

Afectación en la resistencia a la fatiga en aceros inoxidable con juntas soldadas

Jhon Fredy González Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

Ingeniero Mecánico. Especialista en Evaluación y Gerencia de Proyectos

Codirector

Alberto David Pertuz Comas

PhD. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomécanicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

**Dedicatoria**

*A mi mamá Yanneth y a mi papá Henry quienes con su amor y apoyo incondicional dedicaron una gran parte de su vida a darnos a mi hermano y a mí lo que ellos no pudieron tener en su juventud.*

*A mi hermano Héctor Iván, al cual le deseo muchos éxitos en cualquier meta que se proponga.*

*A mis amigos con los que compartí mi tiempo en la universidad, Carlos Eduardo, Jhon Wilmar, Julián David, Daniella Sánchez, Brayan Gonzalo, Carlos Alberto, Jeison Alfonso, Jhonatan Fabian, Jeison Serrano, María Daniela y Laura Valentina, por las risas, las lágrimas y por los mejores años de mi vida.*

*A mi director de tesis Oscar Bohórquez, por su paciencia y sus valiosas enseñanzas durante este proceso, también a Lucho y Laurita, quienes me brindaron de su conocimiento y apoyo para sacar adelante este proyecto.*

*A mis amigos ajenos a la Universidad, Juanes y Juan David, por la música, las risas y los memorables momentos compartidos.*

*A mis abuelitos, por su amor, sabiduría, paciencia y enseñanzas que destacan en grandes aspectos de mi vida.*

**JHON FREDY GONZALEZ RODRIGUEZ**

### **Agradecimientos**

A mi director de tesis Oscar Bohórquez, por su constante revisión y supervisión a este proyecto, al semillero SIMA, con el cual se financio este proyecto, a mi codirector de tesis Alberto Pertuz, quien estuvo al tanto de todo lo relacionado al proyecto, al Director de la escuela de Ingeniería Mecánica Diego Fernando Villegas, por autorizar el uso de la maquina MTS BIONIX, donde se realizaron la mayor parte de las pruebas para este proyecto, a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, por prestar sus instalaciones para la preparación de muestras metalográficas.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico .....	15
2.1 Acero inoxidable 316L.....	15
2.1.1 Propiedades .....	15
2.1.2 Aceros Austeníticos .....	16
2.1.2.1 Austenita .....	16
2.1.2.2 Ferrita .....	16
2.2 Soldadura por arco con electrodo metálico bajo protección gaseosa GMAW (Gas Metal Arc Welding).....	16
2.3 Fatiga.....	17
2.3.1 Fractura por fatiga.....	18
2.3.2 Caracterización mecánica de la fatiga.....	19
2.3.3 Ensayos de fatiga .....	21
2.4 Diagramas de Shaeffler .....	22
2.4.1 Riesgo de agrietamiento en caliente .....	23
2.4.2 Fase Sigma .....	23
2.4.3 Crecimiento de grano .....	24
2.4.4 Agrietamiento en frío.....	24

2.5 Metalografía .....	24
2.5.1 Dendritas .....	24
2.5.2 Maclas de recocido .....	24
3. Metodología Experimental.....	25
3.1. Generación de probetas .....	25
3.2 Caracterización del material.....	30
3.2.1 Preparación para Micrografías .....	30
3.2.2 Ensayos de tracción.....	32
3.2.3 Ensayos de Fatiga .....	34
4. Resultados y discusión .....	39
4.1 Cambios microestructurales y diagramas de Shaeffler .....	39
4.1.1 Diagramas de Shaeffler.....	39
4.1.2 Micrografías.....	44
4.2 Ensayos de tracción.....	49
4.3 Ensayos de fatiga.....	55
4.4 Determinación del cambio de la resistencia a la fatiga en ambos materiales .....	59
5. Conclusiones.....	62
Referencias Bibliográficas .....	65

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Composición química del acero 316L .....	15
<b>Tabla 2.</b> Composición química de la placa de acero Inoxidable 316L .....	27
<b>Tabla 3.</b> Composición química del material de aporte AISI 316L .....	27
<b>Tabla 4</b> Parámetros para el proceso de soldadura .....	28
<b>Tabla 5.</b> Cromo y níquel equivalente .....	40
<b>Tabla 6.</b> Resultado de la mezcla entre la lámina y el material de aporte .....	42
<b>Tabla 7.</b> Valores de Esfuerzo de fluencia, módulos de Young y Esfuerzos Últimos .....	54
<b>Tabla 8.</b> Deformación plástica máxima alcanzada por cada proceso .....	55
<b>Tabla 9.</b> Fuerza Máxima y Fuerza Mínima para ensayos de probetas de Control .....	56
<b>Tabla 10.</b> Fuerza Máxima y Fuerza Mínima para ensayos de probetas de GMAW .....	56
<b>Tabla 11</b> Relación de Log(N) de GMAW vs CONTROL .....	60

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Esquema de modos de transferencia en el proceso de soldadura GMAW .....	17
<b>Figura 2.</b> Superficie de fractura por fatiga .....	18
<b>Figura 3.</b> Ciclo de carga .....	19
<b>Figura 4.</b> Tipos de carga .....	20
<b>Figura 5.</b> Diagrama de Shaeffler .....	22
<b>Figura 6.</b> Diagrama de Shaeffler con las secciones de defectos .....	23
<b>Figura 7.</b> Diagrama de metodología experimental.....	25
<b>Figura 8.</b> Medidas para soldeo de placas norma UNE EN ISO 15614-1:18 .....	26
<b>Figura 9.</b> Seccionado para la destinación de probetas de ensayos destructivos .....	26
<b>Figura 10.</b> Mezcla de gas de protección argón y dióxido de carbono .....	28
<b>Figura 11.</b> Cordón de soldadura.....	29
<b>Figura 12.</b> Penetración de la soldadura.....	29
<b>Figura 13.</b> Corte de las probetas en la lámina de acero inoxidable .....	30
<b>Figura 14.</b> Desbastadora de paño para pulido de probetas .....	31
<b>Figura 15.</b> Probetas de acero inoxidable en baquelita .....	32
<b>Figura 16.</b> Microscopio Óptico GX71 .....	32
<b>Figura 17.</b> Máquina de Ensayos Mecánicos MTS Bionix .....	33
<b>Figura 18.</b> Dimensiones de la probeta de tracción.....	33
<b>Figura 19.</b> Señal de SCOPE.....	36
<b>Figura 20.</b> Resultados fatiga a distintas velocidades .....	37

<b>Figura 21.</b> Dimensiones de la probeta de fatiga.....	37
<b>Figura 22.</b> Diagrama de Shaeffler.....	41
<b>Figura 23.</b> Diagrama de Shaeffler con zonas de defectos.....	42
<b>Figura 24.</b> Representación a detalle de dilución del cordón de soldadura.....	43
<b>Figura 25.</b> Control Acero AISI 316L a 200X.....	44
<b>Figura 26.</b> Raíz del cordón del proceso de GMAW a 50X.....	45
<b>Figura 27.</b> Presentación del cordón a 50X.....	45
<b>Figura 28.</b> ZAT de la presentación del cordón a 100X.....	46
<b>Figura 29.</b> ZAT de la raíz del cordón a 100X.....	47
<b>Figura 30.</b> MB proceso de GMAW a 200X.....	47
<b>Figura 31.</b> Zona de fusión a 200X.....	48
<b>Figura 32.</b> Curva de Esfuerzo vs Deformación para material de Control.....	49
<b>Figura 33.</b> Línea de tendencia de la zona elástica Control.....	50
<b>Figura 34.</b> Esfuerzo vs Deformación con corte en el esfuerzo de fluencia CONTROL.....	51
<b>Figura 35.</b> Curva de Esfuerzo vs Deformación para junta soldada de GMAW.....	52
<b>Figura 36.</b> Línea Tendencia de la Zona elástica GMAW.....	52
<b>Figura 37.</b> Esfuerzo vs Deformación con corte en el esfuerzo de fluencia GMAW.....	53
<b>Figura 38.</b> Probetas de tracción del proceso de soldadura GMAW ensayadas.....	54
<b>Figura 39.</b> Esfuerzo vs Log(N) para el material de control.....	57
<b>Figura 40.</b> Esfuerzo vs N en Logaritmo base 10 GMAW.....	58
<b>Figura 41.</b> Probetas del proceso de GMAW ensayadas.....	59
<b>Figura 42.</b> Comparación de GMAW vs Control con los mismos puntos de referencia.....	61

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Certificado de calidad Lamina de Acero Inoxidable AISI 316L

Apéndice B. Certificado de calidad Alambre de Acero Inoxidable AISI 316L

Apéndice C. Formato de propiedades de Diagrama de Shaeffler

Apéndice D. Formato de ensayos de Tracción para Control S<sub>Y</sub>

Apéndice E. Formato de ensayos de Tracción para GMAW S<sub>Y</sub>

Apéndice F. Formato de ensayos de Fatiga GMAW y Control

Apéndice G. Plano probeta de tracción

Apéndice H. Plano probeta de Fatiga

### Resumen

**Título:** Afectación en la resistencia a la fatiga en aceros inoxidable con juntas soldadas\*

**Autor:** Jhon Fredy González Rodríguez \*\*

**Palabras Clave:** acero inoxidable, soldadura, propiedades mecánicas, fatiga, microestructura.

**Descripción:** El acero inoxidable tiene propiedades muy útiles para muchas áreas de investigación y producción. El acero inoxidable, puede tener utilidad en joyería, generación de energía, medicina, industria automotriz, etc. Por otro lado, dentro de su implementación y uso, el acero inoxidable necesita experimentar condiciones críticas, explorando sus límites para maximizar su utilización. Las uniones soldadas presentan cualidades diferentes a las del material preliminar, ya sea que provenga de procesos extractivos o de conformado. Para determinar estas propiedades, se propuso llevar las uniones desarrolladas a condiciones críticas a través de ensayos mecánicos de tracción, donde fue posible obtener su resistencia a la fluencia y otras propiedades fundamentales para su posterior utilización. En este trabajo también se propuso conocer cómo cambian las propiedades de las uniones soldadas con respecto al material de control. Se obtuvo el comportamiento para ensayos de fatiga con tensiones cercanas a la de fluencia y con relaciones de carga en sistema tracción-tracción. Las probetas se obtuvieron a partir de la aplicación del proceso de soldadura GMAW en placas de acero inoxidable 316L y bajo parámetros estandarizados de la normativa de construcción vigente. El material de aporte es metalúrgicamente similar para evitar fluctuaciones asociadas a la condición del fenómeno multifísico generado. La obtención de probetas se realizó evitando su afectación térmica después del proceso de soldadura. Se obtuvieron resultados de ensayos de fatiga que permitieron la generación de gráficas comparativas entre el material soldado y el material control mediante el modelo de Basquin a lo largo de cuatro niveles de tensión asociados al límite de fluencia, en los que se visibilizó como cambia la resistencia a la fatiga del proceso de soldadura en comparación al material base.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. Ingeniero Mecánico. Especialista en Evaluación y Gerencia de Proyectos. Codirector: Alberto David Pertuz Comas. PhD Ingeniería Mecánica.

### Abstract

**Title:** Affect on mechanical properties of stainless Steel-welded joints\*

**Author:** Jhon Fredy Gonzalez Rodriguez\*\*

**Key Words:** stainless steel, welding, mechanical properties, fatigue, microstructure.

**Description:** Stainless steel has especially useful properties for many areas of research and production. Stainless steel can be useful in jewelry, power generation, medicine, automotive industry, etc. On the other hand, within its implementation and use, stainless steel needs to experience critical conditions, exploring its limits to maximize its utilization. The welded joints present different qualities from those of the preliminary material, whether it comes from extractive or forming processes. To determine these properties, it was proposed to take the developed joints to critical conditions through tensile mechanical tests, where it was possible to obtain their creep resistance and other fundamental properties for their later use. In this work, it was also proposed to know how the properties of the welded joints change with respect to the control material. The behavior was obtained for fatigue tests with stresses close to the creep stress and with load ratios in tensile-traction system. The specimens were obtained from the application of the GMAW welding process on 316L stainless steel plates and under standardized parameters of the construction regulations in force. The filler material is metallurgically similar to avoid fluctuations associated to the condition of the generated multiphysical phenomenon. The specimens were obtained avoiding their thermal affectation after the welding process. Fatigue test results were obtained which allowed the generation of comparative graphs between the welded material and the control material by means of the Basquin model along four stress levels associated to the yield stress, in which it was possible to see how the fatigue resistance of the welding process changes in comparison to the base material.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physycal Mechanic. School of Mechanical Engineering. Director: Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra. Mechanical engineer. Project Evaluation and Management Specialist. Co-director: Alberto David Pertuz Comas. PhD. Mechanical Engineering

## Introducción

El acero es un material fundamental en la industria, sus usos pueden variar desde su implementación como material de construcción o como componente principal para la fabricación de herramientas y piezas mecánicas, una variante de este material es el acero inoxidable, el cual posee cualidades parecidas a las del acero convencional, pero con un agregado de funciones más específicas. Un ejemplo de uso de este elemento es la industria alimentaria que aprovecha muy bien sus propiedades, facilitando su limpieza y evita que los alimentos sean contaminados por residuos causados por corrosión, además de este tipo de aprovechamiento (Phillips, 2016) asegura que este tipo de acero tiene utilidades en la joyería, generación energética, construcción, medicina, industria automotriz, etc.

Varias de estas funciones requieren que el material sea llevado a condiciones críticas, este tipo de condiciones se pueden controlar buscando evitar la falla al implementar el acero. Debido a lo anterior para obtener las propiedades mecánicas de diseño de un material se debe experimentar y comparar.

La fatiga es un fenómeno que las normas ASTM definen como un proceso en el cual su estructura presenta un cambio permanente, este cambio es progresivo y localizado, ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones variables. En algún punto produce la rotura en forma de grieta luego de un determinado número de fluctuaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior y las áreas de trabajo del acero inoxidable, se presenta la junta soldada como una buena solución para el manejo de este tipo de acero en el montaje y diseño de una máquina, la soldadura es un método muy versátil y práctico, la AWS (American Welding Society) menciona que una de las ventajas de la soldadura es que esta presenta buena maleabilidad, pueden soportar choques y vibraciones fuertes.

Por otra parte, según (González De León et al., 2008), una junta soldada sometida a resistencia a la fatiga es variable y depende de su diseño. La calidad del trabajo realizado en la soldadura resulta ser un factor que se debe tener en cuenta en futuras conclusiones, entonces, para medir esta calidad una vez más se necesita de la experimentación y llevar a condiciones extremas el material, validando bajo condiciones estándar siguiendo las normativas existentes, también se busca averiguar el nivel de afectación que recibe el material y que puede llegar a limitar su uso en condiciones controladas.

Con lo anterior, en busca de una respuesta, se experimenta con el material, comparando el material base y el material soldado, llevándolo a sus condiciones críticas, para esto primero se deben realizar ensayos de tracción, este ensayo destructivo entrega los datos necesarios para el ensayo de fatiga el cual se realiza a rangos de bajo ciclo.

Por otra parte, los cambios microestructurales que se presentan en el material cuando este se afecta térmicamente son importantes, ya que estos confirman las propiedades mecánicas del acero, por lo tanto, la comparación de su cambio microestructural y su correcto análisis serán una base importante para futuros trabajos en el área de materiales e ingeniería de diseño, también una porción importante de esta investigación tendrá resultados que podrán ser enfocados en el ahorro de materiales, generando beneficios económicos y facilidad de transporte de piezas manufacturadas. La finalidad del presente trabajo es determinar cómo se ve afectado el acero inoxidable 316L sometido a fatiga en una junta soldada con el método de GMAW y también se busca aclarar comparativamente como se afecta su microestructura haciendo su análisis con los diagramas de Schaeffler.

## **1. Objetivos**

En el marco del cumplimiento del propósito de este proyecto se plantean los siguientes objetivos.

### **1.1 Objetivo General**

Examinar la afectación en la resistencia a la fatiga en acero inoxidable 316L en rangos de bajo ciclo con juntas soldadas por el método de GMAW

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Generar probetas soldadas de acero inoxidable 316L bajo el proceso de soldadura GMAW, con junta plana a tope, bajo la norma AWS D1.1 versión 2020, para extraer probetas de fatiga bajo la norma ASTM E466 y probetas para análisis microestructural bajo la norma ASTM E3.
- Determinar el cambio de la resistencia a la fatiga en juntas soldadas de acero inoxidable 316L, bajo la norma ASTM E466 respecto al material de control.
- Relacionar los cambios microestructurales que se presentan en el material a partir de los diagramas de Schaeffler y los ciclos térmicos generados por la soldadura.

## 2. Marco Teórico

Basados en el planteamiento de objetivos se realiza la presentación de los temas fundamentales y relevantes para el desarrollo del proyecto.

### 2.1 Acero inoxidable 316L

Existen tres categorías de aceros inoxidables: martensíticos, ferríticos y austeníticos. El acero inoxidable 316L, que se utilizará en este proyecto, pertenece a la categoría austenítica. A continuación, se explicarán algunas características y propiedades importantes de este tipo de acero.

#### 2.1.1 Propiedades

Este acero tiene una gran capacidad para resistir la corrosión gracias a su contenido de molibdeno, lo cual le brinda una alta resistencia a los ácidos no oxidables y a la corrosión por picado. Normalmente usado en la industria de la celulosa, la farmacéutica, etc.(DIPAC, 2010) Sus usos son variados y para distintos mercados e industrias, es popular por sus propiedades mecánicas y facilidades de limpieza.

También es conocido por tener una cantidad de carbono menor comparado con el Acero inoxidable 316, este tiene una concentración de carbono  $\leq 0.03$  como se observa en la Tabla 1, lo que hace que cuente con una capacidad de reducir las posibilidades de precipitación de carburo intergranular, también aumenta la resistencia a la corrosión intergranular con el uso de estabilizadores como el niobio o el titanio.

**Tabla 1.**  
*Composición química del acero 316L*

Calidad	C	Cr	Mo	Ni
316L	$\leq 0.03$	16.5 – 18.5	2 – 2.5	10 - 13

*Nota:* Las características que se muestran en la anterior tabla son los datos ideales para un acero inoxidable AISI 316L. Tomado de *Catálogo Comercial AISI 316/316L* (p.1), por (ThyssenKrupp S.A., 2022)

### **2.1.2 Aceros Austeníticos**

Los aceros austeníticos tienen estructuras mayormente conformadas de austenita y pequeñas porciones de ferrita, estos exhiben una excelente resistencia a la corrosión, este tipo de acero también ofrece un buen equilibrio entre tenacidad y ductilidad, con la desventaja de que son más caros que un acero martensítico, contiene elementos como el níquel que estabiliza la austenita a temperatura ambiente. (Phillips, 2016)

#### **2.1.2.1 Austenita**

La austenita es la fase más compacta de los aceros, compuesta por una solución sólida de carbono en hierro gamma. A temperatura ambiente no es una estructura estable, sin embargo, hay aceros con contenido de cromo-níquel conocidos como austeníticos, que mantienen la estructura de austenita a temperatura ambiente. (Federación de enseñanza de Andalucía, 2011)

#### **2.1.2.2 Ferrita**

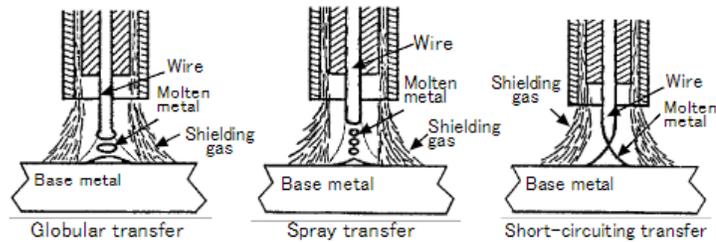
La ferrita es un material magnético compuesto de hierro, boro y bario, y es el componente más suave de los aceros. Es menos dura que la austenita, pero más plástica, y tiene un límite máximo de contenido de carbono de 0.03%. La distancia entre sus átomos es de 2.86 ángstrom. (Federación de enseñanza de Andalucía, 2011)

## **2.2 Soldadura por arco con electrodo metálico bajo protección gaseosa GMAW (Gas Metal Arc Welding)**

Es un proceso automático o semiautomático, a veces, se refieren a este proceso como MIG, según (Castellanos-González et al., 2021), en nuestra región en sus inicios solo se usaba con gases inertes como el argón Ar y el helio He. Existen tres formas de transferencia de metal fundido, las cuales son; 1 Transferencia Globular, 2. Transferencia de rociado y 3 Transferencia de corto circuito, la Figura 1 muestra un esquema de cómo son vistas de un corte frontal.

**Figura 1.**

*Esquema de modos de transferencia en el proceso de soldadura GMAW*



*Nota:* Tomado de *Essential Factors in Gas Metal Arc Welding* (p.15), por Kita-Shinagawa & Ku, 2011

Cuando se habla de la transferencia globular y la transferencia de rociado en soldadura GMAW, también se les conoce como "transferencia de vuelo libre", debido a que los metales fundidos se transfieren mientras están en el aire con el arco. Sin embargo, la transferencia por corto circuito se disocia de las dos anteriores por el hecho de que los metales penetran la punta del electrodo. (Kita-Shinagawa & Ku, 2011)

### 2.3 Fatiga

Muchos de los objetos o herramientas que usamos en el día a día tienen una vida útil ya establecida, esto debido a que ciertos materiales que componen a dicha herramienta con el tiempo se ven afectados, un ejemplo de esto puede ser un eje, es un elemento mecánico, que se ve sometido a fuerzas de torsión y flexión, son cargas combinadas que ejercen en él un desgaste que genera una pérdida en la resistencia.

Básicamente la fatiga representa entonces la pérdida de resistencia de un material provocado por una aplicación de cargas repetitivas, un ensayo que se aplica normalmente cuando se requiere estudiar la resistencia a la fatiga de un material es el que fue concebido por A Wöhler (1819-1914), el ensayo consiste en someter una probeta lisa a una carga variable de amplitud

constante, con esto se determina el número de ciclos necesarios que llevará al material a la fisura por fatiga. (de Vedia & Svoboda, 2002)

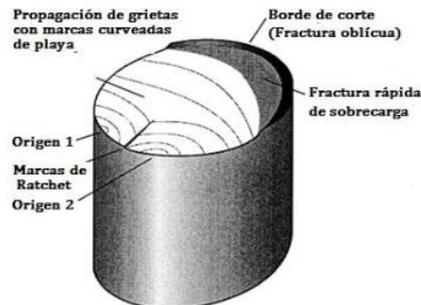
De acuerdo con el autor Jorge Luis González en su libro "Metalurgia Mecánica", existen tres condiciones que deben cumplirse para que se produzca la fatiga. Si alguna de estas condiciones no se cumple, la fatiga no se producirá.

- Se requiere la presencia de un esfuerzo que sea muy elevado pero que no supere la resistencia máxima del material.
- Una variación o fluctuación del esfuerzo mayor a un valor dado llamado límite de fatiga.
- Un número suficiente de ciclos de carga.

### 2.3.1 Fractura por fatiga

Cuando se presenta una fractura por fatiga las principales características de este tipo se exponen en la Figura 2.

**Figura 2.**  
*Superficie de fractura por fatiga*



*Nota:* Tomado de *Análisis del Comportamiento a Fatiga en Flexión Rotativa de un Acero AISI SAE 1018 en Ambientes Corrosivos* (p. 32), por Paguay Alvarado, 2011

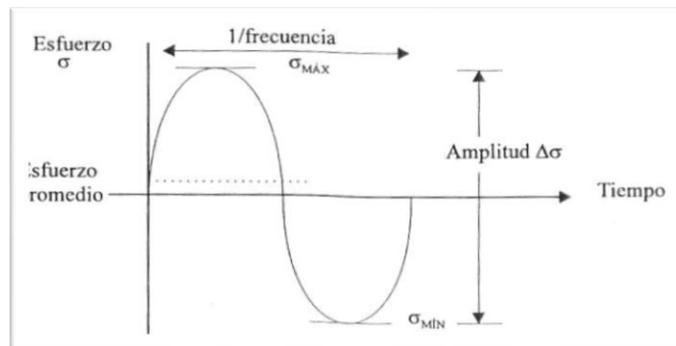
La zona de fractura puede ser dividida en tres zonas:

- **Zona de inicio:** No presentan rasgos sobresalientes, son superficies que normalmente son lisas, planas, brillantes y con pocas líneas, donde se aprecian pequeños escalones debido a la nucleación de varias grietas al tiempo (González, 2003)
- **Propagación de la grieta:** Según Leboreiro Enríquez (2019), la grieta empieza a crecer a medida que aumentan los ciclos de carga, la dirección de propagación se favorece en dirección perpendicular a la tensión aplicada, esto viene con lo que se ve en la figura como las marcas de playa por su parecido a las marcas que deja el mar en la arena de la playa.
- **Zona de fractura final:** La fractura ocurre cuando la grieta crece de manera inestable hasta que se produce una separación repentina del material, lo que resulta en una superficie de fractura con aspecto rugoso y mate y, a menudo, con una inclinación de 45 grados. (Gutiérrez, 2018)

### 2.3.2 Caracterización mecánica de la fatiga

La fatiga es definida por los ciclos de carga que un material soporta, y su comportamiento está relacionado con tres factores principales: la amplitud, la frecuencia y el esfuerzo promedio, los cuales son ilustrados en la Figura 3.

**Figura 3.**  
*Ciclo de carga*



*Nota:* Tomado de *Metalúrgica Mecánica* (p. 191), por González, 2003

La amplitud del ciclo de carga se define como la diferencia entre los esfuerzos máximos y mínimos según se muestra en la ecuación (1)

$$\Delta\sigma = \sigma_{MAX} - \sigma_{MIN} \quad (1)$$

Entonces su esfuerzo promedio es la ecuación (2)

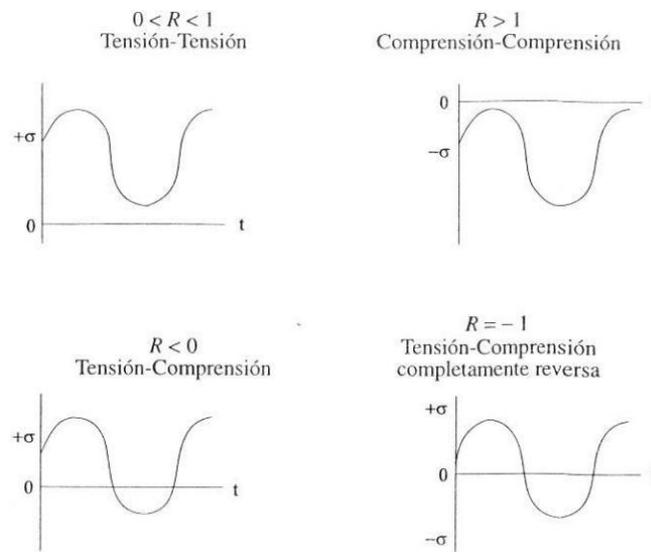
$$\sigma = (\sigma_{MAX} + \sigma_{MIN})/2 \quad (2)$$

La amplitud y el esfuerzo promedio no son siempre indicadores claros de cómo se aplican los esfuerzos en un ciclo de carga. Para describir el ciclo de carga de manera más precisa, se utiliza la relación R, que se presenta en la ecuación (3).

$$R = \frac{\sigma_{MIN}}{\sigma_{MAX}} \quad (3)$$

Un valor de R puede indicar cuál es el tipo de ciclo de carga que se usó, como se puede observar en la figura 4, se definió un  $R=0.1$  en el apartado 3.2.3 se hablará más acerca del tema.

**Figura 4.**  
*Tipos de carga*



*Nota:* Tomado de *Metalúrgica Mecánica* (p. 192), por González, 2003

### 2.3.3 Ensayos de fatiga

En una escala macroscópica, la falla comienza en forma de mínima grieta, en una esquina o poro que se presenta por defectos del material, esta gradualmente va aumentando, con las repeticiones de esfuerzo excesivo, luego llega al final de la rotura como se explicó en la figura 2. (Gonzalez Solarte & Diaz Valencia, 1997)

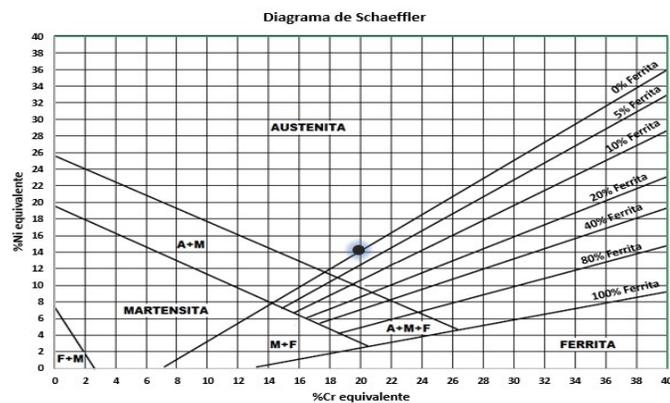
- **Prueba en equipos o estructuras reales:** Esta prueba se efectúa en un componente que se encuentra instalado y en operación bajo condiciones de servicio reales, y su finalidad es conocer el historial de carga del componente, raramente se lleva a la falla durante el proceso. (González, 2003)
- **Ensayo de deformación-vida sobre probetas pequeñas:** Es el ensayo de fatiga que se realiza bajo la normativa ASTM E466, entregando respuesta del material, el uso de los resultados pretende la predicción de la vida del componente. (Guerrero & Chapetti, 2020)
- **Pruebas de laboratorio normalizadas:** El procedimiento a seguir para estas pruebas se encuentra completamente estandarizado, las normas más comunes son las ASTM (American Society for Testing Materials).
- **Pruebas de vida S-N:** Esta prueba se realiza rompiendo varias probetas idénticas, con unas cargas aplicadas, que fueron seleccionadas de tal manera que produzcan esfuerzos que vayan desde bastante arriba, hasta ligeramente debajo del límite de fatiga esperado, algunas fallaran después de  $10^6$  ciclos. (Gonzalez Solarte & Díaz Valencia, 1997)
- **Fatiga de bajos ciclos:** El régimen de fatiga de bajo ciclo se caracteriza por altos niveles de tensión cíclica que superan el límite elástico de resistencia del material

comúnmente se acepta entre  $10^4$  y  $10^5$  ciclos, se trata de trazar en escala logarítmica en el rango de deformación total, frente al número de ciclos hasta el fallo. (Parida, 2001)

## 2.4 Diagramas de Shaeffler

Este diagrama se obtuvo de forma empírica por primera vez en 1947 por Anton Shaeffler, fue mejorado hasta obtener lo que se conoce actualmente como el diagrama de Shaeffler, el cual con la composición química del material permite determinar su estructura y predice que material se formara con la soldadura. (Morales Iles, 2009)

**Figura 5.**  
*Diagrama de Shaeffler*



*Nota:* Tomado de *Uso del diagrama de Shaeffler para el Soldeo*, por Gracia, 2020

Es necesario conocer la composición química del material, según (INDURA S.A., 2007), estos valores se reemplazan en las siguientes fórmulas. Este proceso se realiza para el material base y para material de aporte.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 * (\%Si) + 0.5 * (\%Nb) \quad (4)$$

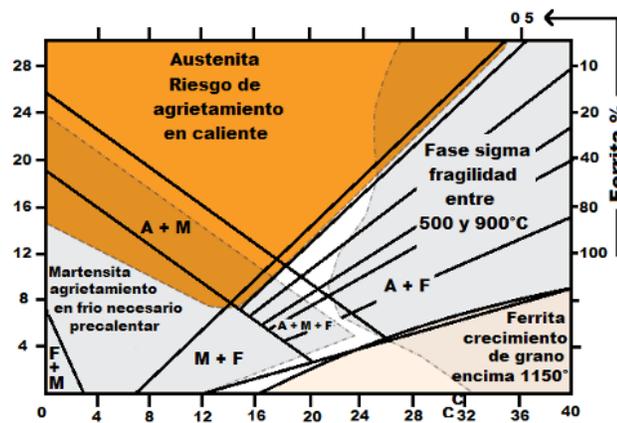
$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 * (\%C) + 0.5 * (\%Mn) \quad (5)$$

Las ecuaciones 4 y 5 se usan para ubicar en que punto se encuentra el material en el diagrama de Shaeffler. Cuando se sueldan materiales con la misma composición química, el punto

resultante se ubicará en la línea trazada por los dos puntos anteriores, pero su ubicación específica dependerá del grado de dilución utilizado en el proceso de soldadura. Para procesos de arco manual, se asume normalmente un valor del 30% de dilución, lo que significa que el material base contribuye con un 30% a la mezcla resultante. (Ospina López et al., 2007)

### Figura 6.

Diagrama de Shaeffler con las secciones de defectos



Nota: Tomado de *Analysis of stainless steel weldability with medium and low carbon by SMAW steel* (p. 94), por (Marulanda Arevalo et al., 2013)

#### 2.4.1 Riesgo de agrietamiento en caliente

Este agrietamiento se produce por la deformación acumulada a causa de la realización del cordón de soldadura, por la restricción que se tiene en el material por evitar deformaciones, cuando se está soldando. (Mendoza Bravo et al., 2015)

#### 2.4.2 Fase Sigma

Una gran desventaja para las propiedades mecánicas de esta fase es la de tener como particularidad ser dura y frágil. Se precipita inicialmente en los bordes de grano de ferrita, luego crece hacia el interior de fase ferrítica y se ve favorecida por el alto contenido en elementos promotores de la fase de ferrita especialmente el cromo y el molibdeno. (Agredo Gutierrez, 2017)

### **2.4.3 Crecimiento de grano**

La distribución de grano en el metal de soldadura puede influir en sus propiedades térmicas. La creación de granos finos y equiaxiales en la zona de fusión tiene dos beneficios. En primer lugar, un tamaño de grano pequeño disminuye la tendencia a la formación de grietas durante la soldadura. En segundo lugar, un tamaño de grano pequeño mejora las propiedades mecánicas de la soldadura, incluyendo la ductilidad y resistencia a la fractura. (Garcia Custodio, 2013)

### **2.4.4 Agrietamiento en frío**

Los agrietamientos en frío se producen en soldaduras de acero al carbono y de baja aleación, pueden ocurrir tanto en soldaduras a tope como en soldaduras en ángulo. (KOBE STEEL, 2008)

## **2.5 Metalografía**

Para los análisis metalográficos a realizar en este trabajo se deben definir algunos conceptos pertinentes a la ciencia de la metalografía, que están relacionados a los resultados obtenidos para la conclusión de este proyecto.

### **2.5.1 Dendritas**

Las dendritas son cristales que tienen una configuración de tipo arborescente, la cual se vuelve más evidente en metales fundidos que son lentamente enfriados, se da en condiciones fuera del equilibrio. Puede ser perjudicial para las propiedades mecánicas. (Caravaca, 2012)

### **2.5.2 Maclas de recocido**

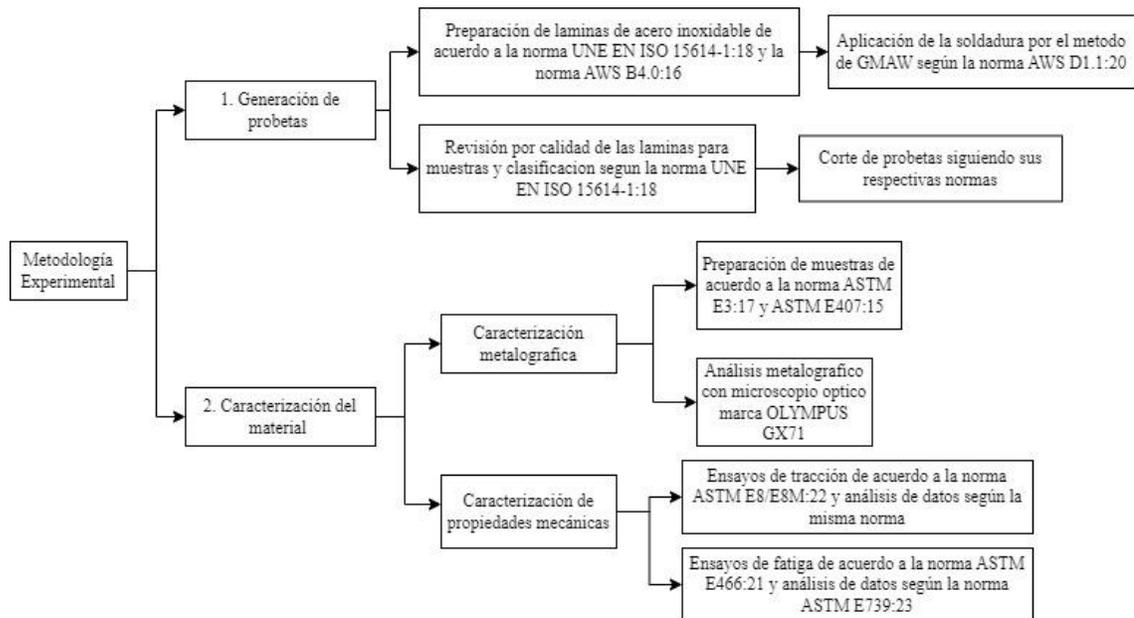
Se puede entender como la unión de dos áreas en un grano o cristal de metal en las que la dirección cristalográfica de una es similar a la dirección de la otra. Estas uniones se forman después de la recristalización del metal sólido durante el proceso de recocido. (Gil-Crespo, 2009)

### 3. Metodología Experimental

Este proyecto se planteó con una metodología experimental que requirió de dos etapas: generación de probetas y caracterización del material. En la figura 7 se ilustra una descripción del desarrollo experimental propuesto.

**Figura 7.**

*Diagrama de metodología experimental*

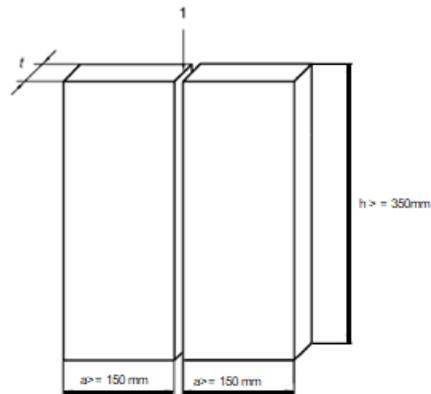


#### 3.1. Generación de probetas

El material base utilizado fue una lámina de acero con unas dimensiones de 1524 x 3048 mm y un espesor de 4.5 mm, se requirió de cortes de cizallamiento hidráulico para unas medidas en las placas de 150x505mm siguiendo las indicaciones de la normativa UNE-EN ISO 15614-1:18, como se muestra en la Figura 8, además, se garantizó que las láminas a soldar fueran consecutivas respecto al corte, marcándolas como pares buscando siempre la homogeneidad en las propiedades mecánicas del material base, según la normativa AWS B4.0:16.

**Figura 8.**

*Medidas para soldeo de placas norma UNE EN ISO 15614-1:18*

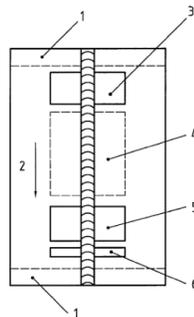


*Nota: Tomado de UNE-EN ISO 15614-1:18 Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos (p.10), por AENOR, 2005*

Por otra parte, el estándar UNE-EN ISO 15614-1:18 también especifica que los extremos de la lámina soldada deben ser descartados, esto es porque el arco no estabiliza su comportamiento en la zona inicial y final. Adicionalmente, estipula que secciones de la placa irán destinadas para cada ensayo mecánico, como se muestra en la Figura 9.

**Figura 9.**

*Seccionado para la destinación de probetas de ensayos destructivos*



*Nota: Tomado de UNE-EN ISO 15614-1:18 Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos (p.14), por AENOR, 2005*

La sección 1 de la Figura 9 debe ser descartada según lo explicado anteriormente, específicamente son 25mm. La sección 2 indica la dirección de soldeo, la sección 3, se destina para probetas de tracción o probetas de doblado, la zona 4 tiene como objetivo las probetas de ensayos dinámicos como fatiga, la zona 5 nuevamente con los ensayos de tracción y doblado, la zona 6 es para las probetas de ensayos de dureza y macrografías.

Se realizó una junta plana a tope precalificada con penetración completa utilizando soldadura de GMAW de modo de transferencia en spray con un soldador certificado, siguiendo los estándares de la norma AWS D1.1 versión 2020. En la sección 7.21 de este estándar se especifica que la junta debe ser cuidadosamente alineada, el desplazamiento de la alineación teórica no debe ser mayor al 10% de la parte más delgada unida, tampoco debe superar los 3mm, la medición del desplazamiento se realiza desde la línea central de la pieza. A continuación, se presentan en la Tabla 2 y la Tabla 3 las características de la lámina de acero y del material de aporte.

**Tabla 2.**

*Composición química de la placa de acero Inoxidable 316L*

Composición química lámina Acero de AISI 316L								
C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Nb %
0.021	0.5	1.39	0.034	0.001	17.3	10	2.04	0.036

*Nota:* la composición contiene los datos Necesarios para la revisión del cambio del material después del soldar

**Tabla 3.**

*Composición química del material de aporte AISI 316L*

Composición Química del Material de aporte AISI 316L					
C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %
0.02	0.5	1.8	18.5	12.3	2.8

*Nota:* El material de aporte a pesar de ser similar al material que se desea soldar se observa una diferencia en el porcentaje de Niquel y de Cromo, esto varía dependiendo de cada fabricante.

El proceso de soldadura se ejecutó con un sistema electromecánico automático con desplazamiento constante, se garantizó una velocidad de avance constante de 120 mm/min, sobre una superficie horizontal, el material de aporte para la soldadura debe ser de características similares o superiores a las del material base. Por lo tanto, se optó por un alambre de acero inoxidable 316L, también se usó una mezcla de gas entre Ar-CO<sub>2</sub>. En la Figura 10 se aprecia la presión a la que la mezcla de gas para el proceso de soldadura fue de 100 kg/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 4**  
*Parámetros para el proceso de soldadura*

Proceso de soldadura	Voltaje [V]	Amperaje [Amp]	Polaridad	Flujo gas [lpm]	Técnica	Vel. Avance [mm/min]
GMAW	22.5	130	DCEP	20	Arrastre	120

*Nota:* los parámetros de soldadura como el voltaje y amperaje fueron obtenidos

experimentalmente, partiendo de rangos establecidos por el proveedor de material de aporte.

**Figura 10.**  
*Mezcla de gas de protección argón y dióxido de carbono*



*Nota:* la mezcla del gas de protección tiene un 75% de argón y 25% de dióxido de carbono.

Al finalizar el proceso de soldadura se buscaron imperfecciones superficiales en el cordón realizado, buscando garantizar probetas libres de impurezas para evitar efectos no deseados en los ensayos mecánicos. Por otra parte, como se mencionó anteriormente, se descartaron 25mm a cada extremo del cordón de soldadura siguiendo indicaciones de la norma UNE EN ISO 15614-1, en la Figura 11 se aprecia como el inicio del cordón se vio afectado y en la Figura 12 se aprecia la penetración de la soldadura.

**Figura 11.**

*Cordón de soldadura*



*Nota:* en el lado derecho de la lamina de acero se observa una luz donde se descartaron los 25mm para el corte.

**Figura 12.**

*Penetración de la soldadura*

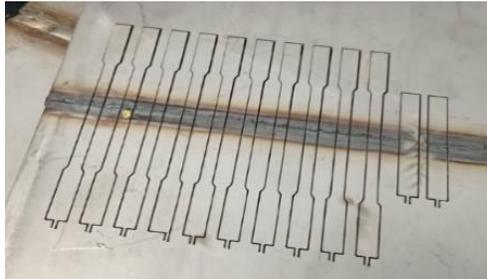


*Nota:* Al garantizar los estándares de la Norma AWS B4.0:16, el resultado es un cordón con mayor probabilidad de penetración y sin desviaciones visibles.

La placa se limpió meticulosamente con un cepillo de acero inoxidable para retirar impurezas causadas por el procedimiento como se ve en la Figura 12. Para el corte de las probetas se buscó impedir que las muestras fueran afectadas térmicamente, por lo tanto, se optó por el método de corte por chorro de agua, el cual cuenta con una calidad y precisión muy alta. El corte de las probetas se hizo siguiendo las normas ASTM E466:21 para fatiga y para las probetas de tracción ASTM E8/E8M:22. En la Figura 13 se puede observar un ejemplo de corte para probetas de tracción y micrografías.

**Figura 13.**

*Corte de las probetas en la lámina de acero inoxidable*



*Nota:* En la imagen se aprecian probetas para ensayos de tracción y micrografías.

### **3.2 Caracterización del material**

La caracterización del material se dividió en dos partes la caracterización metalográfica y la caracterización de propiedades mecánicas, este es el paso para seguir luego de la inspección y corte de probetas de acuerdo con las normativas de cada uno de los siguientes procesos.

#### **3.2.1 Preparación para Micrografías**

Para las micrografías se contó con la probeta del material base y la probeta con la junta soldada. En la preparación de muestras fue necesario el corte de material proveniente de probetas,

bajo esquemas que no generan afectación térmica sobre las estructuras generadas por la soldadura. Fueron insertadas en baquelita, para su facilidad de manejo, siguiendo el estándar ASTM E3:22, con la preparación anterior lista se procedió a pulir. El desbastado se hizo de forma manual con papeles abrasivos desde #60 hasta #1200 según el estándar ANSI y añadiendo agua para retirar residuos e imperfecciones obteniendo superficies tipo espejo, se prosigió con la desbastadora de paño de marca BUEHLER de la Figura 14 y pasta de alúmina  $Al_2O_3$  para el pulido final.

**Figura 14.**

*Desbastadora de paño para pulido de probetas*



*Nota:* La probeta debe mantenerse firme en el contacto con el paño para evitar golpes que afecten la metalografía.

Se atacaron las probetas con el reactivo compuesto por ácido clorhídrico HCl y ácido pícrico  $C_6H_2OH(NO_2)_3$ , preparado con 100 ml de ácido clorhídrico por 1 gramo de ácido pícrico por un rango de tiempo de 14 segundos según la norma ASTM E407, se aplicó lavado con agua y alcohol isopropílico y secado con aire caliente. Todo esto siguiendo también la norma para montaje de muestras metalográficas ASTM E3:17, donde se establece que se debe garantizar una correcta manipulación para preparación de análisis óptico. Por lo cual se fundieron en baquelita como se observa en la Figura 15.

**Figura 15.**

*Probetas de acero inoxidable en baquelita*



*Nota:* en la imagen se puede apreciar la zona de la soldadura con un tono distinto al del acero de control

El análisis metalográfico se realizó en el Microscopio Óptico GX71 de marca Olympus de la Figura 16, de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, el pulido y desbastado de las probetas también se realizó en los laboratorios de esta escuela.

**Figura 16.**

*Microscopio Óptico GX71*



*Nota:* Los microscopios cuentan con un computador, en la cual se manipula el lente y permite el análisis de las muestras.

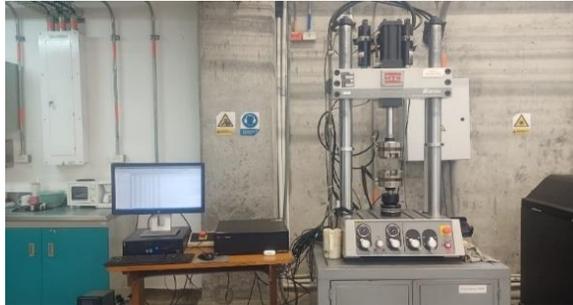
### **3.2.2 Ensayos de tracción**

De la obtención de probetas se procesaron veinte de tracción, diez para el material de control de acero sin junta soldada y diez con la junta soldada. Los ensayos se llevaron a cabo en la máquina MTS Bionix que se ve en la Figura 17 del laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela

de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, que cuenta con el software MULTIPURPOSE®. El ensayo se llevó a cabo con una velocidad de 4mm/min, llevando las probetas a su falla.

**Figura 17.**

*Máquina de Ensayos Mecánicos MTS Bionix*

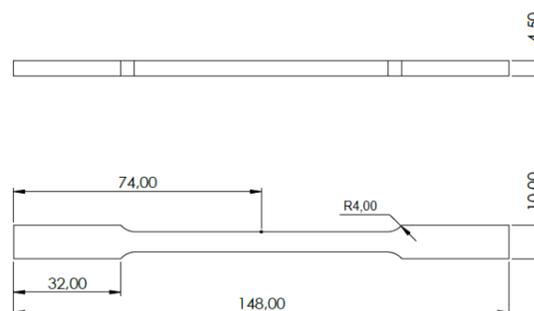


*Nota:* La máquina MTS, se encuentra ubicada en el laboratorio 007 de la escuela de ingeniería mecánica.

La velocidad del ensayo se ve especificada por la norma ASTM E8/E8M:22, que establece que la velocidad de la prueba se define por el 5% de su longitud en mm/min, por lo tanto, se obtuvo que  $0.05 * 76 \text{ mm} = 3.8 \text{ mm/min}$ , los 76 mm son la longitud de trabajo de la probeta de tracción, en la Figura 18 se observa el esquemático de la figura cortada también por chorro de agua.

**Figura 18.**

*Dimensiones de la probeta de tracción*



*Nota:* Dimensiones de probeta siguiendo la norma ASTM E8/E8M

Cuando se obtuvieron los datos de los ensayos de tracción se procedió a su análisis. Se utilizaron herramientas como Excel junto con la aplicación del modelo offset descrito en la norma ASTM E8:22, se obtuvo el esfuerzo de fluencia del material tanto en control, como con la junta soldada de GMAW.

### 3.2.3 Ensayos de Fatiga

En los ensayos de fatiga se contó con cuarenta probetas en total, veinte para el material de control y veinte para el proceso de soldadura GMAW. La cantidad de estas probetas dependió de lo que se pretendió para el ensayo de fatiga. Este ensayo se llevó a cabo en cuatro niveles de esfuerzo, 95%, 90%, 85% y 80% del esfuerzo de fluencia hallado en la prueba de tracción. En la ejecución de las pruebas se requirió del uso de la MTS Bionix al igual que con los ensayos de tracción. Fueron considerados estos niveles de esfuerzo ya que valores inferiores reflejan en los resultados presentados posteriormente un comportamiento de resistencia a la fatiga superior a  $10^6$  ciclos. Por lo cual, se entraría en régimen de altos ciclos. Los valores de esfuerzo programado para el ensayo se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5.**

*Fuerza Máxima y Fuerza Mínima para ensayos de probetas de Control*

Nivel	$F_{max}$ [N]	$F_{min}$ [N]
0.95	7592.4	759.24
0.9	7192.8	719.28
0.85	6793.2	679.32
0.8	6393.6	639.36

*Nota:* los datos de la tabla fueron extraídos de la sección 4.3 resultados de tracción

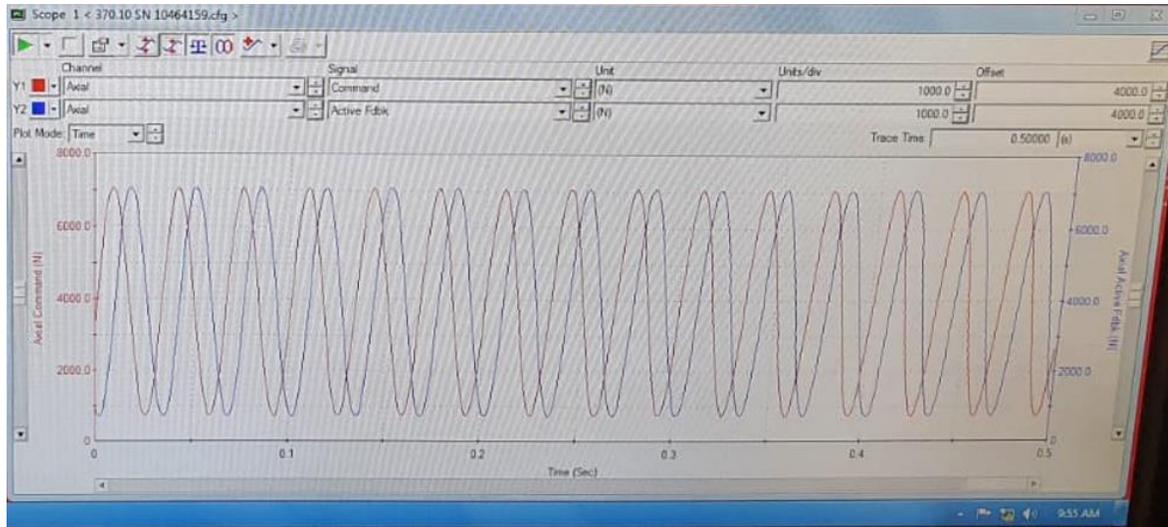
Como tarea principal se definió cual parámetro se deseaba controlar. Según la norma ASTM E466:21 se pueden realizar ensayos controlando deformación o fuerza. La carga puede ser de compresión o tracción. Para los ensayos de fatiga de este proyecto se controló fuerza con tipo

de carga tensión-tensión, asemejando al presentado en la Figura 4 y se definió  $R=0.1$ , sometiendo el elemento a dos cargas cíclicas repetidas, hasta que la probeta alcanzó el fallo. Este escenario simula la situación en la que un cuerpo, en su estado inicial, soporta su propio peso, que equivale al 10% del valor total. Sobre este peso que es constante se aplicó una carga adicional de tracción, lo que permitió simular un valor que se aproxima a la realidad o es medianamente real.

Por otra parte, la máquina necesitó de un proceso de TUNING, este es un ajuste previo para realizar el ensayo de fatiga. Es importante porque se requieren datos de PID con los cuales el controlador definirá de forma precisa la señal que estará recibiendo y enviando a la máquina desde el computador. Los datos de entrada para iniciar el TUNING son amplitud y el punto medio de la fuerza, que se definió con el esfuerzo de fluencia dependiendo de su nivel de esfuerzo. Para medir la precisión de la máquina mientras se realiza el TUNING se requirió del uso de la herramienta SCOPE como se aprecia en la Figura 19. Que se obtiene del STATION MANAGER de la MTS. El SCOPE permite visualizar la señal de comando y la señal que recibió la máquina, por lo tanto, modificando los datos de PID se pretendió que las dos señales estuvieran sincronizadas.

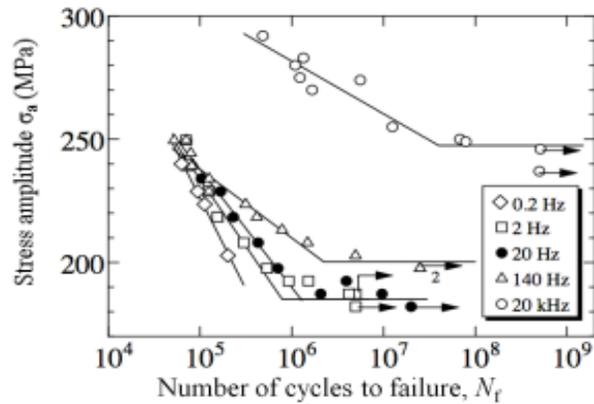
Este proceso es recomendado ejecutarlo iniciando en baja frecuencia de la aplicación de ciclos, esto para lograr estabilizar las señales, previo a la condición final de la prueba. Para el ensayo de las probetas de control y las de soldadura de GMAW se inició desde 1 Hz hasta 40 Hz, aumentando 5 Hz cada vez que se sincronizaban las curvas de comando y respuesta del PID.

**Figura 19.**  
*Señal de SCOPE*



*Nota:* La señal se encuentra desfasada para una mejor apreciación del ejemplo, la ejecución fue para una probeta de GMAW de acero inoxidable en su último nivel de esfuerzo.

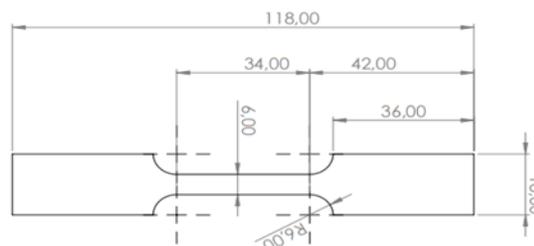
Cuando se llegó a la máxima velocidad deseada para el ensayo se procedió a iniciar el proceso desde el MULTIPURPOSE®, este es el software de la máquina que ayuda a la recopilación de datos que arroja la celda de la maquina durante la realización de una prueba. Las variables de entrada más importantes para la puesta en marcha del ensayo de fatiga son la fuerza máxima, la fuerza la mínima y la velocidad. Como se aclaró anteriormente los ensayos se realizaron a 40Hz, lo cual se puede definir como una velocidad baja teniendo en cuenta la investigación de Guennec (Guennec et al., 2013), en la cual realizaron ensayos de fatiga en condiciones similares cambiando la velocidad del ensayo, apenas se nota un cambio al llegar a los 140 Hz como se ve en la Figura 20.

**Figura 20.***Resultados fatiga a distintas velocidades*

*Nota:* Tomado de *Effect of Loading Frequency in Fatigue Properties and Micro-Plasticity Behavior of JIS S15C Low Carbon Steel* (p. 3), por (Guenec et al., 2013)

En la Figura 20, se representan ensayos de fatiga cambiando su frecuencia, entre 2 Hz y 20 Hz, los resultados en este rango son similares, se aprecia una diferencia cuando aumenta su velocidad de ensayo a 140 Hz.

El resultado o variables arrojadas por el ensayo fueron el número de ciclos resistivos y los niveles de esfuerzo alcanzados que en esencia se calculan desde el nivel de carga o fuerza máxima con relación al área más delgada de la probeta, que se aprecia en la figura 21.

**Figura 21.***Dimensiones de la probeta de fatiga*

*Nota:* probeta con medidas según la norma ASTM E466/21

Es habitual que los datos de fatiga se trabajen con modelos que permiten hacer una distribución y aceptación de lo que ocurre por la dispersión de datos. Esto quiere decir que se debe hallar una ecuación que reproduce un grupo de puntos que representan las pruebas realizadas en ese nivel de esfuerzo, esto es lo que se conoce como corrección Weibull, pero existen otros métodos que, con modelos de distribución normal, exponencial o logarítmica, muestran otra tendencia de datos.

En este trabajo se aplicó la norma ASTM E739/23 que define graficar los valores del logaritmo base 10 del número de ciclos registrado, para luego trazar una distribución normal, promediando el número de datos, para obtener un solo punto por nivel de esfuerzo. (ASTM international, 2010)

Es importante aclarar que el objetivo principal de este apartado de fatiga es analizar el comportamiento variado de una pieza que fue soldada versus el de una pieza sin junta soldada, por lo tanto, para este trabajo no se planteó como propósito encontrar la resistencia a la fatiga.

#### 4. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas al material comparando sus propiedades. También se discuten estos resultados esperando llegar a conclusiones relevantes de esta investigación.

##### 4.1 Cambios microestructurales y diagramas de Shaeffler

Para este apartado de estudio se pretende evidenciar como se vio afectada la forma microestructural del elemento en su material de control y con el proceso de soldadura. En los análisis se aprecian tres zonas de gran importancia dentro del material y estas son, la zona de fusión ZF, la zona afectada térmicamente ZAT y el material base MB.

###### 4.1.1 Diagramas de Shaeffler

Se tuvo en cuenta cómo cambio el material por la soldadura desde el análisis realizado a un diagrama de Shaeffler. Para visualizar este cambio, se revisó la composición del material base y del material de aporte.

En el diagrama de Shaeffler se necesita ubicar el punto en el que se encuentra el acero inoxidable para un análisis más profundo, para esto se requiere calcular el  $Cr_{eq}$  y el  $Ni_{eq}$ , para hallar estos valores se tienen las ecuaciones 4 y 5.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 * (\%Si) + 0.5 * (\%Nb) \quad (4)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 * (\%C) + 0.5 * (\%Mn) \quad (5)$$

Por lo tanto, al reemplazar con las propiedades que se expusieron en la tabla 2.

$$Cr_{eq} = 17.3 + 2.04 + 1.5 * (0.5) + 0.5 * (0.036) = 20.108$$

$$Ni_{eq} = 10 + 30 * (0.021) + 0.5 * (1.39) = 11.325$$

Ahora se presentan las propiedades del material de aporte.

Siguiendo las ecuaciones 4 y 5 se reemplaza con las propiedades de la tabla 3.

$$Cr_{eq} = 18.5 + 2.8 + 1.5 * (0.5) + 0.5 * (0) = 22.05$$

$$Ni_{eq} = 12.3 + 30 * (0.02) + 0.5 * (1.8) = 13.8$$

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los puntos de ubicación del material base y del material de aporte en el diagrama de Shaeffler, con los parámetros obtenidos de cromo y níquel equivalente.

**Tabla 5.**  
*Cromo y níquel equivalente*

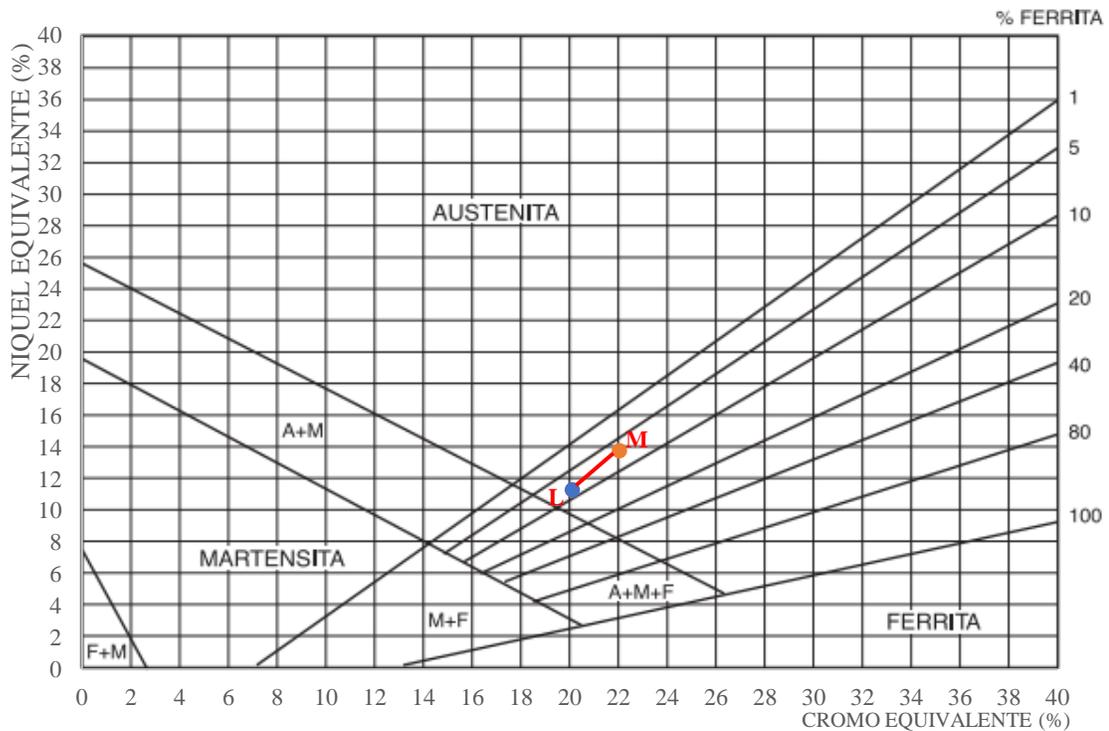
	Lamina	Aporte
Cr <sub>eq</sub>	20.108	22.05
Ni <sub>eq</sub>	11.325	13.8

*Nota:* Con los datos del cromo y níquel equivalente se puede proceder a ubicar en el diagrama de Shaeffler.

En las anteriores tablas se aprecia que el cambio entre los materiales es mínimo, esto es por que en la soldadura se deben escoger materiales de propiedades similares o mejores al material base, por que la aplicación de depósito de material crea una zona afectada térmicamente, en la cual, su microestructura y propiedades mecánicas pueden cambiar, al elegir un material de aporte con propiedades mecánicas inferiores a las del material base, se corre riesgo de crear una unión débil que puede fallar durante servicio.

En la Figura 22 se aprecian los puntos donde se encuentran ubicados la lámina y el material de aporte en el diagrama de Shaeffler, para este caso el punto de la lámina está representado por la letra L y el material de aporte se representa por la letra A. También se observa la divergencia entre los materiales del proceso de soldadura.

**Figura 22.**  
*Diagrama de Shaeffler*



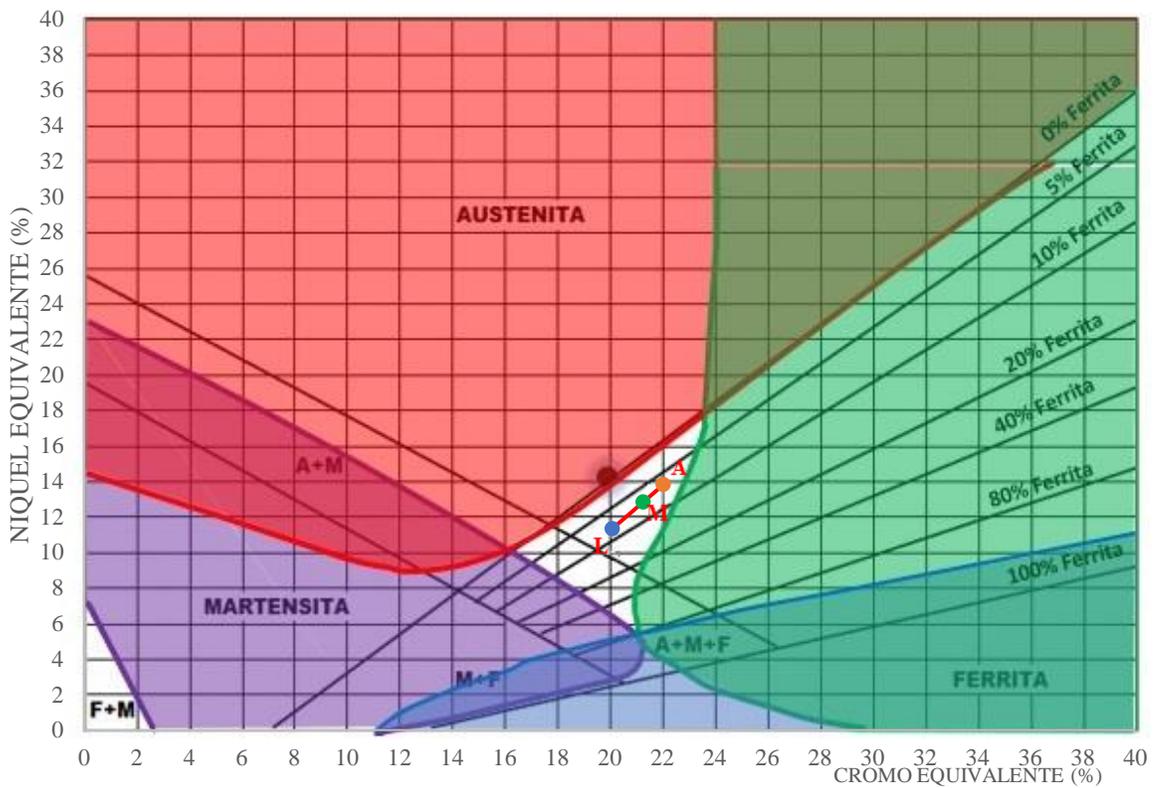
*Nota:* Diagrama adaptado de *El Acero Inoxidable y la Industria Alimentaria*, por FoodProtec Panamá, 2021

Otro factor para tener en cuenta es el porcentaje de dilución del material esto depende del tipo de gas de protección que se usó en el proceso de soldadura, para el caso de este proyecto como ya se mencionó en la sección 3.1 se dio uso a una mezcla de 75% Argón y 25% CO<sub>2</sub>. Para un proceso de soldadura de GMAW, Ospina López et al., (2007), presentan un porcentaje de dilución del 39.7% esto quiere decir que la lámina de acero inoxidable o metal base colabora con 39.7% de la unión y el metal de aporte con el 60.3%. En la Figura 23 se ubica el resultante entre ambos materiales.

En el diagrama se encuentran zonas de defectos, la zona roja representa el riesgo de fisuración en caliente por encima de 1250°C, la zona verde representa el riesgo de fragilidad (por

fase sigma) entre 500 y 900°C, la zona azul representa crecimiento de grano por encima de 1150°C y por último la zona de color morado representa fisuración por temple por debajo de 400°C. En la Tabla 6 se presenta el resultado de la mezcla causada por la soldadura.

**Figura 23.**  
*Diagrama de Shaeffler con zonas de defectos*



*Nota:* Diagrama adaptado de *Uso del Diagrama de Shaeffler para el Soldeo*, por Gracia, 2020

**Tabla 6.**  
*Resultado de la mezcla entre la lámina y el material de aporte*

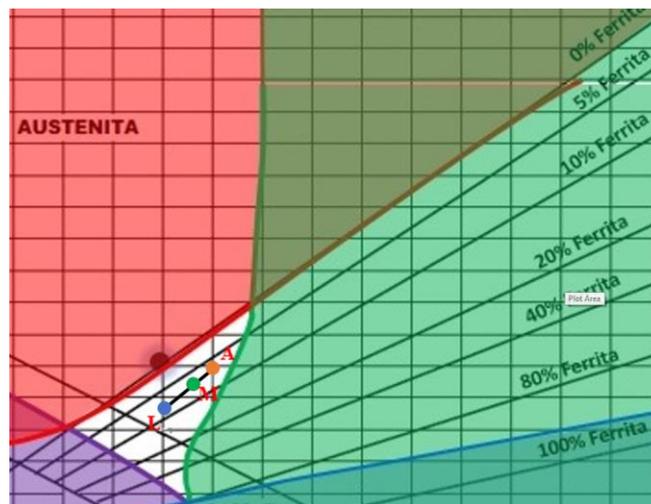
Mezcla	
Cr <sub>eq</sub>	21.27903
Ni <sub>eq</sub>	12.81743

*Nota:* en la figura 23 este se encuentra representado por la letra M

El acero inoxidable 316L es austenítico, esto quiere decir que representa el grupo más grande entre los aceros inoxidables, por lo tanto, se producen en mayor cantidad que cualquiera de otro grado. Las microestructuras de estos aceros son mayormente austeníticas, sin embargo, este puede contener pequeñas cantidades de ferrita. (Phillips, 2016). En la figura 24 se confirma lo dicho por la teoría, por otra parte, se hizo una buena elección de material de aporte dejando a la unión soldada resultante libre de la zona de defectos.

**Figura 24.**

*Representación a detalle de dilución del cordón de soldadura*



*Nota:* En el detalle de esta gráfica se encuentra demostrado que el resultante del cordón depositado tiene aproximadamente un 7% de ferrita, además de que este se encuentra libre de defectos, en la zona segura, demostrando que este proceso de soldadura y su resultante son seguros y libres de las fallas presentadas en la Figura 23.

Según lo anterior se confirma que, por ser un acero austenítico, puede tener bajos porcentajes de ferrita tal y como se observó en la Figura 24, donde se aprecia un aproximado del 7% de ferrita en el material resultante de la mezcla del material de aporte y la lámina de material base.

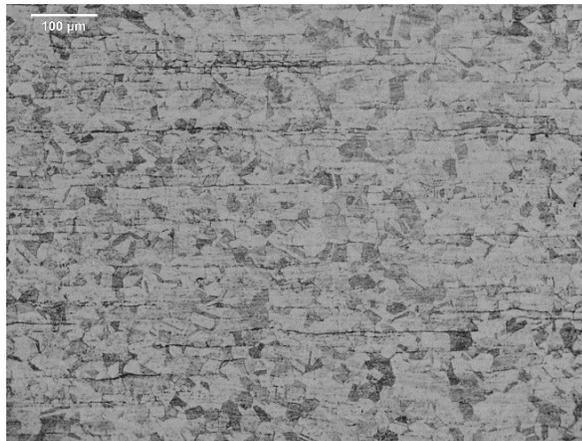
Según David H. Phillips (Phillips, 2016), un problema con los aceros austeníticos es la fractura de solidificación, sin embargo, cuando se observa el punto M en la figura 24 se encuentra que este se encuentra exento de esta condición y también de otros fallos que se dan por la soldadura.

#### 4.1.2 Micrografías

Se tomaron imágenes de las probetas de control y del proceso de soldadura por arco eléctrico de GMAW, con una variedad de lentes de aumento para apreciar a mejor detalle sus microestructuras. Se inicio tomando la micrografía del material de control de la Figura 25.

**Figura 25.**

*Control Acero AISI 316L a 200X*



*Nota:* La orientación laminar que se observa en la imagen evidencia que es un acero trabajado en frío.

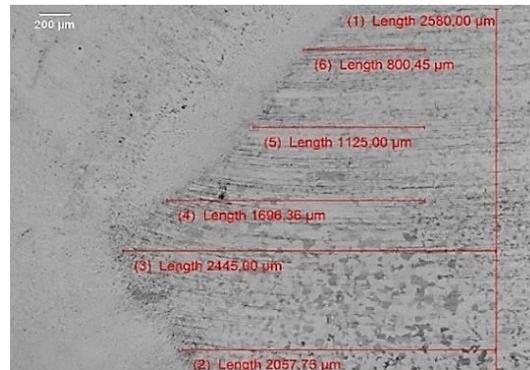
Se observa en la Figura 25 al metal constituido por granos equiaxiales, también hay presencia de maclas que son agrupaciones de varios cristales de un mismo material. (Salán & Anglada, 2005)

Un acero trabajado en frío es un material que fue previamente deformado, esto se hace para aumentar dureza y resistencia, pero al recibir este tratamiento se tiene como consecuencia la disminución de su resistencia a la corrosión. (UDDEHOLM, 2018)

Como ya se aclaró es un acero con alta concentración de austenita, que cuenta con un pequeño porcentaje de ferrita en su microestructura, según lo presentado en la figura 23. Por otra parte, se tomaron medidas a escala en la micrografía de la Figura 26.

**Figura 26.**

*Raíz del cordón del proceso de GMAW a 50X*

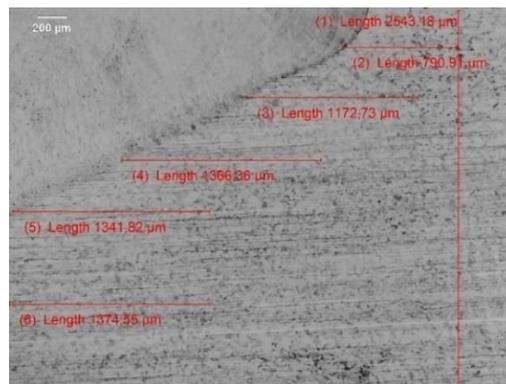


*Nota:* Se observa lo que se conoce como la base de la soldadura, se entiende que este es el inicio de deposición de material sobre el metal base y su inicio en la mezcla entre estos.

En la raíz del cordón se aprecia una longitud máxima de 2.445 mm, esta medida se tomó desde que se visualiza un cambio en la figura 26, en esta parte se trazó una línea. Se observa también un mayor tamaño de grano al presentado en la zona de fusión de la muestra. Además, se estableció una escala en la presentación del cordón de soldadura como se observa en la Figura 27.

**Figura 27.**

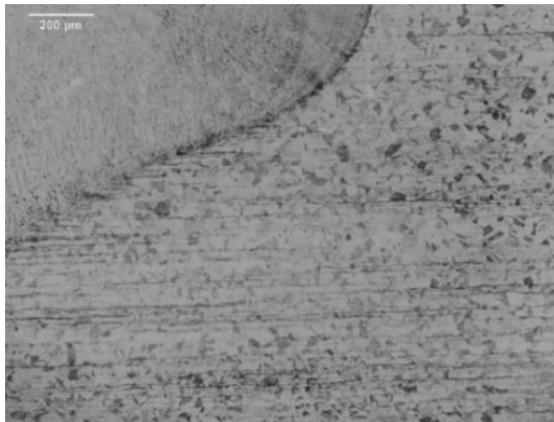
*Presentación del cordón a 50X*



Nota: en la imagen se aprecia su morfología de austenita dendrítica columnar del lado izquierdo de la imagen

En la presentación del cordón se observa cómo cambia su estructura entre el material base y el material de aporte, para este caso a la izquierda hay una estructura que se ve laminar, esta sección por lo visto en la Figura 26 es el material de control. Entre los dos materiales, se aprecia también una buena penetración para tener más detalle se capturó con el microscopio óptico la Figura 28 de esta misma sección.

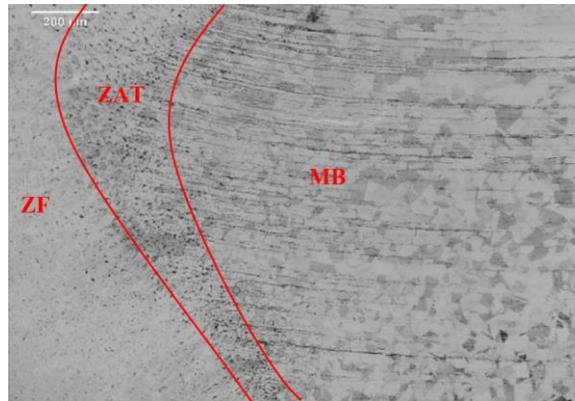
**Figura 28.**  
*ZAT de la presentación del cordón a 100X*



*Nota:* Fuente, el autor

A continuación, en la Figura 29 se presenta la zona afectada térmicamente de la raíz del cordón de soldadura. La ZAT es un área que ha sido sometida a altas temperaturas durante el proceso de deposición de material fundido, esta parte de la probeta no alcanzó su punto de fusión, pero si se afectó térmicamente, por lo tanto, sus propiedades mecánicas cambiaron en este punto y su rendimiento como material de servicio se pudo perjudicar.

**Figura 29.**  
*ZAT de la raíz del cordón a 100X*



*Nota:* Fuente, el autor

Por otra parte la zona de la union entre el material base y la zona de fusión presenta unas zonas oscurecidas que se pueden confundir con poros o inclusiones, pero en realidad son suciedades presentes en la microestructura. Además se observa una pequeña curvatura en el material base que esta proximo al ZAT, distinta a la que se presenta en la micrografia de la Figura 30.

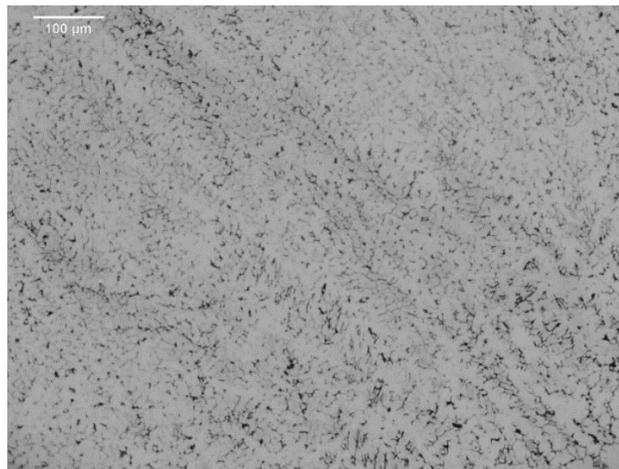
**Figura 30.**  
*MB proceso de GMAW a 200X*



*Nota:* Fuente, el autor.

Se ve que la conformación del material base en la probeta del proceso de GMAW tiene una microestructura similar a la que se presentó en la Figura 25 de la probeta de control con el mismo lente. El área que se inspecciono a continuación fue la zona de fusión, esta se aprecia a detalle en la Figura 31.

**Figura 31.**  
*Zona de fusión a 200X*



*Nota:* La microestructura presente en la ZF corresponde a austenita dendrítica columnar, con una muy buena definición de las dendritas.

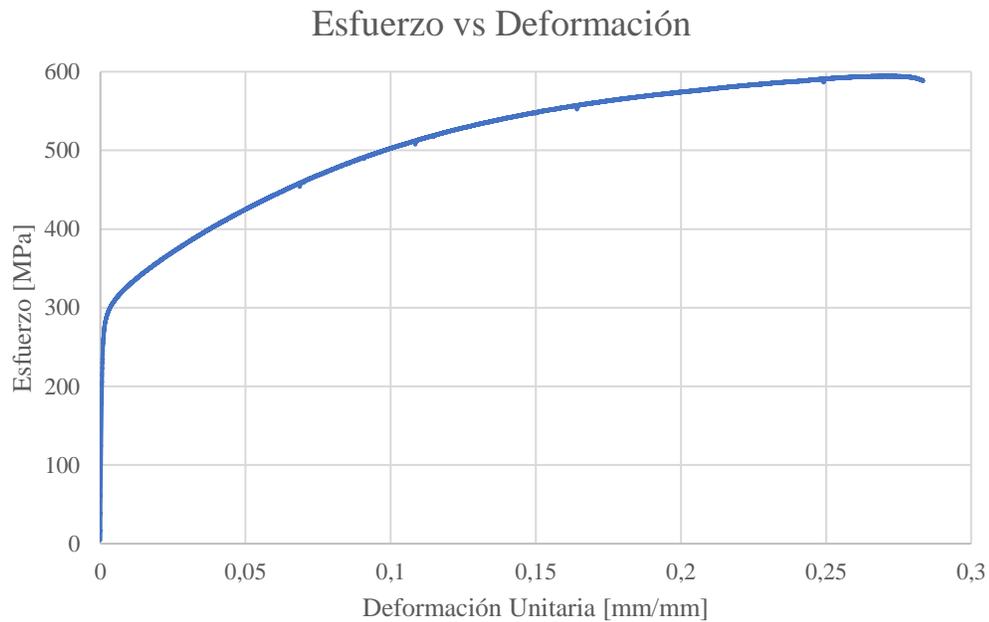
La austenita dendrítica columnar es un tipo de estructura de grano que se forma durante el proceso de solidificación. (Rodríguez-Suárez et al., 2018) Los granos se presentan con una forma dendrítica que crece de forma preferencial, formando columnas. Comparando esta zona con el material base, se observa que hay una interrupción en la dirección de los granos del material, por lo tanto, puede ocasionar posibles roturas en la unión de las dos zonas.

## 4.2 Ensayos de tracción

Del análisis de datos se obtuvo la gráfica de esfuerzo en MPa vs deformación unitaria en mm/mm que se aprecia en la Figura 32 para obtener el Esfuerzo de fluencia.

### Figura 32.

*Curva de Esfuerzo vs Deformación para material de Control*



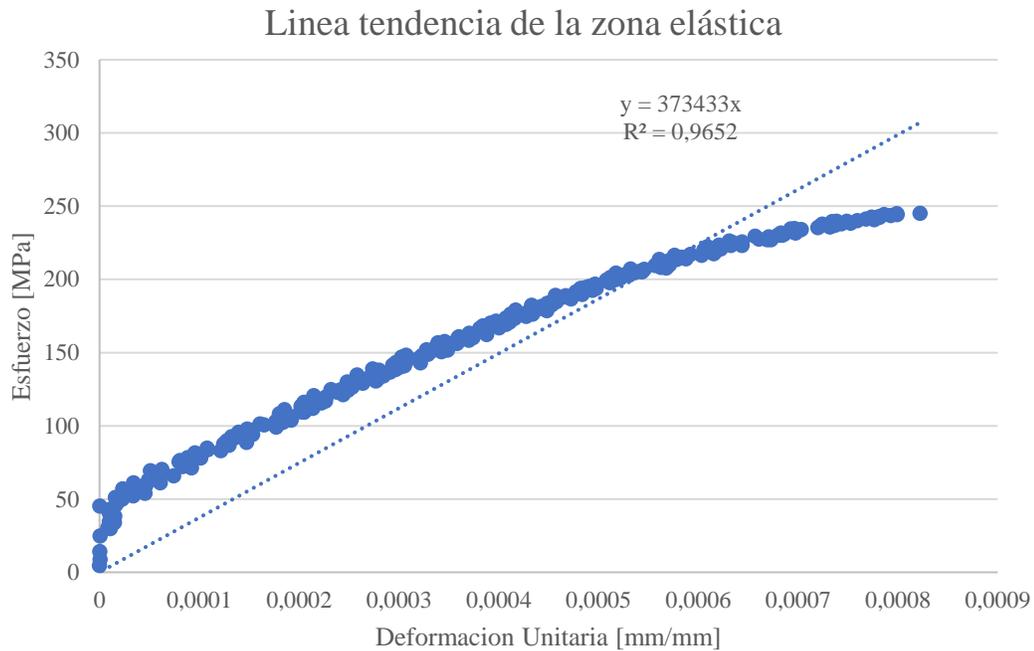
*Nota:* Curva obtenida experimentalmente de los ensayos de tracción para el material de control por el autor

Con la anterior información se puede determinar el esfuerzo de fluencia, gracias a la norma ASTM E8/E8M:22 con el método conocido como modelo offset. Con esta herramienta se considera como límite elástico a la tensión a la cual el material tiene una deformación plástica del 0.2%. Esto quiere decir que para seguir el método se debe tener en cuenta la línea de tendencia que se forma en la zona elástica de la Figura 32. En la pendiente de la zona elástica encontramos el módulo de elasticidad, en la Figura 33 se representó un modelo de la zona elástica de la probeta

de control, este módulo se utilizó para establecer parámetros para el ensayo de fatiga, junto con el esfuerzo de fluencia o comúnmente conocido como el  $S_Y$  (yield strength).

**Figura 33.**

*Línea de tendencia de la zona elástica Control*

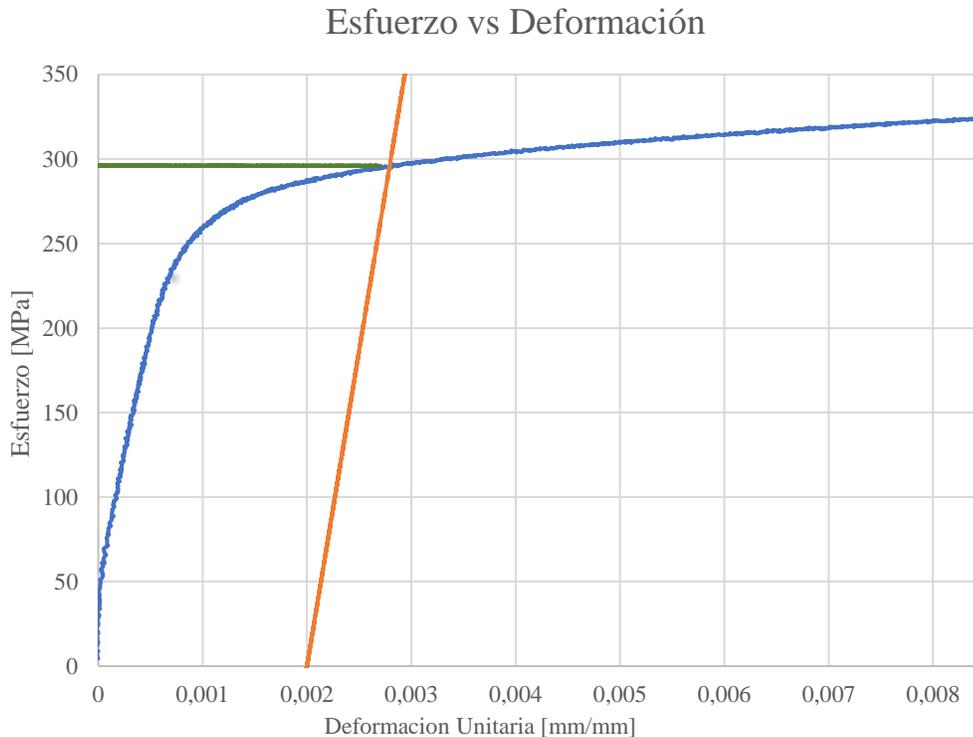


*Nota:* La línea de tendencia y su ecuación entregan el módulo de elasticidad, este es la pendiente de la ecuación de la línea,  $E = 373433$  GPa.

Al hallar el módulo de Young se obtuvo una función que define aproximadamente la zona elástica del material de control, esta aproximación nos permite crear una nueva función que sea paralela a la zona elástica, como se representó en la Figura 34, la cual definirá en que parte de la gráfica de esfuerzo vs deformación se encuentra el  $S_Y$  o esfuerzo de fluencia del material sin soldar. Esto se hace teniendo en cuenta que la norma ASTM E8 habla de que el límite elástico del material estará en el 0.2%, esto quiere decir que a partir de ahí habrá deformación plástica.

**Figura 34.**

*Esfuerzo vs Deformación con corte en el esfuerzo de fluencia CONTROL*



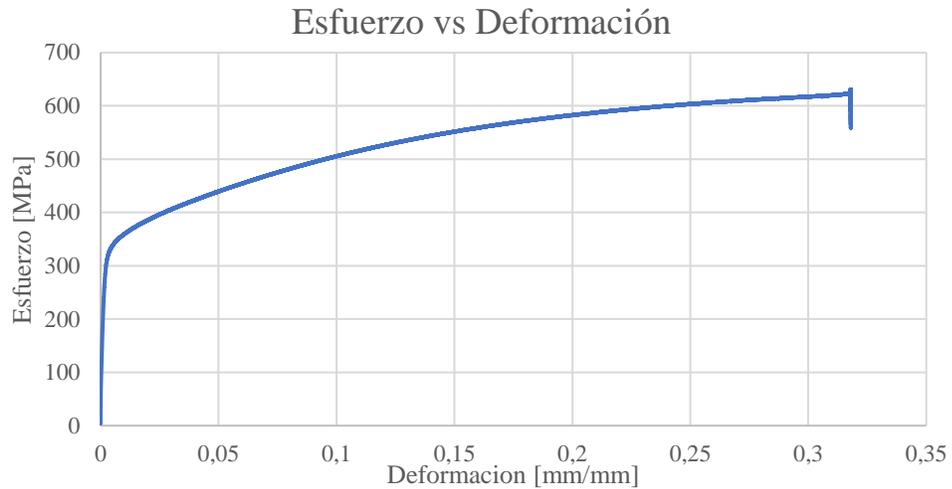
*Nota:* La línea verde que se presenta en la gráfica muestra el corte en el cual se encuentra el  $S_y$  del material. El corte se da en 296 MPa.

Para el tratamiento de datos se realizó un documento en Excel en donde se tuvieron todos los resultados y cálculos pertinentes al proceso de tracción de las probetas de control y las de GMAW. A continuación, se realizó el mismo proceso de cálculo de  $S_y$  para las probetas ensayadas con el método de soldadura GMAW.

En la figura 35 se presenta el resultado de la gráfica de esfuerzo versus deformación para el material de junta soldada de GMAW.

**Figura 35.**

*Curva de Esfuerzo vs Deformación para junta soldada de GMAW*

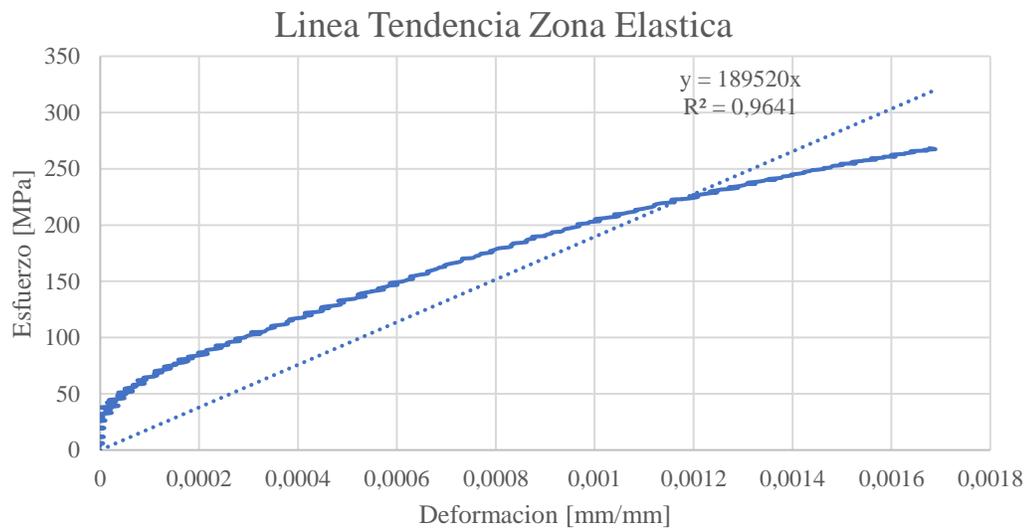


*Nota:* Curva obtenida de los ensayos de tracción al material soldado de GMAW.

En la figura 36 se presenta la línea pendiente de la zona elástica del material con junta soldada de GMAW.

**Figura 36.**

*Línea Tendencia de la Zona elástica GMAW*

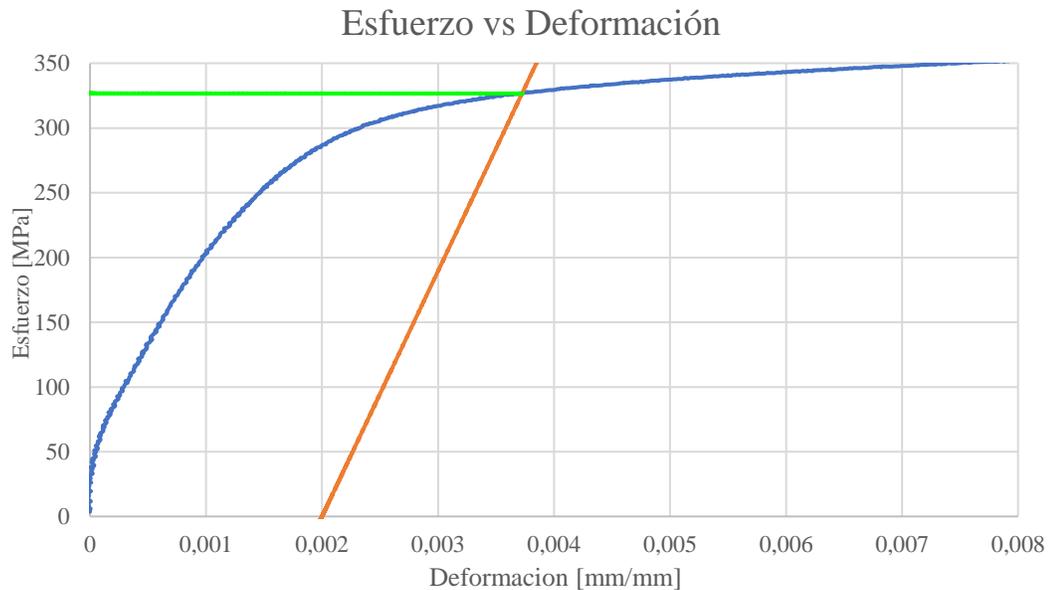


*Nota:* la línea de tendencia y su ecuación entregan el módulo de Young, este es la pendiente de la ecuación de la línea,  $E = 189520$  GPa.

Finalmente se representó en la figura 37 el resultado para el valor de esfuerzo de fluencia para el material de junta soldada.

**Figura 37.**

*Esfuerzo vs Deformación con corte en el esfuerzo de fluencia GMAW*



*Nota:* La línea verde que se presenta en la gráfica muestra el corte en el cual se encuentra el  $S_y$  del material, a partir de este punto el material recibe daños permanentes, el corte se da en 326.74 MPa.

Por otra parte, los ensayos de tracción para el proceso de GMAW en la Figura 38 evidencian que ninguno de las probetas fallo en la junta soldada, esto sucede porque durante el proceso de soldadura, el calor y la energía aplicada para unir ambas placas alteraron su microestructura en la zona cercana a la soldadura, lo que pudo provocar una reducción a la resistencia mecánica y la ductilidad del material.

Además, la zona afectada por calor del material se vuelve más susceptible a la fractura, por la formación de tensiones residuales, causando concentradores de esfuerzos lo que da lugar a formación de grietas y eventualmente al fallo del material.(Askeland et al., 2013)

**Figura 38.**

*Probetas de tracción del proceso de soldadura GMAW ensayadas*



*Nota:* se evidencia que el fallo en cada probeta se encuentra fuera de la zona soldada.

Para el análisis de datos de tracción se calculó el esfuerzo de fluencia. Para el cálculo esta cifra primero se halló el área de la probeta donde hay una mayor afectación durante el ensayo de tracción, el área de este segmento es  $27 \text{ mm}^2$ . En la Ecuación 6 se reemplaza el área afectada del material, que en este caso es constante para ambos tipos de probetas. El esfuerzo de fluencia se encuentra comparado junto al módulo de Young de cada proceso en la Tabla 7.

$$F_y = \text{Area} [\text{mm}^2] * S_y \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (6)$$

**Tabla 7.**

*Valores de Esfuerzo de fluencia, módulos de Young y Esfuerzos Últimos*

	GMAW	CONTROL
$S_y$ [MPa]	326	296
E [GPa]	189520	373433
$S_{ut}$ [MPa]	630	595

*Nota:* Valores de referencia hallados gráficamente del material de control y de junta soldada.

Se observa una diferencia del 9.20% con respecto al Esfuerzo de fluencia del material de control. Contrario a lo que pasa con la comparación de Esfuerzos de fluencia, los módulos de Young presentan una diferencia del 49% del material de control por encima de la junta soldada, también se observa en el esfuerzo ultimo una diferencia del 6%. Por otra parte, hay una diferencia del 11.01% entre las deformaciones plásticas de los procesos, esta comparación se encuentra expresada en la Tabla 8.

**Tabla 8.**

*Deformación plástica máxima alcanzada por cada proceso*

	GMAW	CONTROL
Deformación [mm/mm]	0.318046071	0.283018002

*Nota:* Extraído de las curvas de Esfuerzo vs Deformación de cada proceso

A continuación, se reemplaza en la Ecuación 6, para valores de Control y valores con junta soldada de GMAW. Como ya se explicó anteriormente el área de las probetas es la misma, por lo tanto, se mantienen constante. La variable en este caso es el esfuerzo de fluencia de cada proceso. El propósito de esta ecuación es hallar el valor de fuerza axial, que servirá para establecer parámetros de entrada para los ensayos de Fatiga, que se presentan en el siguiente apartado.

$$F_{y_{CONTROL}} = 27 [mm^2] * 296 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] = 7992 [N]$$

$$F_{y_{GMAW}} = 27 [mm^2] * 326 \left[ \frac{N}{mm^2} \right] = 8802 [N]$$

### 4.3 Ensayos de fatiga

Utilizando la resistencia a la deformación plástica como criterio de entrada, se calculan los valores de fuerza máxima y mínima mediante los niveles preestablecidos, asegurando una relación de esfuerzo cíclica R=0.1. Posteriormente, se sustituyeron dichos valores en la Ecuación 3 y se

generaron las tablas 9 y 10, las cuales contienen la información de entrada necesaria para los ensayos de fatiga.

$$0.1 = \frac{\sigma_{MIN}}{\sigma_{MAX}} \quad (3)$$

**Tabla 9.**

*Fuerza Máxima y Fuerza Mínima para ensayos de probetas de Control*

Nivel	$F_{max}$ [N]	$F_{min}$ [N]
0.95	7592.4	759.24
0.9	7192.8	719.28
0.85	6793.2	679.32
0.8	6393.6	639.36

*Nota:* Los valores de fuerza anteriores se usaron en el ensayo de fatiga controlando fuerza.

**Tabla 10.**

*Fuerza Máxima y Fuerza Mínima para ensayos de probetas de GMAW*

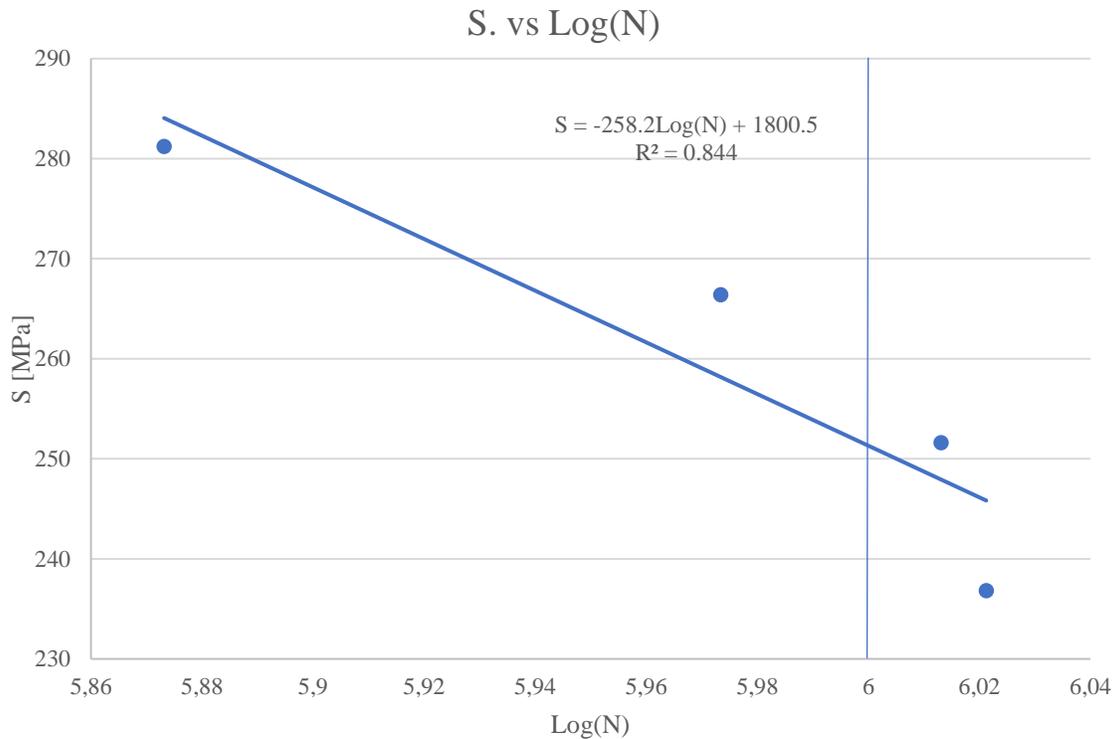
Nivel	$F_{max}$ [N]	$F_{min}$ [N]
0.95	8361.9	836.19
0.9	7921.8	792.18
0.85	7481.7	748.17
0.8	7041.6	704.16

*Nota:* Los valores de fuerza anteriores se usaron en el ensayo de fatiga controlando fuerza.

En los ensayos realizados para las probetas de control se obtuvieron resultados donde este tipo de muestra arrojó una alta resistencia a la fatiga, dejando cantidades de ciclos con orden de  $10^6$  tal y como se ilustra en la Figura 39, cuando se presenta este tipo de resultados se entiende que en teoría la probeta tiende a vida infinita.(Schijve, 2009) Por lo tanto, si se traza una línea horizontal desde el último punto registrado por la gráfica de esfuerzo vs número de ciclos, debajo de esa línea de esfuerzos, la probeta sumará ciclos de forma indefinida, hasta que rompa en un

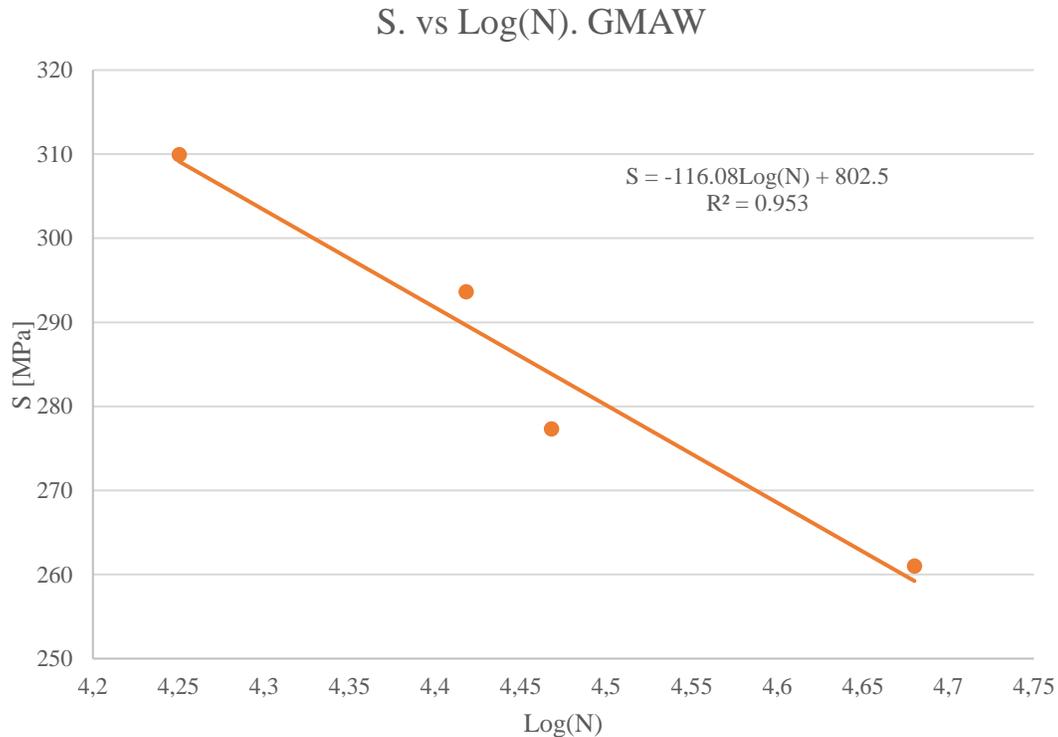
tiempo indeterminado. Este fenómeno no se presenta en la vida real debido al modelo de daño acumulado que impide llegar a valores de ciclos muy altos.

**Figura 39.**  
*Esfuerzo vs Log(N) para el material de control*



*Nota:* en el eje x se encuentran los valores del promedio de logaritmo en base 10 del número de ciclos.

Los resultados obtenidos en los ensayos de la junta soldada presentaron una situación diferente a la observada con el material de control. En particular, se pudo constatar que las probetas del proceso de GMAW no alcanzaron un número de ciclos del orden de  $10^6$  en su último nivel de esfuerzo, como sí ocurrió con el material de control. La Figura 40 evidencia lo anteriormente explicado.

**Figura 40.***Esfuerzo vs N en Logaritmo base 10 GMAW*

*Nota:* en el eje x se encuentran los valores del promedio de logaritmo en base 10 del número de ciclos.

Se observó que el proceso de junta soldada mostró una menor resistencia a la fatiga, que en el material base. El cual llegó en su nivel más bajo a una constante del millón de ciclos. Esto se puede generar por la presencia de inclusiones, poros o defectos que no son visibles a simple vista en el momento de la inspección. Generando posibles concentradores de esfuerzos y ocasionando interrupciones en el flujo de carga a lo largo de las probetas, provocando la nucleación de grieta.

Para entender el fenómeno de fatiga, es importante considerar que se trata de un proceso de deformación plástica. La cantidad de plasticidad de un material se puede calcular mediante la medición del área bajo la curva que se forma en el diagrama de esfuerzo-deformación. Cuando se hace el análisis a un material dúctil este presenta una mayor área bajo la curva, por lo tanto, cuenta

con mayor plasticidad, en cambio, cuando se revisa un material frágil, este tiene una menor área bajo la curva de esfuerzo-deformación, todo esto nos quiere decir que se presenta un menor nivel de acumulación energética por culpa de las cargas. (Askeland et al., 2013)

Cabe destacar que la zona de soldadura puede verse afectada por escoria o poros formados durante el proceso de soldadura. Estos defectos pueden ser una de las causas por las que se observa, en la Figura 41, que las probetas de fatiga fallaron por la soldadura.

**Figura 41.**

*Probetas del proceso de GMAW ensayadas*



*Nota:* Se evidencia que en las probetas el fallo se dio en la junta soldada.

Teóricamente en las curvas S-N, el acero tiene un comportamiento en el cual, tiende a estabilizarse desde un valor de tensión. Este valor de fuerza se le llama límite de fatiga o resistencia a la fatiga, este se alcanza para valores de N entre  $10^6$  y  $10^{10}$  ciclos. (Yepes Piqueras, 2021)

#### **4.4 Determinación del cambio de la resistencia a la fatiga en ambos materiales**

A continuación, se presenta un análisis comparativo entre el material con junta soldada y el material de control, con el objetivo de observar y relacionar el cambio en la resistencia a la fatiga. Este análisis permitió obtener una ecuación que logra comparar numéricamente las dos condiciones de ensayo.

Primero se extrajo la Ecuación 7 de la Figura 39. La ecuación resultante en la gráfica de S-N para probetas de control:

$$S_{CONTROL} = -258.2 \text{Log}(N) + 1800.5 \quad (7)$$

Se despejó Log(N) de la Ecuación 7 para relacionar y hallar un valor aproximado para número de ciclos de GMAW con respecto a los ensayos sin junta soldada.

$$\text{Log}(N)_{control} = \frac{S-1800.5}{-258.2} \quad (7)$$

Luego se procedió con la siguiente gráfica, la Figura 40 entrega la Ecuación 8.

$$S_{GMAW} = -116.08 \text{Log}(N) + 802.5 \quad (8)$$

Se despeja Log(N):

$$\text{Log}(N)_{GMAW} = \frac{S-802.5}{-116.08} \quad (8)$$

Para comparar los resultados de fatiga, es necesario tomar valores de referencia, para este caso serán los tres primeros niveles de esfuerzo de GMAW, que serán reemplazados en la Ecuación 9.

$$\frac{\text{Log}(N)_{GMAW}}{\text{Log}(N)_{CONTROL}} = \frac{\frac{S-802.5}{-116.08}}{\frac{S-1800.5}{-258.2}} \quad (9)$$

En la Tabla 11 plasmó la selección de los tres primeros niveles de esfuerzo para el análisis, ya que en la revisión del material de control se observó que el ultimo nivel de esfuerzo teóricamente tenía vida infinita, lo que impide hacer una comparación en dicho nivel de esfuerzo.

**Tabla 11**  
*Relación de Log(N) de GMAW vs CONTROL*

% Esfuerzo	Esfuerzo [MPa]	Log(N)GMAW	Log(N)CONTROL	GMAW/CONTROL
95%	309.7	4.246445	5.77381875	0.735465674
90%	293.4	4.386902	5.8369481	0.751574645
85%	277.1	4.527359	5.90007746	0.767338891

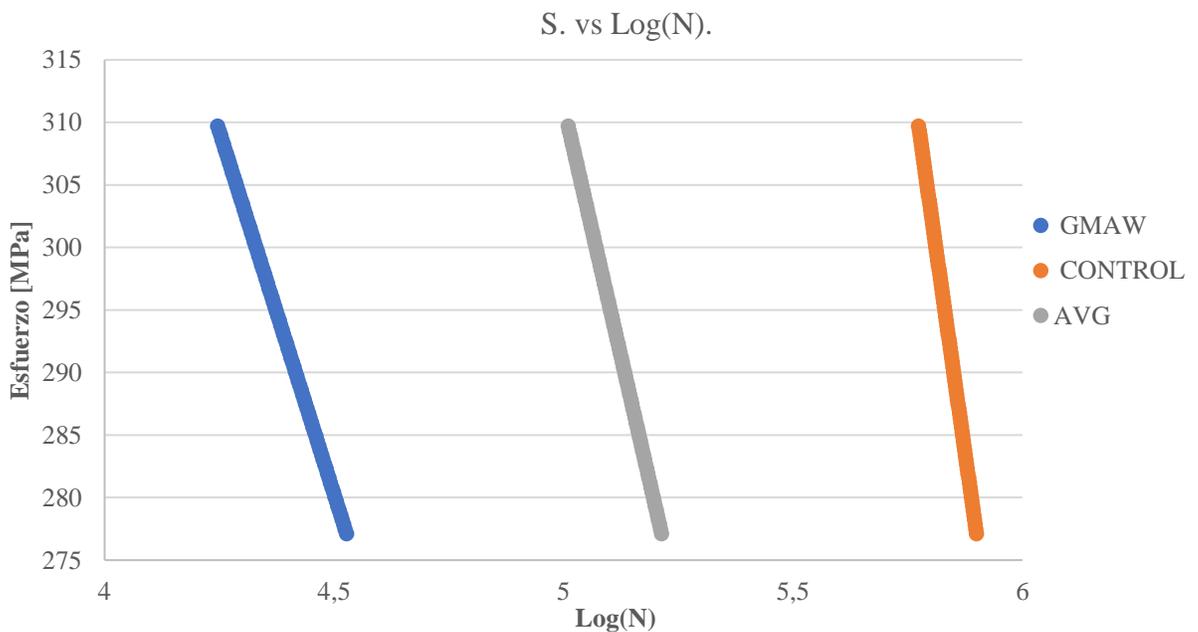
*Nota:* La tabla se toma como referencia de los valores en los que se basó el análisis. El promedio de los valores de GMAW/CONTROL fue de 0.751512293

Con lo anterior en cuenta, se realiza la siguiente comparación aproximada en la Ecuación 10.

$$\text{Log}(N)_{GMAW} = 0.7515\text{Log}(N)_{CONTROL} \tag{10}$$

Para continuar con la comparación de los procesos de fatiga con los tres niveles de esfuerzo, se estableció un rango entre el límite superior de carga y el límite inferior, para este caso fueron 309.7 MPa y 277.1 MPa respectivamente. A partir de este intervalo se trazó una curva promedio de los dos procesos, la cual se presenta en la Figura 42.

**Figura 42.**  
*Comparación de GMAW vs Control con los mismos puntos de referencia*



*Nota:* Con los tres niveles de esfuerzo que se establecieron en la tabla 7 se comparó entre GMAW y Control, se calculó el promedio entre ambas y el valor de relación presentado en la ecuación 10, contó con un coeficiente de variación de 1.245%.

## 5. Conclusiones

El proceso de soldadura de GMAW se realizó siguiendo los estándares de la norma AWS D1.1. Se realizaron probetas de tracción siguiendo la norma E8/E8M. Para los ensayos metalográficos se cortaron probetas rectangulares de acuerdo con la norma ASTM E3. Además, se cortaron probetas de fatiga siguiendo la norma ASTM E466. Por lo tanto, el primero objetivo específico se alcanzó.

Durante el proceso de obtención y procesamiento de las muestras, se consideraron múltiples variables, en los pasos previos al corte. Entre ellos, la superficie plana de la mesa de trabajo de soldadura fue particularmente importante. Se aseguró que la superficie estuviera lisa y limpia para garantizar una mayor calidad en el proceso. Además de que se comprobó teóricamente con el Diagrama de Shaeffler que la elección del material fue correcta, dejando la mezcla entre el material de aporte y el material base fuera de las zonas de riesgo que se presentaron en la Figura 23.

Se realizaron análisis metalográficos de las muestras con la ayuda de los diagramas de Shaeffler. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este método solo abarca el análisis de la zona de fusión de la muestra.

El acero inoxidable utilizado en este proyecto es de tipo austenítico. Al ubicar los puntos correspondientes al material base y al material de aporte en el diagrama de Shaeffler, se puede evidenciar esta característica. Además, se observa la presencia de ferrita en una proporción aproximada del 7%. Es importante destacar que el material se encuentra fuera de las zonas de peligro identificadas en la Figura 23.

Se estableció una relación entre los cambios microestructurales y los resultados obtenidos en los diagramas de Shaeffler. Este proceso de análisis permite identificar el material teórico sin

necesidad de un estudio metalográfico exhaustivo, ya que se basa en la composición química del aporte y del material base. Al lograr identificar la presencia de ferrita en el diagrama de Shaeffler y relacionarla con la presencia de ferrita en las micrografías, se cumplió con éxito el tercer objetivo específico.

En la tabla 10 se presenta una comparación de esfuerzos de fluencia y módulos de Young, sobre los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados. Se observa una diferencia del 9,2% de la junta soldada sobre el material de control y una diferencia del 49% del material de control sobre el material con el proceso de soldadura. Esto quiere decir que el material sin junta soldada es más rígido, requiere de una mayor fuerza para producir una determinada deformación. Sin embargo, el material con junta soldada es más resistente a la deformación plástica.

Las roturas en los ensayos de tracción se dieron fuera de la zona de soldadura, como se presentó en la Figura 38, el material se vio afectado térmicamente. En la zona de fusión, la probeta cuenta con una estructura de austenita dendrítica columnar, que le entrega propiedades de dureza al material. En la raíz de la soldadura se encuentra una agrupación de granos en los cuales se pueden presentar inclusiones o imperfecciones generando dislocaciones que producen concentradores de esfuerzos. Entonces, comparando las propiedades del material fundido con la raíz de la soldadura es lógico que la rotura se diera en zonas próximas a la soldadura.

Un detalle muy representativo de los ensayos de fatiga para el proceso de GMAW, es que su falla siempre fue por el cordón de la junta, una razón por la que pudo pasar esto es que la plasticidad del material soldado fue menor que el material base, por lo tanto según lo explicado para los ensayos de tracción la zona de fusión de la soldadura tiene propiedades de dureza mayores al material base, volviéndola a su vez más frágil, entregando una menor plasticidad, con respecto a la plasticidad que se presentó en el material base.

Además, la zona de fusión en la soldadura puede presentar poros o escoria generada por la deposición de material, estos defectos pueden generar un concentrador de esfuerzos, provocando que el flujo de carga se vea interrumpido, llevando la muestra a la nucleación.

Para el análisis de los datos obtenidos de fatiga se realizó una comparación a los resultados de las probetas de junta soldada y del material de control, lo primero fue obtener una relación entre las ecuaciones que se hallaron de las Figuras 39 y 40, la relación facilitó un aproximado para la comparación de los dos tipos de muestras, dando como resultado que el proceso de GMAW es 0.7515 veces el proceso de control. Y así es como se cumplió con el segundo objetivo específico.

### Referencias Bibliográficas

- AENOR. (2005). *UNE-EN ISO 15614-1 Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos*.  
[https://portal.aenormas.aenor.com/revista/pdf/feb18/\(EX\)UNE-EN\\_ISO\\_15614-1=2018.pdf](https://portal.aenormas.aenor.com/revista/pdf/feb18/(EX)UNE-EN_ISO_15614-1=2018.pdf)
- Agredo Gutierrez, L. (2017). *EVALUACIÓN DEL EFECTO MECÁNICA Y METALÚRGICO DE LAS FASES INTERMETÁLICAS EN LA UNIÓN SOLDADA DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX 2304* [Universidad Autónoma de Occidente].  
<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10070/T07733.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2013). *Ciencia e Ingeniería de Materiales* (Sexta Edición). Cengage, Learning.
- ASTM international. (2010). *E 739-10 Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data*.  
<https://www.scribd.com/document/520739557/ASTM-E739-10#>
- Caravaca, M. (2012). *Dendritic Solidification*. [http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/dendrites\\_spanish.html](http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/dendrites_spanish.html)
- Castellanos-González, O. M., Moreno-Uribe, A. M., Ramón-Ramón, S. A., & Jácome, J. L. (2021). Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3), 47–60. <https://doi.org/10.18273/REVUIN.V20N3-2021003>
- de Vedia, L. A., & Svoboda, H. (2002). FATIGA. En *Ensayos Industriales*.  
<https://docplayer.es/51816151-Ensayos-industriales-dpto-de-ingenieria-mecanica-y-naval-facultad-de-ingenieria-universidad-de-buenos-aires-fatiga-luis-a-de-vedia-hernan-svoboda.html>

DIPAC. (2010). Acero Inoxidable AISI 304. *Betelgeux, 1*.

Federación de enseñanza de Andalucía. (2011, noviembre 17). *METALOGRAFÍA*.

FoodProtec Panamá. (2021). *El Acero Inoxidable y la Industria Alimentaria*.

<https://www.foodprotec-panama.com/el-acero-inoxidable-y-la-industria-alimentaria/>

García Custodio, N. V. (2013). *Efecto de Nanopartículas de TiN en la Microestructura del Acero*

*API 5L X65 Unido Mediante el Proceso de Soldadura por Arco Sumergido (SAW)*

[Corporación Mexicana de Investigación en Materiales].

[https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/90/1/Tesis%20Norma%20](https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/90/1/Tesis%20Norma%20V%20García%20C-SIN.pdf)

[V%20García%20C-SIN.pdf](https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/90/1/Tesis%20Norma%20V%20García%20C-SIN.pdf)

Gil-Crespo, P. P. (2009). *Atlas de Mineralogía Óptica* (Version 4.10).

<https://www.ehu.eus/mineralogiaoptica/maclas.html>

Gonzalez De Leon, M., Marco Martinez, M., Pertuz-Comas, A., Álvarez, L., & Arenas, M. (2008,

octubre). Análisis de fatiga de juntas soldadas de acero al carbono utilizado en recipientes a

presión. *Scielo*. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212008000400010)

[48212008000400010](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212008000400010)

González, J. L. (2003). Metalurgia Mecánica. En N. E. LIMUSA (Ed.), *Editorial Limusa, S.A.*

[https://books.google.com.do/books?id=DG9qiR2IyIsC&printsec=frontcover#v=onepage&q](https://books.google.com.do/books?id=DG9qiR2IyIsC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false)

[&f=false](https://books.google.com.do/books?id=DG9qiR2IyIsC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false)

Gonzalez Solarte, G. E., & Diaz Valencia, P. O. (1997). Diseño de una máquina para ensayo de

fatiga a flexión invertida. En *Universidad Autónoma de Occidente*.

<http://hdl.handle.net/10614/3503>

- Gracia, L. C. (2020, enero 17). *Uso del Diagrama de Shaeffler para el soldeo*. Blog SEAS.  
<https://www.seas.es/blog/produccion-mantenimiento/uso-del-diagrama-de-shaeffler-para-el-soldeo-de-inoxidables/>
- Guenneec, B., Ueno, A., Sakai, T., Takanashi, M., & Itabashi, Y. (2013, junio 16). *Effect of Loading Frequency in Fatigue Properties and Micro-Plasticity Behavior of JIS S15C Low Carbon Steel*.
- Guerrero, A., & Chapetti, M. (2020). Avances en el desarrollo de modelos de predicción del comportamiento a fatiga de uniones soldadas. *Ciencias*, 4(4).  
<https://doi.org/10.33326/27066320.2020.4.984>
- Gutiérrez, A. (2018, enero 2). *41: Proyecto por fatiga*.  
<https://www.scribd.com/document/458677814/proyecto-por-fatiga>
- Hines, W. W., & Montgomery, D. C. (1980). *Probability and statistics in engineering and management science*. Wiley.
- INDURA S.A. (2007). *Manual de Soldadura INDURA*.  
<https://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Soldadura%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2F00da6ac5e6754e428ecd94f1c78711cb.pdf>
- Kita-Shinagawa, & Ku, S.-. (2011). *Essential Factors in Gas Metal Arc Welding* (Fourth Edition). KOBE STEEL, LTD. <https://www.kobelco-welding.jp/images/education-center/pdf/2011GMAW.pdf>
- KOBE STEEL. (2008). *Agrietamiento en Frio en Cordones de Soldadura de Filete*.  
[https://www.kobelco-welding.jp/espanol/education-center/abc/ABC\\_2008-01.html](https://www.kobelco-welding.jp/espanol/education-center/abc/ABC_2008-01.html)

- Leboreiro Enríquez, G. (2019). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA A FLEXIÓN PURA PARA MATERIALES POLIMÉRICOS REFORZADOS CON FIBRA*. [https://oa.upm.es/54296/1/TFG\\_GUILLERMO\\_LEBOREIRO\\_ENRIQUEZ.pdf](https://oa.upm.es/54296/1/TFG_GUILLERMO_LEBOREIRO_ENRIQUEZ.pdf)
- Marulanda Arevalo, J. L., Burbano, V. M., & Peláez, J. A. (2013). Analysis of stainless steel weldability with medium and low carbon by SMAW steel. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 22(35), 91–100.
- Mendoza Bravo, I., Villalobos Vera, D. I., & Maldonado Zepeda, C. (2015). Agrietamiento en caliente de la unión soldada de un acero inoxidable ferrítico AISI 430. *Ingeniería mecánica, tecnología y desarrollo*, 5(3), 347–353. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-73812015000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-73812015000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Morales Iles, G. A. (2009). *Estudio de la Soldadura por Resistencia de Aceros Inoxidables Austeníticos de Hasta 3 mm de Espesor*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1472>
- Ospina Lopez, R., Aguirre Corrales, H., & Parra L, H. (2007). Soldabilidad en Aceros Inoxidables y Aceros Disimiles. *Scientia Et Technica*, XIII(34), 273–278.
- Paguay Alvarado, R. I. (2011). *Análisis del Comportamiento a Fatiga en Flexión Rotativa de un Acero AISI SAE 1018 en Ambientes Corrosivos* [Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <https://docplayer.es/90048441-Escuela-superior-politecnica-del-litoral-facultad-de-ingenieria-en-mecanica-y-ciencias-de-la-produccion-tesis-de-grado.html>
- Parida, B. K. (2001). Fatigue Testing. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 2994–2999. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00533-7>
- Phillips, D. H. (2016). Welding Metallurgy Of Stainless Steels. En Wiley (Ed.), *Welding Engineering* (First Edition, pp. 203–216).

- Rodríguez-Suárez, A., Fernández-Columbié, T., & Rodríguez-González, I. (2018). Solidificación y microestructura de un acero al manganeso obtenido por fundición. *Minería y Geología*, 34(4).
- Salán, M. N., & Anglada, M. J. (2005). Formación de maclas durante el enfriamiento en aceros inoxidables superferríticos envejecidos. *Revista de Metalurgia*, 41(Extra). <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.iextra.1028>
- Schijve, J. (2009). Fatigue of Structures and Materials 2nd Ed - Jaap Schijve. *e-ISBN-13: 978-1-4020-6808-9*, 141–169. [https://www.academia.edu/74514221/Fatigue\\_of\\_Structures\\_and\\_Materials\\_2nd\\_Ed\\_Jaap\\_Schijve](https://www.academia.edu/74514221/Fatigue_of_Structures_and_Materials_2nd_Ed_Jaap_Schijve)
- ThyssenKrupp S.A. (2022). *Catálogo Comercial AISI 316/316L*. [https://adler.cl/wp-content/uploads/2022/09/aisi\\_316l.pdf](https://adler.cl/wp-content/uploads/2022/09/aisi_316l.pdf)
- Trujillo Camacho, R., & Serna Giraldo, C. (2017). Influencia de los parámetros de soldadura para el proceso SMAW en la formación de ferrita delta durante la soldadura de aceros inoxidables austeníticos. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- UDDEHOLM. (2018). *Acero para aplicaciones de trabajo en frío*. [www.uddeholm.com](http://www.uddeholm.com)
- Yepes Piqueras, V. (2021). *¿Qué factores afectan en mayor medida a la resistencia a la fatiga en aceros?* <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/wohler/>

