate.

<sup>C</sup> For wide flange shapes over 426 lb/ft [634 kg/m], elongation in 2 in. [50 mm] of 19 % minimum applies.

<sup>D</sup> For plates wider than 24 in. [600 mm], the elongation requirement is reduced two percentage points for Grades 42, 50, and 55 [290, 345, and 380], and three percentage points for Grades 60 and 65 [415 and 450]. See elongation requirement adjustments in the Tension Tests section of Specification A 6/A 6M.

**Figura 14.** Límite de elasticidad y espesor máximo [12].

### 1.11.2 Resistencia a la tracción.

Es el punto máximo de carga que puede soportar un material antes de llegar a una deformación permanente. Cuando dicho objeto supera los valores de resistencia a la tracción, este trabaja bajo un comportamiento plástico[13].

## 1.12 METALOGRAFIA.

Dentro de la metalurgia, la metalografía tiene por tarea estudiar la estructura de un metal y sus aleaciones en donde podemos caracterizar este material, según su composición química y su formación estructural, propiedades mecánicas y físicas. Este estudio se realiza mediante técnicas especiales para el pulido del material a estudiar y ataques con reactivos para revelar micrográficamente la formación de dichas estructuras[14].

Algunos de los ensayos para realizar una buena metalografía se encuentran la micrografía o micro-ataque y la macrografía o el macro-ataque. Entre la macrografía y la micrografía, hay una diferencia en la cantidad de aumento para percibir las imágenes y el reactivo con la que se ataca la probeta; en la primera se necesita de un aumento comprendido desde los 10 hasta los 50 y se ataca con per-sulfato de amonio y el segundo se necesitara de un aumento desde los 50 hasta los 1000 y se ataca con Nital o ácido nítrico[14].

### **1.12.1 Micrografía.**

Este análisis tiene como objetivo estudiar las características micro estructurales de un metal y aleantes. Con la ayuda de un microscopio, se puede establecer el tamaño de grano como la estructura que puedan presentar[14].

Las aleaciones ferrosas (fundiciones y aceros), se atacan con nital cuya composición química es la siguiente:

Ácido nítrico..... 5 c.c.  
Alcohol etílico o metílico (95% o absoluto) ... 100 c.c.

El tiempo de ataque puede ser unos pocos segundos hasta 1 minuto, para todos los aceros al carbono y de baja aleación[15].

### **1.12.2 Macrografía.**

El ensayo de macro-ataque es usado para revelar la heterogeneidad de metales y aleaciones, por otro lado, proporcionará información en variaciones de estructura, tal como tamaño de grano, estructura de columnas, dendritas, variaciones en la composición química como la evidencia de segregación de carburos y la ferrita, el corte, las inclusiones y la profundidad de la carburación o descarburación. La información proporcionada sobre las variaciones en la composición química es estrictamente cualitativa, pero se mostrará la ubicación de los extremos en segregación, también mostrará la presencia de discontinuidades y vacíos, tales como costuras, porosidad, ráfagas, ruptura por extrusión, grietas, entre otros [16].

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Para realizar óptimas construcciones en territorio colombiano nos regimos a cumplir con la Norma Técnica Colombiana de construcción sismo resistente NSR 2010, donde este se divide en once títulos enlistados de la A hasta la K. Para construcciones en Acero estructural o Aluminio se aplica el título F, en donde las normas contenidas en este reglamento son aplicables al diseño de estructuras conformadas por acero o bien aluminio soldados, atornillados o remachados, en el cual, a su vez, en la sección **F.2.10.2**, se afirma lo siguiente: “Se deben cumplir todas las provisiones del Código de Soldadura Estructural de la Sociedad Americana de Soldadura, AWS D1.1”. De allí se tomará como base principal la realización de este proyecto. Por consiguiente, se calculó y diseñó el número de probetas bajo una ecuación inferencial tomado de un libro de estadística en donde se optó una población de 1000 juntas en T con una precisión del 15%. La ecuación a utilizar fue la siguiente:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{d^2 * (n - 1) + Z^2 * P * q} \quad (1)[19]$$

Ecuación 1 Ecuación tamaño de muestra. Estadística inferencial.

Dónde:

- (n) representa el tamaño de muestra.
- (N) tamaño de la población.
- (Z) tasa de efectividad.
- (p) la proporción esperada.
- (d) la precisión.
- (q) el ajuste de error.

Resolviendo la anterior ecuación, se obtiene:

$$n = \frac{1000 * 1,96^2 * 0,05 * 0,95}{0,15^2 * (1000 - 1) + 1,96^2 * 0,05 * 0,95}$$

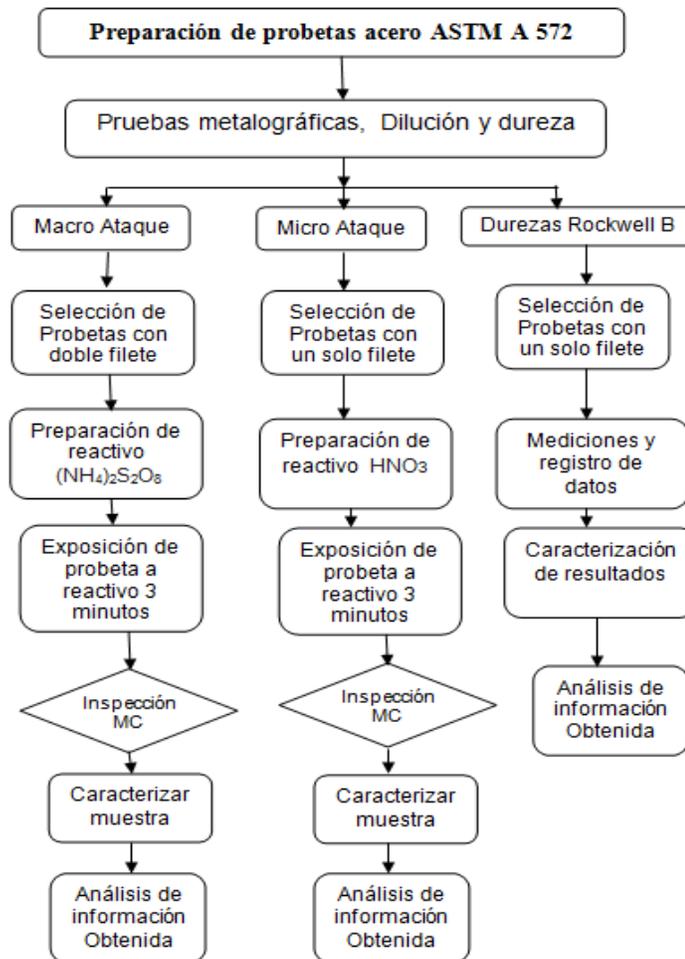
$$n = 8$$

Estas serán las probetas que se realizarán para los diferentes ensayos de caracterización del material de estudio.

Los materiales de aporte elegidos para la realización de los procedimientos de soldeo fueron: AWS E71T-11 y AWS E7018, los cuales tienen diferencias significativas en sus características químicas, propiedades mecánicas y procedimientos típicos.

A continuación, se describen los procedimientos realizados a lo largo de este desarrollo experimental.

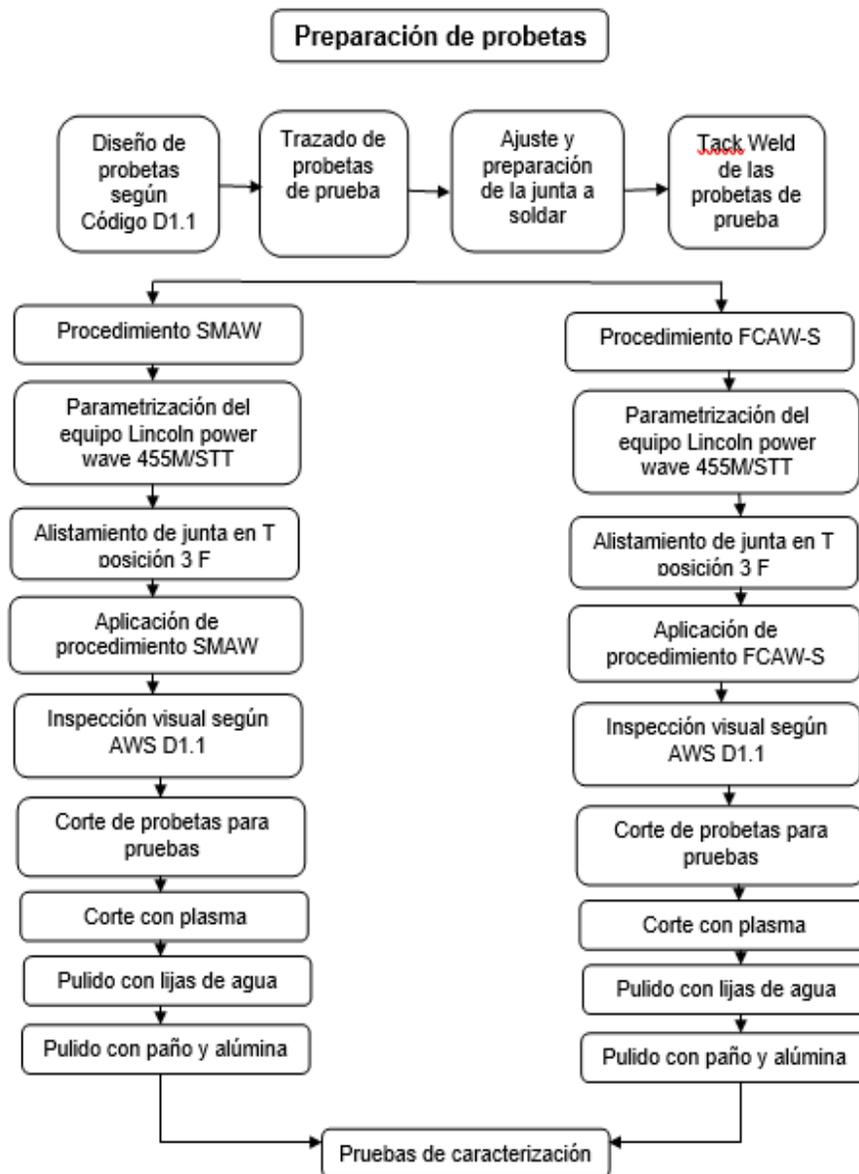
**Figura 15.** Flujoograma de experimentación. Imagen suministrada por los autores.



## 2.1 Preparación de probetas

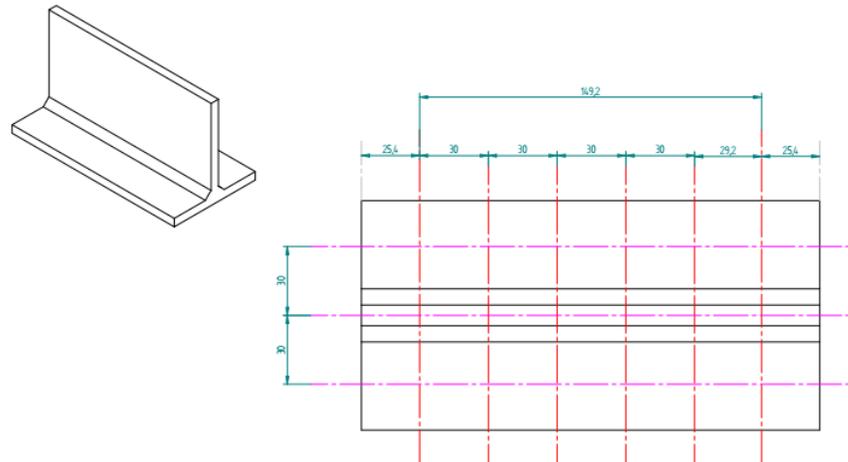
El material base de estudio fue el acero estructural ASTM A 572 grado 50, el cual se extrajo de una viga perfil W18x35. Para la obtención de las probetas, se cortó con una máquina de corte eléctrico tipo tortuga de acuerdo a las dimensiones indicadas en el código AWS D1.1. El número de probetas obtenidas fueron de 16, las cuales se calcularon teniendo en cuenta una población de mil juntas promedio soldadas en un proyecto estructural. El procedimiento que se siguió para la obtención de las probetas es mostrado en la siguiente figura [17]

**Figura 16.** Procedimiento para la obtención de probetas. Elaboración propia de los autores.



El corte del material base y el ensamble de la junta soldada se realizó según las especificaciones del código D1.1 (ver anexo 1) [17]. Las probetas se configuraron de la siguiente manera cuatro con un solo filete de soldadura y cuatro con dos filetes de soldadura para cada procedimiento, para una relación de ocho probetas para cada proceso.

**Figura 17.** Geometría y dimensiones del corte de las probetas de material base. Imagen suministrada por autores del proyecto. Elaboración propia de los autores.



Una vez finalizado los procedimientos de soldadura, se realizó un corte final con plasma donde la micro-estructura del material base se podría mantener más estable. Los diseños para los cortes de las probetas se realizaron teniendo en cuenta las recomendaciones del código D1.1[17], el cual recomienda realizar un corte de 25,4 mm a cada extremo de la probeta, seguidamente se dimensionó la geometría de las probetas de acuerdo a las tolerancias admisibles de los equipos utilizados para las respectivas pruebas.

Después, las probetas fueron pulidas con lijas de agua iniciando con la numero 80 hasta la 1200, para después continuar el procediendo con paño y oxido de aluminio de 9 micras, el cual permite un acabado espejo de las superficies a analizar.

## **2.2 Pruebas de caracterización**

Para este proyecto de tesis se propusieron cuatro pruebas de caracterización diferentes con la finalidad de analizar la soldabilidad del acero estructural ASTM A 572 grado 50.

### **2.2.1 Ensayo de Macro-ataque**

De acuerdo a las recomendaciones encontradas en la norma ASTM E340-15 [16] para los aceros con baja aleación, se realizó este procediendo con el reactivo persulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>). Éste, se preparó de la siguiente manera: se disolvió 10 gramos de este reactivo previamente pesado con balanza de precisión con resolución de 0,01 mg, en 10 mililitros de agua destilada medida en el Beaker. Una vez preparada la solución, se agitó por un periodo de 10 minutos.

Seguidamente, se sumerge la probeta dentro de un vidrio redondo convexo que permite contener la sustancia reactiva para exponer la superficie pulida de la probeta por un periodo de 2 minutos, con la finalidad de revelar la heterogeneidad del material base y material de aporte. De igual forma, proporcionar información en cuanto a las variaciones de estructura, tal como tamaño de grano y estructura de columnas [16].

### **2.2.2 Ensayo de Microataque.**

El ensayo de microataque se realizó con el reactivo ácido nítrico (Nital) en solución de alcohol etílico en una concentración como se indica en el numeral 1.12.1. Este ensayo, se realizó con recipientes de vidrio con la finalidad de no afectar la prueba y garantizar la correspondencia de los resultados obtenidos. Una vez realizado el ataque químico, se procedió a remover en el menor tiempo posible la sustancia química de la superficie en estudio con suficiente agua y secado con aire caliente para luego realizar la respectiva verificación de la micro estructura en el microscopio BROOKS SSC con aumentos de 50X, 100X y 200 X.

### **2.2.3 Prueba de Dureza.**

El durómetro utilizado para esta prueba fue el Brooks Hardness Tester, el cual hace parte del laboratorio de ensayos de materiales de la Fundación Universitaria los Libertadores. Para las pruebas de dureza, se parametrizó el equipo de acuerdo a las indicaciones del manual de usuario. Luego, se tomó una probeta de muestra con la finalidad de seleccionar la escala de dureza indicada.

Una vez configurado el equipo, se procedió a realizar las mediciones de las incrustaciones del penetrador en cuatro diferentes zonas de la probeta, esto con la finalidad de determinar lo cambios en las propiedades mecánicas del material base.

### **2.2.4 Dilución**

Determinar el porcentaje de dilución en el cordón de soldadura es un factor muy importante ya que este influye de manera significativa en la composición química de este. Para determinar el porcentaje de material fundido e incorporado en el material base, se determinó utilizar la siguiente ecuación:

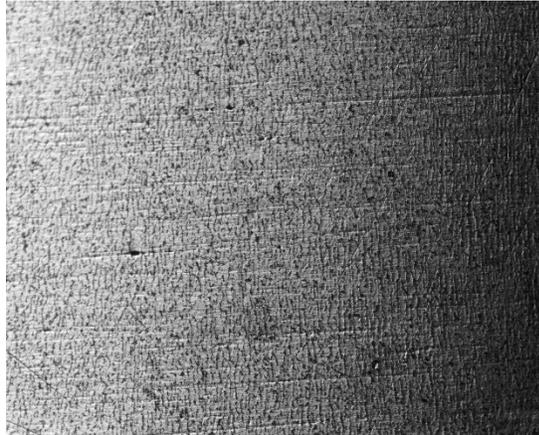
$$\% \text{ Dilucion} = \frac{B}{A+B} \times 100 \text{ (2)[18]}$$

Donde (B) representa el área del material fundido, y (A) el área del cordón de soldadura. Los valores normales en procesos de soldadura de dilución están entre 20 y 40%. Valores por encima de esto, exponen al material a posibles grietas y procesos corrosivos.

### 3 ENSAYOS, ANALISIS Y RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización del material base (ASTM A572 grado 50)

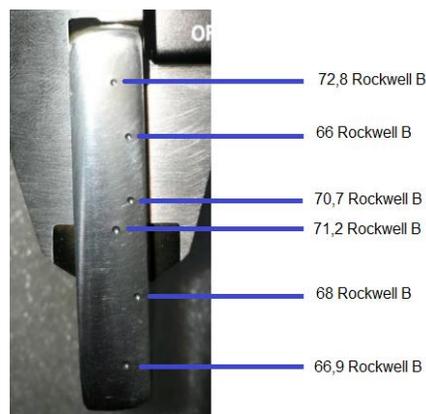
Después del proceso de pulimiento de las probetas y del ataque químico con Nital al 5%, se obtiene la siguiente micrografía del material de estudio.



**Figura 18.** Microestructura del acero estructural ASTM A572 grado 50 sin ningún tipo de tratamiento térmico. 50x con nital al 5% centro del material. *(Imagen suministrada por los autores).*

Según la bibliografía consultada, la microestructura observada es perlita (zonas oscuras) en matriz ferrítica (zonas claras). Esto corresponde a un material que contiene 0.2% de carbono y la orientación de la perlita pudo ser ocasionada por procesos de fabricación del material (formado en caliente)[15].

En el ensayo de dureza, se tomaron medidas en diferentes puntos que son mostrados en la siguiente figura.



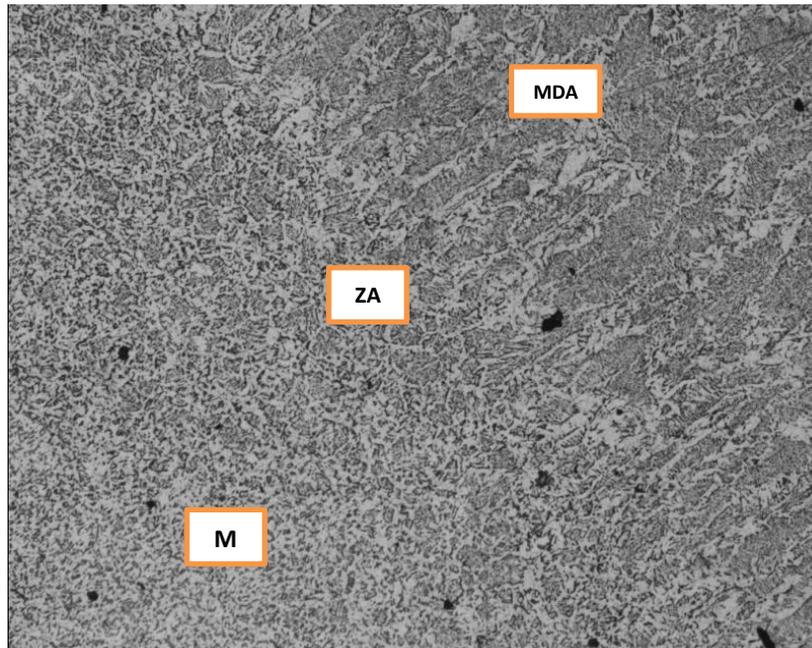
**Figura 19.** Mediciones de dureza en acero estructural ASTM A572 grado 50.

Según las mediciones obtenidas, se tuvo un promedio de dureza de 69,7 HRB que está cercano al valor reportado en la norma ASTM A572/A572M-15 [12] para este grado de material (75 HRB). Es probable que, en el momento de la disposición (alistamiento), el material haya sufrido un ligero ablandamiento.

Esta dureza nos permite conocer la resistencia a la tracción del material de estudio según la tabla de equivalencias que trae el durómetro (anexo 5). Este valor será de 441,3 MPa en promedio y en comparación a la norma ASTM A572/A572M-15 [12] este valor puede ser de un máximo de 450 MPa. Como se pudo observar, este material cumple las especificaciones mecánicas de la norma para poderse utilizar de forma confiable en los procesos de soldadura que se llevaron a cabo. A continuación, se muestran los resultados según el proceso de soldeo.

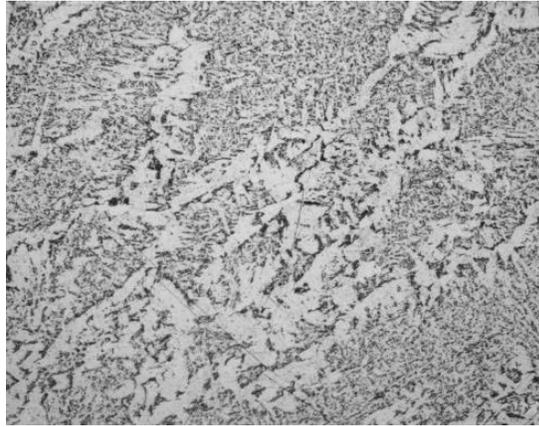
### 3.2 Caracterización del material con proceso de soldeo FCAW-S

En la siguiente micrografía, se observa el proceso de fusión micro-estructural que ocurre al soldar el material de estudio mediante el proceso de soldeo FCAW-S.



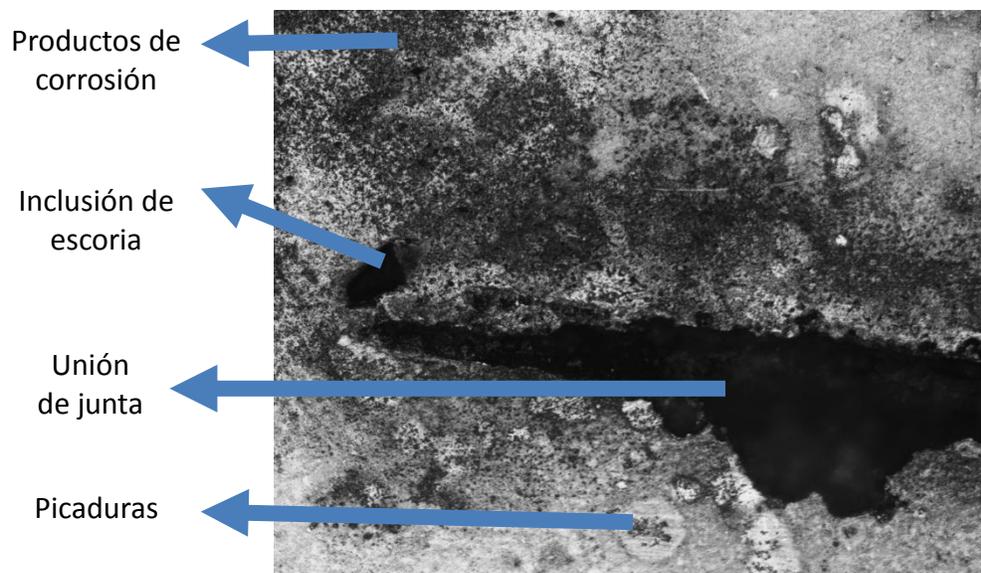
**Figura 20.** Micrografía de la zona de fusión del material base (MB) con el material de aporte (MDA) y su respectiva zona de afectación de calor (ZAC) en el acero estructural ASTM A572 grado 50 sometido a proceso de soldeo FCAW-S. 50X. Nital 5%. (Imagen suministrada por los autores)

Como se puede ver, la zona afectada por el calor tiene una microestructura característica en la cual se nota una zona de fusión de bajo carbono que muestra vetas de ferrita con perlita [15]. También, se notan unas inclusiones ocasionadas por el proceso de soldeo (granos negros). En la siguiente micrografía, se muestra esta formación en un aumento mayor.



**Figura 21.** Microestructura de material de aporte a 200x (Imagen suministrada por los autores).

En el proceso de macro-ataque que se realiza en el material con este proceso de soldeo, se muestra una afectación corrosiva en forma de picaduras localizadas en el material base. Adicional a esto, se revelan inclusiones de escoria dentro de la zona de la soldadura. Estas inclusiones podrían ser precursores de grietas en el material y a su vez, combinado con procesos corrosivos, se puede ocasionar un fallo de manera catastrófica en una estructura [15]. En la siguiente figura, se puede observar esto.



**Figura 22.** Micrografía tomada del ASTM A572 grado 50 con proceso de soldeo FCAW-S después de 2 minutos de macroataque con persulfato de amonio. 100x. (Imagen suministrada por los autores).

El proceso de macro-ataque también ha mostrado la dilución del material de aporte dentro del material base. El cálculo respectivo, se realizó según la

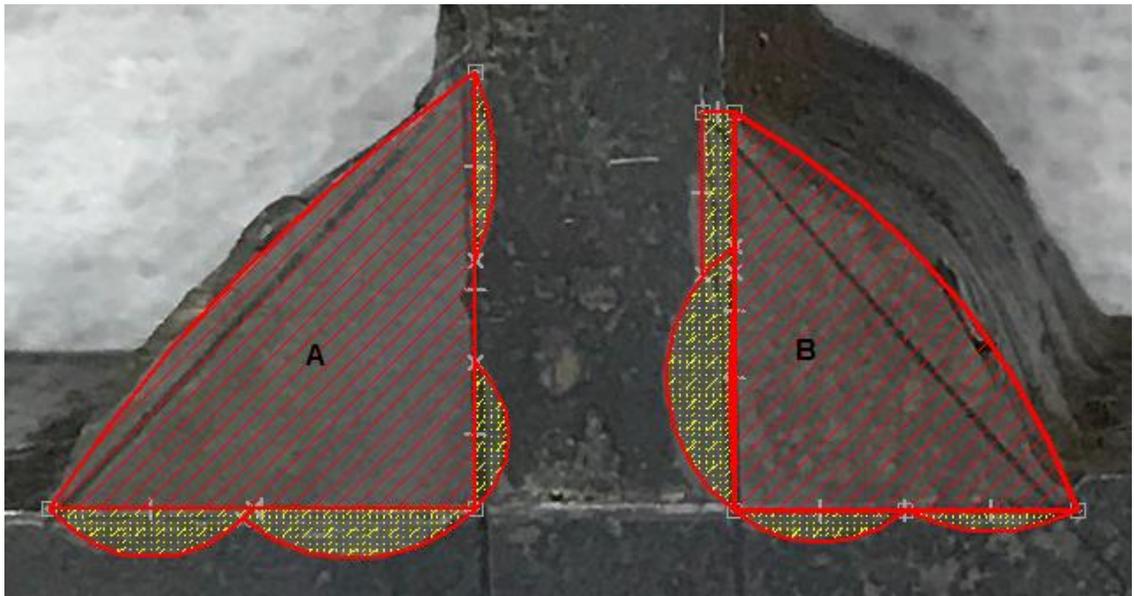
fotografía tomada (figura 23) en las zonas A y B (cordones), obteniendo los siguientes resultados:

$$\% \text{ Dilucion parte A} = \frac{15,619 \text{ mm}^2}{77,4275611 \text{ mm}^2 + 15,619 \text{ mm}^2} * 100$$

% Dilución parte A = 16.79%

$$\% \text{ Dilucion parte B} = \frac{16,75959 \text{ mm}^2}{63,3031573 \text{ mm}^2 + 16,75959 \text{ mm}^2} * 100$$

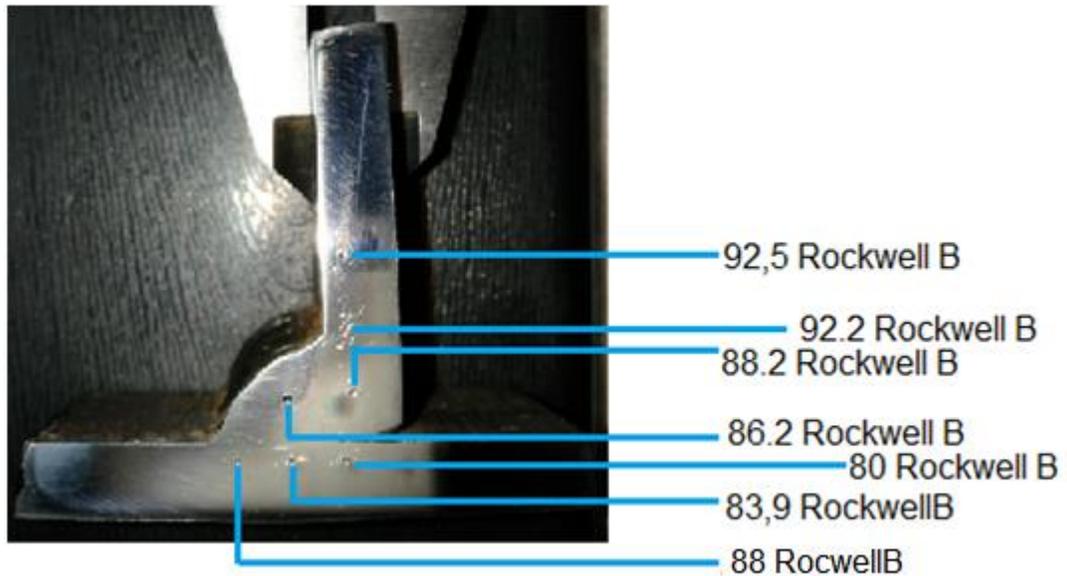
% Dilución parte B: 20,88%



**Figura 23.** Macrografía de la probeta de ASTM A572 grado 50 soldada con el proceso de FCAW-S, mostrando las zonas de cálculo de dilución.

Se puede decir que los cordones de soldadura fueron efectuados de manera correcta sin aumentar el riesgo de agrietamiento en el material base.

En cuanto a los resultados obtenidos en el ensayo de dureza, se obtuvo un valor promedio de dureza de 87,2 HRB. Comparando este valor con el valor obtenido en el material base reportado en la norma ASTM A572/A572M-15 [12] para este grado de material (75 HRB), el material sufre un endurecimiento ocasionado por el proceso de calor al que es sometido y a un enfriamiento un poco acelerado. Esto trae como consecuencia una fragilidad en el material comprometiendo un poco su integridad y propiedades mecánicas. Como en el caso del material base, la dureza obtenida nos permite obtener la resistencia a la tracción el cual equivale a 564,4 MPa en promedio [12]. En la siguiente fotografía, se muestran los puntos y las mediciones obtenidas en el material soldado por FCAW-S.

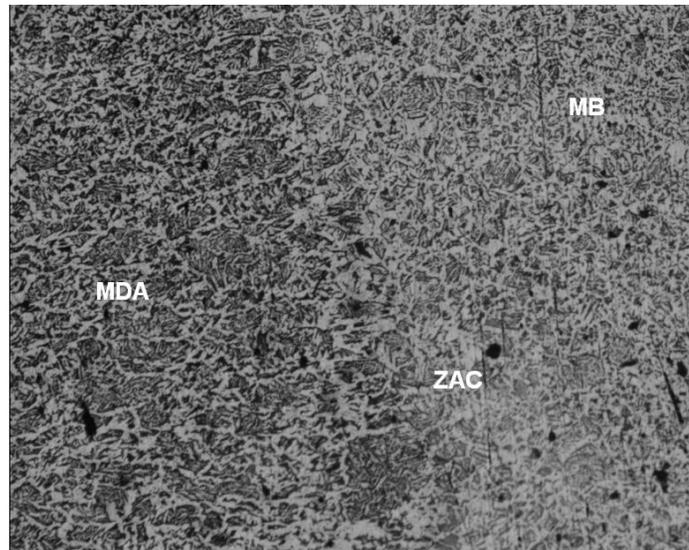


**Figura 24.** Mediciones de dureza en probeta del material base (ASTM 572 grado 50) soldado por FCAW-S.

Los resultados obtenidos para el acero estructural ASTM A572 grado 50 con el proceso de soldeo de FCAW-S permite dilucidar que el material base no es afectado en gran medida en su microestructura. Aunque en el macro-ataque y en la microestructura se presentan inclusiones, esto es inherente a los procesos de soldadura ya que hay una adición de material fundido. Según la norma AWS 1.1, se cumple con la sanidad de la soldadura según el ensayo de macro-ataque ya que la soldadura no se afecta en mayor medida con el químico revelador (persulfato de amonio).

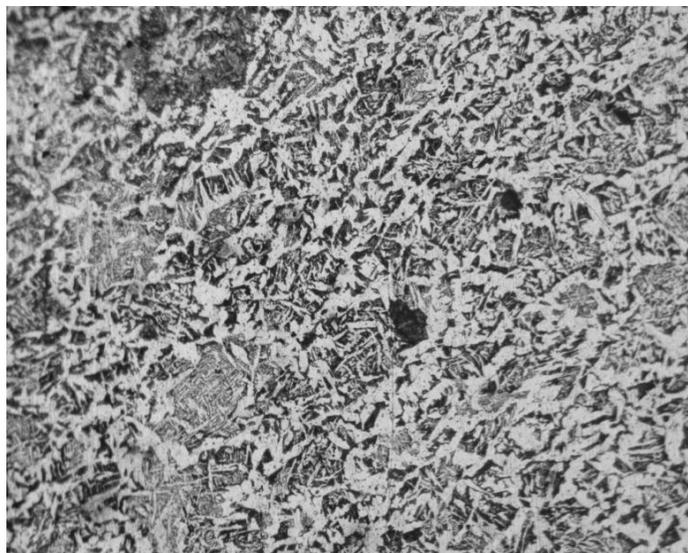
### 3.3 Caracterización del material con proceso de soldeo SMAW

En cuanto a la afectación del calor en el acero estructural A572 grado 50 en el proceso de soldeo por SMAW, se notó una zona un poco mayor que en el proceso de soldeo de FCAW-S. También, se observan más inclusiones en el material base y en la soldadura en comparación con el proceso anterior. La microestructura obtenida es similar a la mostrada en el proceso de soldeo por FCAW-S. Esto es mostrado a continuación.



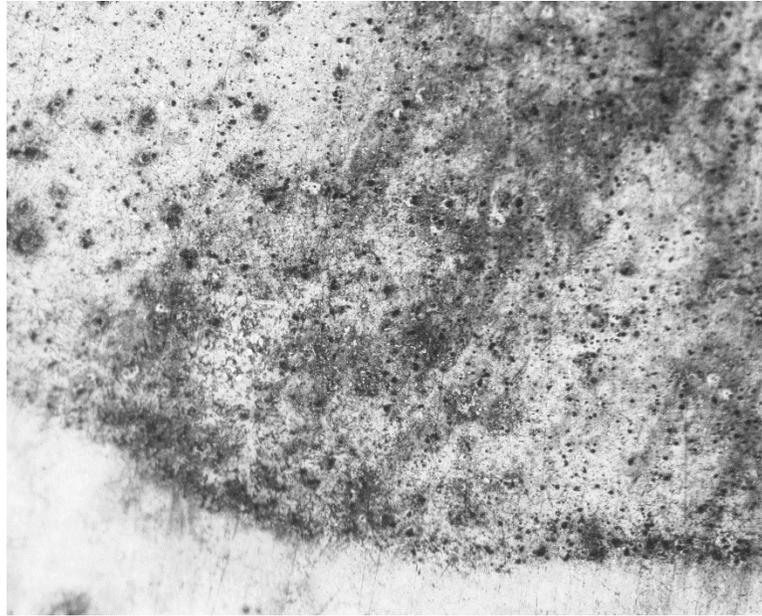
**Figura 25.** Micrografía de la zona de fusión del material base (MB) con el material de aporte (MDA) y su respectiva zona de afectación de calor (ZAC) en el proceso de soldeo SMAW del acero estructural ASTM A572 grado 50. 50X. Nital 5%. *(Imagen suministrada por los autores)*

La zona afectada por el calor muestra una microestructura de transición más amplia y puede ser atribuida al proceso de soldadura en sí. En este caso, también se nota una zona de fusión de bajo carbono con vetas de ferrita y perlita con granos anteriores de Austenita [15]. En la siguiente micrografía, se muestra esta formación en el material de aporte. Además de las inclusiones nombradas, también se notan productos de corrosión (zona superior sombreada)



**Figura 26.** Microestructura de material de aporte a 100x *(Imagen suministrada por los autores)*.

En el proceso de macro-ataque que se realiza en el material con este proceso de soldeo, se muestra una afectación corrosiva en forma de picaduras localizadas en la soldadura. Se ven algunas zonas de picaduras, algunas formaciones en especie de núcleo. Esto es común en este tipo de corrosión y la nucleación es muestra de los productos de corrosión que se acumulan en la superficie del material. Como es conocido, este tipo de corrosión puede ocasionar microfracturas, trayendo problemas estructurales en el material. En la siguiente figura, se puede observar este fenómeno.



**Figura 27.** Micrografía tomada del ASTM A572 grado 50 con proceso de soldeo SMAW después de 2 minutos de macroataque con persulfato de amonio. 100x. (Imagen suministrada por los autores).

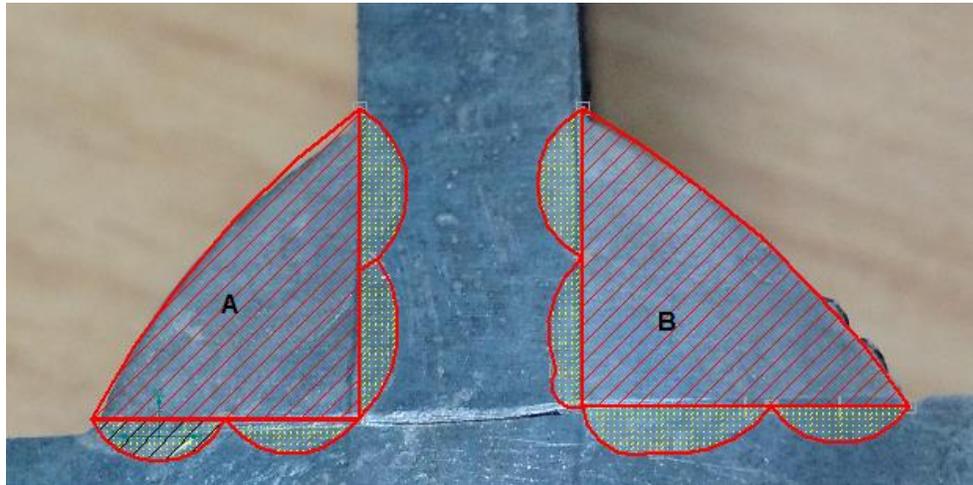
La dilución del material de aporte dentro del material base mostrado por el macro ataque es mostrado en la siguiente fotografía. En este caso, también se aplicó la fórmula de dilución, obteniendo los siguientes resultados:

$$\% \text{ Dilucion parte A} = \frac{81,1585958 \text{ mm}^2}{269,062525 \text{ mm}^2 + 81,1585958 \text{ mm}^2} * 100$$

$$\% \text{ Dilución parte A} = 23,17\%$$

$$\% \text{ Dilucion parte B} = \frac{81,8806802 \text{ mm}^2}{317,280833 \text{ mm}^2 + 81,8806802 \text{ mm}^2} * 100$$

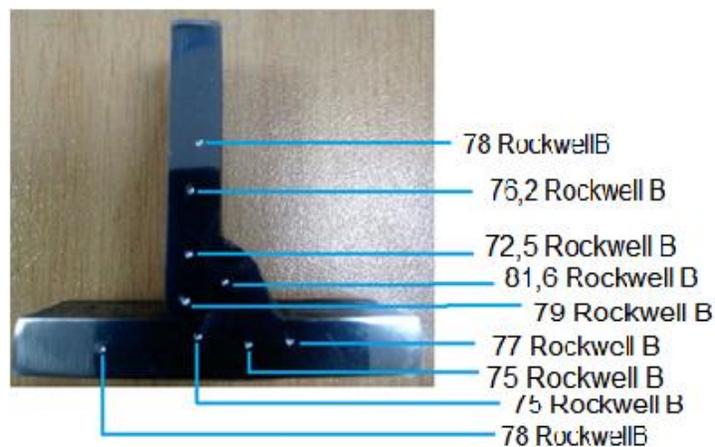
$$\% \text{ Dilución parte B} = 20,51\%$$



**Figura 28.** Macrografía de la probeta de ASTM A572 grado 50 soldada con el proceso de SMAW, mostrando las zonas de cálculo de dilución.

En este proceso de soldadura, también se obtienen porcentajes de dilución dentro de lo esperado y se puede inferir que los cordones de soldadura fueron efectuados de manera correcta sin aumentar el riesgo de agrietamiento en el material base.

Los resultados obtenidos en el ensayo de dureza, muestran un valor promedio de dureza de 77,2 HRB. Comparando este valor con el valor obtenido en el material base reportado en la norma ASTM A572/A572M-15 [12] para este grado de material (75 HRB), el material no sufre un endurecimiento por el calor suministrado en el proceso de soldeo SMAW. Como en el caso del material base, la dureza obtenida nos permite obtener la resistencia a la tracción el cual equivale a 475,6 MPa en promedio. En la siguiente fotografía, se muestran los puntos y las mediciones obtenidas en el material soldado por SMAW.



**Figura 29.** Mediciones de dureza en probeta del material base (ASTM 572 grado 50) soldado por SMAW.

Los resultados obtenidos para el acero estructural ASTM A572 grado 50 con el proceso de soldeo de SMAW permite interpretar que el material base no sufre un cambio de dureza significativa lo que permite decir que sus propiedades mecánicas no son afectadas. Adicional a esto, la dilución obtenida es correspondiente a este tipo de proceso. En cuanto al macroataque, el defecto observado en la soldadura corresponde a un proceso de corrosión por picadura y en la microestructura se presentan inclusiones de escoria como en el proceso de FCAW. Según la norma AWS 1.1, se cumple con la sanidad de la soldadura según el ensayo de macroataque porque la soldadura, si bien muestra picadura, no hay un defecto superficial que afecte la integridad de la soldadura por algún proceso mal realizado.

## 4 FACTOR ECONÓMICO

En la realización de un proyecto en el campo de las estructuras metálicas, siempre se tienen en cuenta importantes factores que dan la viabilidad de la ejecución, entre muchos de estos y la más importante es el factor económico.

Cada proceso de soldadura tiene una serie de variables determinantes que le dan un valor agregado como lo son, la eficiencia del proceso, costo mano de obra, materiales que se consumen, entre otros.

A continuación, se dará una comparación entre el proceso de soldadura SMAW y FCAW-S a través de los siguientes cálculos.

### 4.1 Ecuaciones para hallar costos

#### 4.1.1 Área de sección transversal

$$AST = \frac{s^2}{2} \quad (3)[3]$$

Donde:

**S:** Espesor del material base.

**AST:** Área de sección transversal.

#### 4.1.2 Peso de metal depositado.

$$PMD = AST \times L \times Y \quad (4)[3]$$

Donde:

**PMD:** Peso de metal depositado.

**L:** Longitud del cordón.

**Y:** Densidad de la aleación.

#### 4.1.3 Tasa de depósito

$$VD = PMD \times VA \quad (5)[3]$$

Donde:

**VD:** Tasa de depositado.

**VA:** Velocidad de avance.

#### 4.1.4 Tiempo de arco

$$TA = \frac{PMD}{VD} (6)[3]$$

#### 4.1.5 Costo mano de obra

$$CMO = \frac{PMD \times VMO}{VD \times FO} \times 100 (7)[3]$$

Donde:

**VMP:** Valor mano de obra.

**FO:** Factor de operación.

#### 4.1.6 Costo del electrodo

$$CE = \frac{PMD \times VE}{ED} \times 100 (8)[3]$$

Donde:

**VE:** valor del electrodo.

**ED:** Eficiencia del electrodo.

### 4.2 Solución de ecuaciones y análisis de resultados

Se calcula el área de sección transversal de la junta. Esta ecuación sirve para los dos procesos ya que las características de las juntas son las mismas.

$$AST = \frac{(0,009m)^2}{2} = 0,0000405m^2$$

Se calcula el peso del metal depositado de la junta. Esta ecuación sirve para los dos procesos ya que las características de las juntas son las mismas.

$$PMD = 0,0000405m^2 \times 1m \times 7850 \frac{kg}{m^3}$$
$$PMD = 0,317925Kg$$

La solución del resto de ecuaciones, se presenta a continuación:

$$VD_{smaw} = 0,317925Kg \times 0,42 \frac{m}{min}$$
$$VD_{smaw} = 0,1332639 \frac{Kg \cdot m}{min}$$

$$VD_{fcaw-s} = 0,317925Kg \times 0,50 \frac{m}{min}$$
$$VD_{fcaw-s} = 0,1589625 \frac{Kg \cdot m}{min}$$

$$TA_{smaw} = \frac{0,317925Kg}{0,1332639 \frac{Kg \cdot m}{min}}$$

$$TA_{smaw} = 2,39min$$

$$TA_{fcaw-s} = \frac{0,317925Kg}{0,1589625 \frac{Kg.m}{min}}$$

$$TA_{fcaw-s} = 2min$$

$$CMO_{SMAW} = \frac{0.317925Kg \times 11500 \frac{\$}{Hr}}{7.995834 \frac{Kg}{Hr} \times 30\%} \times 100$$

$$CMO_{SMAW} = \$152418$$

$$CMO_{FCAW-S} = \frac{0.317925Kg \times 11500 \frac{\$}{Hr}}{9,53775 \frac{Kg}{Hr} \times 60\%} \times 100$$

$$CMO_{FCAW-S} = \$63890$$

$$CE_{smaw} = \frac{0.317925Kg \times \$8900}{30\%} \times 100$$

$$CE_{smaw} = \$943177$$

$$CE_{fcaw-s} = \frac{0.317925Kg \times \$21330}{81\%} \times 100$$

$$CE_{fcaw-s} = \$847667$$

Debido a que la velocidad de avance del soldador es mayor en FCAW-S por ser un proceso semiautomático, la tasa de deposición es mayor que el proceso SMAW. Esto implica que el tiempo de arco para los dos procesos tenga una diferencia de 0.38 minutos y a su vez, para una producción a gran escala, el valor del costo total del proceso de soldeo FCAW-S es menor que el proceso de soldeo SMAW. En la siguiente tabla, se muestra un resumen de los datos más importantes hallados en el proceso anterior.

**Tabla 1.** Resumen del análisis de costos y tiempos para los procesos de soldeo SMAW y FCAW-S.

Proceso	Tiempo [min]	Costo del electrodo	Costo mano de obra	Total costo
SMAW	2,39	\$ 943.177	\$ 152.418	\$ 1.095.595
FCAW-S	2	\$ 847.667	\$ 63.890	\$ 911.557

## CONCLUSIONES

- Según los resultados obtenidos en las pruebas de macroataque, dilución y dureza, se puede concluir que el acero estructural ASTM A572 grado 50 se puede soldar en condiciones óptimas para su uso en la industria nacional por medio del proceso de FCAW-S según el código de soldadura AWS D1.1 2010, sin que se afecten sus propiedades mecánicas y microestructura de manera significativa.
- El análisis metalográfico de las juntas soldadas permitió identificar dos tipos de microestructuras en la zona de la soldadura, en los cuales se identificó ferrita y perlita en el material de estudio y en el material de aporte, ferrita con perlita con granos anteriores de Austenita. Comparando esto con los datos de dureza para ambos procesos, se puede decir que el proceso de soldeo de FCAW-S endureció el material lo que ocasiona un aumento en la resistencia a la tracción del material, pero a costa de un aumento en su fragilidad.
- Aunque el valor del equipo de soldadura para el proceso FCAW-S es más elevado en comparación al costo de un equipo para proceso SMAW, este permite obtener un ahorro económico y de tiempo. Por esta razón, podemos concluir que la inversión a largo plazo que es mejor para procesos de soldeo en el material de estudio es la máquina de soldeo por FCAW-S.

## RECOMENDACIONES

- Para el proceso FCAW-S donde las corrientes de aire son elevadas se recomienda el uso de mamparas ya que el cordón de soldadura puede ser afectada.
- Verificar las condiciones del equipo de soldadura, la calidad del material de aporte a usar y el uso de elementos de protección personal durante los procesos de soldeo.
- Mantener la temperatura adecuada para los electrodos antes de su uso garantiza el buen desempeño del mismo.
- Se recomienda realizar tratamientos de pre y post calentamiento a las juntas para garantizar el reorganizamiento de la microestructura del material.
- En el proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) y en este caso, el uso del electrodo AWS E7018, se requiere un horno para mantener este a una temperatura entre los 70 y 100 grados Celsius con la finalidad de evitar discontinuidades por la aparición de poros o fisuras en los cordones.

## BIBLIOGRAFÍA

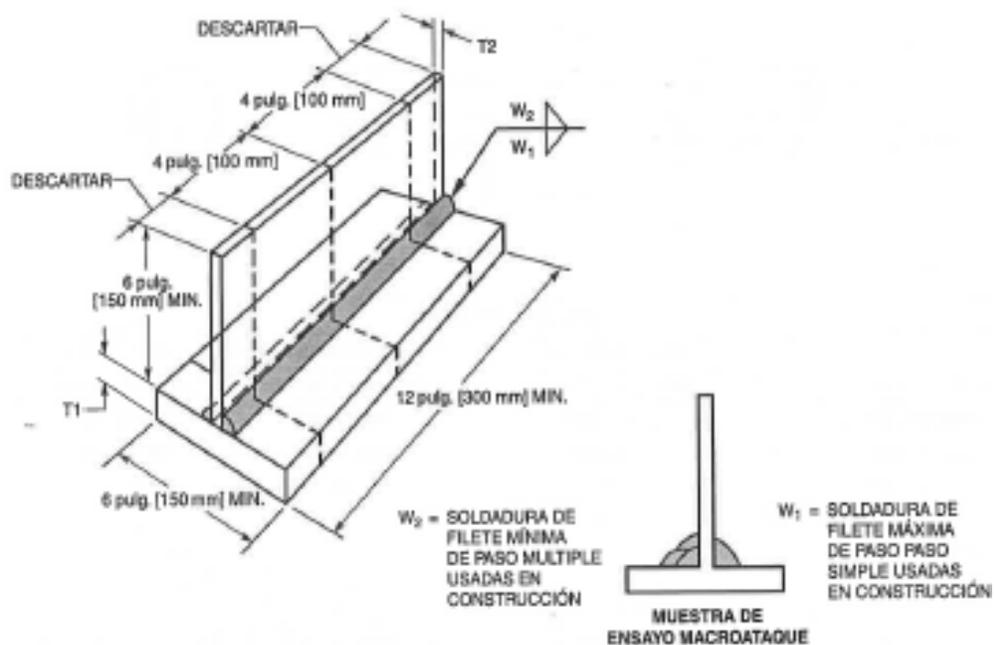
- [1] L. A. de; H. G. S. Vedia, "Introducción a la metalurgia De La Soldadura." p. 171, 2004.
- [2] CMM-SENA, "Clasificacin de los Electroodos para los Procesos de Soldadura Eléctrica y Oxicomcombustible.," SENA. Navarro, Fidel Garcia, Bogotá, Colombia, p. 39, 2008.
- [3] INDURA S.A., "Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura." INDURA S.A., Cerrillos, Chile, p. 175, 2007.
- [4] Solderxa, "Manual de soldadura," vol. 7. Lima Perú, p. 295.
- [5] Carlos Saiz, "Uniones Soldadas. Clasificación. SMAW y TIG." 2013.
- [6] EXSA-OERLIKON, "Manual de Soldadura Y Catalogo de Productos." Lurín Lima, p. 299, 2007.
- [7] Lincoln Electric, "FCAWESPAÑOL Lincoln." United States of America, p. 88, 2000.
- [8] L. Koellhoffer, *Manual de soldadura KOELLHOFFER*, Limusa.S.A. México, 2002.
- [9] American Welding Society, *Standard Welding Terms and Definitions - Including Terms for Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying*. Miami: American Welding Society, 2009, p. 162.
- [10] "Clasificacion de los Electroodos para los Procesos de Soldadura Electrica y Oxicomcombustible." Navarro, Fidel Garcia, p. 39, 2008.
- [11] L. ELECTRIC, "Innershield NR -211-MP." U.S.A, p. 2, 2010.
- [12] ASTM, "ASTM A-572/572M-04: standard specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel." United States of America, 2004.
- [13] SENA, "FUNDAMENTOS DE LA METALURGIA BÁSICA DE LA SOLDADURA." Bogotá, Colombia, p. 39, 2008.
- [14] L. de E. Industriales, "Guía metalográfica," *Universidad tecnológica nacional*. p. 10, 2010.
- [15] T. Materials, *Metallography And Microstructures*, Metals Han., vol. 9. United States of America, 1985.
- [16] ASTM, "Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys 1," *Astm*. ASTM, United States of America, p. 11, 2015.

- [17] AWS, *AWS D1.1-Código de Soldadura Estructural-Acero*, American W. Miami,USA: 2010, 2010.
- [18] Jorge Enrique Giraldo Barrada, “Soldabilidad de un acero de blindaje con electrodos de acero inoxidable austenítico.” Medellín, Colombia, p. 91, 2005.

## ANEXOS

### Anexo 1.

#### Especificación de diseño y corte de probeta



PULGADAS			MILÍMETROS		
Tamaño de Soldadura	T1 mín.	T2 mín.	Tamaño de Soldadura	T1 mín.	T2 mín.
1/8	1/4	3/16	3	6	5
3/16	1/2	3/16	5	12	5
1/4	3/4	1/4	6	20	6
5/16	1	5/16	8	25	8
3/8	1	3/8	10	25	10
1/2	1	1/2	12	25	12
5/8	1	5/8	16	25	16
3/4	1	3/4	20	25	20
> 3/4	1	1	> 20	25	25

Nota: Cuando el espesor mínimo de la placa usada en la producción es menor que el valor mostrado, el máximo espesor de las piezas en producción puede ser sustituido por T1 o T2.

**Figura 4.19—Ensayos de Sanidad de Soldaduras de Filete para Calificaciones WPS (ver 4.12.2)**





## Anexo 4.

Temperaturas mínimas para el precalentamiento e inter pases. (Tabla tomada de AWS D1.1 2010)

C a t e g o r y	Steel Specification		Welding Process	Thickness of Thickest Part at Point of Welding		Minimum Preheat and Interpass Temperature					
				in	mm	°F	°C				
A	ASTM A 36		SMAW with other than low- hydrogen electrodes	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	32 <sup>a</sup>	0 <sup>b</sup>				
	ASTM A 53	Grade B									
	ASTM A 106	Grade B									
	ASTM A 131	Grades A, B, CS, D, DS, E									
	ASTM A 139	Grade B									
	ASTM A 381	Grade Y35									
	ASTM A 500	Grade A Grade B Grade C									
	ASTM A 501										
	ASTM A 516										
	ASTM A 524	Grades I & II									
ASTM A 573	Grade 65	SMAW with low- hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 incl.	150	65					
ASTM A 709	Grade 36										
ASTM A 1008 SS	Grade 30										
ASTM A 1011 SS	Grade 33 Type 1										
	Grade 40 Type 1										
	Grade 30										
	Grade 33										
	Grade 36 Type 1										
API 5L	Grade 40										
	Grade 45										
	Grade 50										
ABS	Grade 55										
	Grade B Grade X42										
	Grades A, B, D, CS, DS Grade E		Over 2-1/2	Over 65	300	150					
B	ASTM A 36		SMAW with low- hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	32 <sup>a</sup>	0 <sup>b</sup>				
	ASTM A 53	Grade B									
	ASTM A 106	Grade B									
	ASTM A 131	Grades A, B, CS, D, DS, E AH 32 & 36 DH 32 & 36 EH 32 & 36									
	ASTM A 139	Grade B									
	ASTM A 381	Grade Y35									
	ASTM A 441										
	ASTM A 500	Grade A Grade B Grade C									
	ASTM A 501										
	ASTM A 516	Grades 55 & 60 65 & 70									
ASTM A 524	Grades I & II	SMAW with low- hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 incl.	50	10					
ASTM A 529	Grades 50 & 55										
ASTM A 537	Classes 1 & 2										
ASTM A 572	Grades 42, 50, 55										
								Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl.	Over 38 thru 65 incl.	150	65
								Over 2-1/2	Over 65	225	110

**Anexo 5.**

Tabla de conversión de dureza.

Tomado de manual de uso de microscopio Brooks Hardness Tester.

			Equivalents				
Brinell			Rockwell				
1000 Kgf 10 mm ball	Brinell impress. dia.	3000 Kgf 10 mm ball	A	B	C	Tensile T.S.I.	Tensile N/mm2
78.3	3.95	235	61	100	20	51	788
76.3	4.00	229	60	99	19	50	772
74.3	4.05	223	59.5	98	17.5	49	757
72.4	4.10	217	59	97	16	48	741
70.6	4.15	212	59	97	15	46	710
68.8	4.20	207	58.5	96	13.5	45	695
65.5	4.30	197	57.5	94	11	43	664
62.4	4.40	187	56.5	92	7	41	633
59.5	4.50	179	55.5	90	3	39	602
56.8	4.60	170	54	88		36	556
54.3	4.70	163	52.5	85		35	541
51.9	4.80	156	51	83		34	525
49.6	4.90	149	50	81		32	494
47.5	5.00	143	49	79		31	479
45.5	5.10	137	48	77		31	479
43.7	5.20	131	46.5	75		30	463
41.9	5.30	126	45	72		29	448
40.2	5.40	121	43.5	69		28	432
38.6	5.50	116	42	66		27	417
37.1	5.60	111	41	63		26	402
35.7	5.70	107	40	61		25	386
34.3	5.80	103	38.5	58		24	371
33.1	5.90	99.2					
31.8	6.00	95.5					

## Anexo 6.

Diferentes escalas de dureza

Tomado de manual de uso de microscopio Brooks Hardness Tester.

Hardness Scale	Rockwell A	Rockwell B	Rockwell C	Brinell
Indentor	Diamond 120°	Ball 1/16" dia	Diamond 120°	Ball 2.5mm dia
Total load in kg (inc. Initial load 10kgf)	60	100	150	187.5
Actual weight applied marked as	60kg	60kg 100kg	60kg 100kg 150kg	60kg 100kg 150kg 187.5kg
Pointer position on dial gauge	Outer Black Scale	Inner Red Scale	Outer Black Scale	
Suitable for	Tests of case hardened steel	Annealed or hardened and tempered steel. Non-ferrous metals	Annealed or hardened and tempered or case hardened steel.	Steel and Ferrous Metals

## Anexo 7.

Composicion quimica del acero estructural ASTM A 572 grado 50

Tomado de la norma ASTM A 572/A 572M – 04

### A 572/A 572M – 04

TABLE 1 Maximum Product Thickness or Size

Grade	Yield Point, min		Maximum Thickness or Size					
	ksi	[MPa]	Plates and Bars		Structural Shape Flange or Leg Thickness		Sheet Piling	Zees and Rolled Tees
			in.	[mm]	in.	[mm]		
42 [290] <sup>^</sup>	42	[290]	6	[150]	all	all	all	all
50 [345] <sup>^</sup>	50	[345]	4 <sup>#</sup>	[100] <sup>#</sup>	all	all	all	all
55 [380]	55	[380]	2	[50]	all	all	all	all
60 [415] <sup>^</sup>	60	[415]	1½ <sup>^</sup>	[32] <sup>^</sup>	2	[50]	all	all
65 [450]	65	[450]	1¼	[32]	2	[50]	not available	all

<sup>^</sup> In the above tabulation, Grades 42, 50, and 60 [290, 345, and 415], are the yield point levels most closely approximating a geometric progression pattern between 36 ksi [250 MPa], min, yield point steels covered by Specification A 36/A 36M and 100 ksi [690 MPa], min, yield strength steels covered by Specification A 514/A 514M.

<sup>#</sup> Round bars up to and including 11 in. [275 mm] in diameter are permitted.

<sup>^</sup> Round bars up to and including 3½ in. [90 mm] in diameter are permitted.

TABLE 2 Chemical Requirements<sup>^</sup>  
(Heat Analysis)

Diameter, Thickness, or Distance Between Parallel Faces, in. [mm] Plates and Bars	Structural Shape Flange or Leg Thickness, in. [mm]	Grade	Carbon, max, %	Manganese, <sup>#</sup> max, %	Phosphorus, max, %	Sulfur, max, %	Silicon	
							Plates to 1½ in. [40 mm] Thick, Shapes with Flange or Leg Thickness to 3 in. [75 mm] inclusive, Sheet Piling, Bars, Zees, and Rolled Tees <sup>^</sup>	Plates Over 1½ in. [40 mm] Thick and Shapes with Flange Thickness Over 3 in. [75 mm]