

RELACIÓN GENERAL ENTRE LA RESISTENCIA A LA FATIGA Y LA
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN JUNTAS SOLDADAS

LUIS MARIO CALDERÓN VERGEL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2023

RELACIÓN GENERAL ENTRE LA RESISTENCIA A LA FATIGA Y LA
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN JUNTAS SOLDADAS

LUIS MARIO CALDERÓN VERGEL

Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Director

PhD. Alberto David Pertuz Comas

Codirector

Ing. Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2023

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales a los profesores Oscar Bohórquez, Alberto Pertuz y el soldador Edgar Oviedo por su acompañamiento y desarrollo en todo el proyecto de inicio a fin, a Diego A. Diaz por estar presente en los inicios del proyecto, a Laurita Arenas por estar presente en la parte microestructural, a Jhon Fredy por estar presente en los ensayos mecánicos, a Minciencias por la convocatoria VIE 2827 por la oportunidad de financiación y a toda la docencia de la escuela de ingeniería mecánica y la universidad en general por estar presente en mi formación profesional.

Luis Mario Calderón Vergel

CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	16
3. OBJETIVOS	17
3.1. OBJETIVO GENERAL	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. MARCO TEÓRICO	18
4.1. PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO	18
4.1.1. Proceso de soldadura SMAW (Shielded Metal Arc Welding)	20
4.1.2. Proceso de soldadura GTAW (Gas-shielded Tungsten Arc Welding)	21
4.1.3. Proceso de soldadura FCAW (Flux Cored Arc Welding)	22
4.1.4 El proceso de soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding)	23
4.1.4.1. Transferencia por cortocircuito	25
4.1.4.3. Transferencia por aspersion	26
4.1.5. Zonas de la unión soldada	26
4.2. ENSAYOS	27
4.2.1. Ensayo de dureza	27
4.2.2. Ensayo de tracción	28
4.2.3. Ensayo de fatiga	30
4.2.4. Microscopia	33
4.3. MATERIALES	33
4.3.1. Los metales	33
4.3.1.1. Aceros	33
4.4. ANTECEDENTES	35

4.4.1. J.C. Pang	35
4.4.2. Duqiang Ren	36
4.4.3. Jinkeun Oh.....	36
4.4.4. M.G. Renteria, V.L. Morelos y R.G. Hernandez	36
4.4.5. Liangbe Li	37
5. METODOLOGÍA	38
5.1. OBTENCIÓN Y GENERACIÓN DE PROBETAS	38
5.1.1. Obtención de la lámina de acero	38
5.1.2. Proceso de soldadura	39
5.1.3. Obtención de probetas.....	41
5.2. ENSAYOS MECÁNICOS	42
5.2.1. Ensayo de tracción.	43
5.2.2. Ensayo de fatiga	43
5.2.4. Ensayo de micro dureza	44
5.2.3. Microscopía.....	45
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	46
6.1. PROBETAS OBTENIDAS	46
6.2. ENSAYO DE TRACCIÓN.....	47
6.3. Ensayo de Fatiga	51
6.4. Ensayo de dureza.	55
6.5. Microestructura.	56
6.6. Correlación entre la resistencia a la fatiga y resistencia a la tracción.	59
7. CONCLUSIONES	64
8. BIBLIOGRAFÍA.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de procesos de soldadura por arco eléctrico según la AWS.	19
Figura 2. Circuito para el proceso manual de electrodo revestido.	20
Figura 3 Proceso de soldadura con electrodo revestido.	21
Figura 4 Proceso de soldadura GTAW: a) Con electrodo no consumible, b) Con electrodo consumible.	22
Figura 5 Proceso de soldadura FCAW: a) con protección de gas, b) autoprotegido.	23
Figura 6 Proceso de soldadura GMAW.	24
Figura 7 Sistema de desplazamiento constante electromecánico.	25
Figura 8 Modos de transferencia del material de aporte en el proceso GMAW.	25
Figura 9 Zonas del cordón de soldadura.	27
Figura 10 Indentador Vickers: a) Geometría del indentador, b) Huella sobre el material y sus medidas geométricas para el cálculo de la dureza.	28
Figura 11 Gráfica esfuerzo deformación.	30
Figura 12 Relaciones Esfuerzo Vs Tiempo.	31
Figura 13 Primeras curvas de fatiga.	32
Figura 14 Diagrama Hierro – Carbono.	34
Figura 15 Plano corte por cizallamiento a la lámina.	39
Figura 16 Máquina <i>ALPMAC MODEL V</i> , cizallamiento de la lámina de acero estructural ASTM A36.	39
Figura 17 Equipo de Soldadura <i>SWEISS SKY WORKS 3550</i>	40
Figura 18 Proceso de soldadura GMAW automatizado.	41
Figura 19. Planos de probetas normalizadas: a) Ensayo de tracción, b) Ensayo de fatiga, c) Ensayo de micro dureza.	41
Figura 20 Máquina corte por chorro de agua <i>FLOW MACH 3</i>	42
Figura 21 Ensayo de Tracción.	43
Figura 22 Ensayo de Micro dureza en <i>BRUKER UMT TRIBOLAB</i>	44

Figura 23 Tipo de huella a buscar y dirección de las microindentaciones.	45
Figura 24 Microscopio y probeta usados para observar la microestructura.	45
Figura 25 Probetas cortadas y soldadas: a) Control, b) Tracción, c) Fatiga.	46
Figura 26 Inspección de cordón de soldadura.	46
Figura 27 Falla de la probeta en el ensayo de tracción: a) control, b) GMAW.	49
Figura 28 Falla de la probeta en el ensayo de fatiga.	54
Figura 29 Micrografía material base a 500X.	57
Figura 30 Micrografía zona afectada térmicamente a 200x.	57
Figura 31 Micrografía zona de fusión a 200X.	58
Figura 32 Micrografía de las 3 zonas FZ - HAZ – BM 50X.	58

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Probetas de control Esfuerzo Vs deformación.	48
Gráfica 2 Probetas GMAW Esfuerzo vs Deformación.....	48
Gráfica 3 Promedio Esfuerzo vs Deformación.	49
Gráfica 4 Probetas de control Esfuerzo vs Deformación zona elástica.....	50
Gráfica 5 Probetas GMAW Esfuerzo vs Deformación zona elástica.....	51
Gráfica 6 Resultados del ensayo de fatiga: a) Control, b) GMAW.	53
Gráfica 7 Curva S-N probetas de control.	53
Gráfica 8 Curva S-N probetas soldadas.	54
Gráfica 9 Dureza VS Desplazamiento probeta de control.....	55
Gráfica 10 Dureza VS Desplazamiento probeta soldada GMAW.	56
Gráfica 11 Validación de la correlación para juntas soldadas.....	61
Gráfica 12 Validación de la correlación para juntas soldadas con factor de corrección.	61
Gráfica 13 Validación de la correlación para el material sin afectación.	62
Gráfica 14 Comparativo de las correlaciones.	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de las constantes C y P.	14
Tabla 2. Composición química del acero estructural ASTM A36	35
Tabla 3 Propiedades Mecánicas del acero estructural ASTM A36	35
Tabla 4 Parámetros proceso GMAW en transferencia por aspersion.	40
Tabla 5 Parámetros Mecanismo de arrastre	41
Tabla 6 Propiedades mecánicas obtenidas a partir del ensayo de tracción.	50
Tabla 7 Niveles de esfuerzo en el ensayo de fatiga.....	52

LISTA DE ANEXOS

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

UIS

ANEXO A. Certificado de composición lámina de acero estructural ASTM A36

ANEXO B. Certificado de calidad de composición de alambre proceso GMAW

ANEXO C. Datos del ensayo de tracción.

ANEXO D. Datos del ensayo de fatiga.

RESUMEN

TÍTULO: RELACIÓN GENERAL ENTRE LA RESISTENCIA A LA FATIGA Y LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN JUNTAS SOLDADAS. *

AUTOR: LUIS MARIO CALDERÓN VERGEL. **

PALABRAS CLAVE: Soldadura, arco eléctrico, GMAW, resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga, dureza, microestructura, acero estructural, ASTM A36.

DESCRIPCIÓN:

Cuando se habla sobre estructuras metálicas y sistemas mecánicos, durante el proceso de diseño, se deben tener presente las cargas dinámicas y estáticas a las cuales será sometido. Las propiedades mecánicas son un factor decisivo a la hora de la selección de los materiales. En la manufactura comúnmente es usada la soldadura como un método de sujeción permanente. Si bien está definida de forma general por la AWS como la coalescencia entre 2 o más materiales por calentamiento a la temperatura de fisión con o sin presión y con o sin material de aporte.

La generación de zonas afectadas por el calor y los cambios microestructurales son producto de la afectación térmica, originando cambios en las propiedades mecánicas del material base. La resistencia a la fatiga necesita de ensayos destructivos que conllevan tiempo y costos para su determinación. En la presente investigación se establece una correlación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga en juntas soldadas a tope en acero estructural ASTM A36 bajo el proceso de soldadura Gas Metal Arc Welding. Aplicaciones normalizadas fueron realizadas para la generación de probetas soldadas y material de control para ensayos de propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga bajo normativa ASTM E8/E8M y ASTM606/E606M.

Se logró establecer una correlación logarítmica en la que se tiene N como número de ciclos en función de ε como la deformación unitaria, la cual podrá contribuir a la integridad estructural y confiabilidad de equipo sometidos a cargas estáticas o dinámicas.

* Trabajo de grado.

** Facultad de ingenierías físicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director Alberto David Pertuz Comas. Codirector Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra.

ABSTRACT

TITLE: GENERAL RELATIONSHIP BETWEEN FATIGUE STRENGTH AND TENSILE STRENGTH IN WELDED JOINTS.*

AUTHORS: Luis Mario Calderón Vergel. **

KEY WORDS: Welding, electric arc, GMAW, tensile strength, fatigue strength, hardness, microstructure, structural steel, ASTM A36.

DESCRIPTION:

When talking about metallic structures and mechanical systems, during the design process, the dynamic and static loads to which the design will be subjected must be taken into account. Mechanical properties are a decisive factor in the selection of materials. In manufacturing, welding is commonly used as a permanent fastening method. It is generally defined by AWS as the coalescence between 2 or more materials by heating to fusion temperature with or without pressure and with or without filler material.

The generation of heat-affected zones and the microstructural changes are the product of thermal stress, generating changes in the mechanical properties of the base material. Fatigue strength requires destructive tests that are time consuming and costly for its determination. In the present investigation, a correlation between tensile strength and fatigue strength of butt welded joints in ASTM A36 structural steel under the Gas Metal Arc Welding process is established. Standardized applications were carried out for the generation of welded specimens and control material for tests of mechanical properties of tensile strength and fatigue strength under ASTM E8/E8M and ASTM606/E606M standards.

It was possible to establish a logarithmic correlation in which N is the number of cycles as a function of ϵ as the unit strain, which may contribute to the structural integrity and reliability of equipment subjected to static or dynamic loads.

* Thesis.

** Faculty of physicommechanical engineering. Mechanical engineering school. Director Alberto David Pertuz Comas. Codirector Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la selección de un método de sujeción en el ensamblaje de elementos mecánicos se deben tener presentes las cargas a las que se encuentra sometido el elemento, ya sean cargas dinámicas, cargas estáticas o cargas combinadas. Uno de los métodos de sujeción permanente usados en la industria durante la manufactura de estructuras metálicas es la soldadura. Este método posee múltiples variables, que en muchas ocasiones son obviadas, y que afectan directamente al material base, modificando su resistencia y por ende su durabilidad en presencia de las cargas ya mencionadas.

Cuando se habla de estructuras metálicas o sistemas mecánicos, se busca que sus componentes no fallen, por esto es necesario conocer sus propiedades mecánicas para la realización de cálculos correspondientes que ayudarán a determinar si es viable o no el material usado de acuerdo con las cargas presentes. Relaciones existentes fueron presentadas por David Tabor¹ entre la resistencia a la dureza y el esfuerzo último a la tracción. Dentro de las propiedades mecánicas de los materiales se encuentra la resistencia a la fatiga, un proceso de cargas cíclicas el cual en su estado de falla genera una grieta, que irá creciendo hasta producir rotura². Para determinar la resistencia a la fatiga en un material es necesario el uso de pruebas destructivas que conllevan tiempo y dinero, por lo que se han determinado correlaciones con otras propiedades mecánicas como la dureza, la resistencia a la tracción y el límite de fluencia. Hoy en día existen modelos que ayudan a determinar la resistencia a la fatiga en materiales ferrosos, uno de los pioneros fue August Wöhler con una relación lineal entre la resistencia a la fatiga σ_f y la resistencia a la tracción σ_{ut} , donde su

¹ TABOR, David. The hardness of metals. Londres: Clarendon Press, 1951. p. 105- 113

² PANG, J.C, et al. General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials. *Materials Science & Engineering A*. 2013, vol. 564, p. 331–341.

pendiente puede variar entre 0,4 y 0,5 dependiendo del tipo de material³. Ver ecuación (1).

$$\sigma_f = (0,4 - 0,5)\sigma_{ut} \quad (1)$$

J.C.Pang⁴ presenta su nueva ecuación universal (2) para determinar la resistencia a la fatiga ya que una relación lineal no es suficiente para abarcar aceros de alta resistencia.

$$\sigma_f = \sigma_{ut} (C - P * \sigma_{ut}) \quad (2)$$

Tabla 1. Valores de las constantes C y P.

Material	C	P/10 ⁻⁴ MPa ⁻¹
SAE 4140	0.87	2.65
SAE 4340	0.76	1.78
SAE 2340	0.74	1.89
SAE 4063	0.92	2.37

Fuente: Elaboración propia con base en PANG, J.C, et al. General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials. *Materials Science & Engineering A*. 2013, vol. 564, p. 331–341.

Las constantes P y C, están dadas para algunos aceros, no obstante, para juntas soldadas no se ha establecido aun si esta correlación es aplicable o no, ya que al momento de aplicar la soldadura para unir 2 piezas existe una afectación térmica que dependerá de la dirección de aplicación y de otros múltiples factores, como lo

³ TÓTH, L. y YAREMA, S. Y. Formation of the science of fatigue of metals. part 1. 1825-1870. *Materials Science*. 2006, vol. 42. p. 673-680.

⁴ PANG. Op.cit.

son las posiciones de soldeo, materiales utilizados (símiles o disímiles), técnicas de soldeo (con o sin pre y post enfriamiento), modificando su microestructura y propiedades mecánicas. Si existe una relación entre la resistencia a la fatiga y otra propiedad mecánica, en la zona afectada térmicamente por la soldadura, se puede presentar una variación que puede llegar a ser positiva o negativa para el sistema.⁵

⁵ F. SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Traducido por Alicia Larena Pellejero. 3 ed. Madrid: Mc Graw-Hill, 1998. p. 423. ISBN 0-07-059241-1

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La soldadura es uno de los métodos de sujeción permanente comúnmente usados en la industria, pero ¿Qué se sabe acerca de la afectación térmica que se genera a nivel microscópico, modificando las propiedades mecánicas de los materiales? Si bien existe un acercamiento que define la resistencia a la fatiga en términos de la resistencia a la tracción que fue presentada por Pang⁶ en aceros aleados del segmento SAE, AISI y entre otras aleaciones al magnesio y molibdeno sin ser estos los más utilizados en la fabricación estructural. Para juntas soldadas no existe o no se ha corroborado si puede llegar a ser funcional para este tipo de aplicación.

Lo que se pretende es proponer una correlación entre la resistencia a la fatiga y la resistencia a la tracción de una junta soldada de acero con el fin último de conocer el nivel de afectación térmica que se generó por la soldadura que modifica su microestructura. Una de las tantas cosas obviadas por los ingenieros al momento de usar este modelo de manufactura. En la industria no es común construir probetas y hacer ensayos para determinar propiedades mecánicas en las juntas soldadas. Pero se ciñen a lo que la investigación dictamine como fundamento, aplicando factores de seguridad. Es por esto que la presente investigación generará un aporte significativo al campo de diseño, de tal forma que al momento de realizar los cálculos de resistencia para alguna estructura a la cual se le aplique soldadura, se pueda tener en cuenta esta correlación con el fin determinar la mayor vida útil en servicio del elemento o estructura, esto aportará mayor confiabilidad a los futuros proyectos desarrollados con aplicaciones de soldadura.

⁶ PANG. Op.cit.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar una correlación entre la resistencia a la fatiga y la resistencia a la tracción en juntas planas soldadas a tope para acero estructural ASTM A36 bajo el proceso de soldadura GMAW.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar probetas planas soldadas a tope de acero estructural ASTM A36 bajo proceso de soldadura GMAW para el modelo experimental que cumplan con las normativas AWS D1.1, AWS B4.0 y UNE-EN ISO 15614-1.
- Determinar la resistencia a la tracción en juntas soldadas a tope de acero estructural ASTM A36 bajo la normativa ASTM E8 para estimar su afectación respecto a material de control.
- Determinar el cambio de la resistencia a la fatiga con $R= 0.1$ en juntas soldadas a tope de acero estructural ASTM A36 bajo la normativa ASTM E606 para estimar su afectación respecto a material de control.
- Establecer una correlación matemática entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga para juntas soldadas bajo proceso de soldadura GMAW.

4. MARCO TEÓRICO

La soldadura es definida, de forma general, por la AWS (American Welding Society) como la coalescencia entre dos o más materiales por calentamiento a la temperatura de soldadura, ya sea con o sin presión y con o sin material de aporte. La soldadura es fundamental para la expansión y productividad de nuestras industrias siendo uno de los principales métodos de fabricación y reparación de productos metálicos y no metálicos, es un procedimiento eficiente, seguro y económico⁷.

A continuación, se darán las definiciones necesarias y el respectivo estado del arte existente que ayudarán a comprender mejor el presente proyecto.

4.1. PROCESOS DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO

Según la AWS⁸ se pueden encontrar múltiples procesos de soldadura. La soldadura por arco eléctrico se caracteriza por obtener el calor necesario para generar coalescencia de forma localizada a partir de un arco eléctrico obtenido a través de electrodos. Cuando se suelda con arco eléctrico debe existir una distancia mínima y máxima entre el electrodo y la placa a soldar ya que este si se acerca mucho al material, puede quedar pegada a este, y si su elevación es demasiada, no se producirá el arco eléctrico. Una vez se entra en el rango óptimo para producir el arco eléctrico el material de aporte fundirá y se irá depositando sobre la superficie. La figura 1 muestra de manera gráfica la clasificación de los procesos de soldadura por arco eléctrico.

Al aplicar algunos de los procesos de soldadura por arco eléctrico, es necesario usar un gas de protección para que impida el contacto entre el baño de fusión con

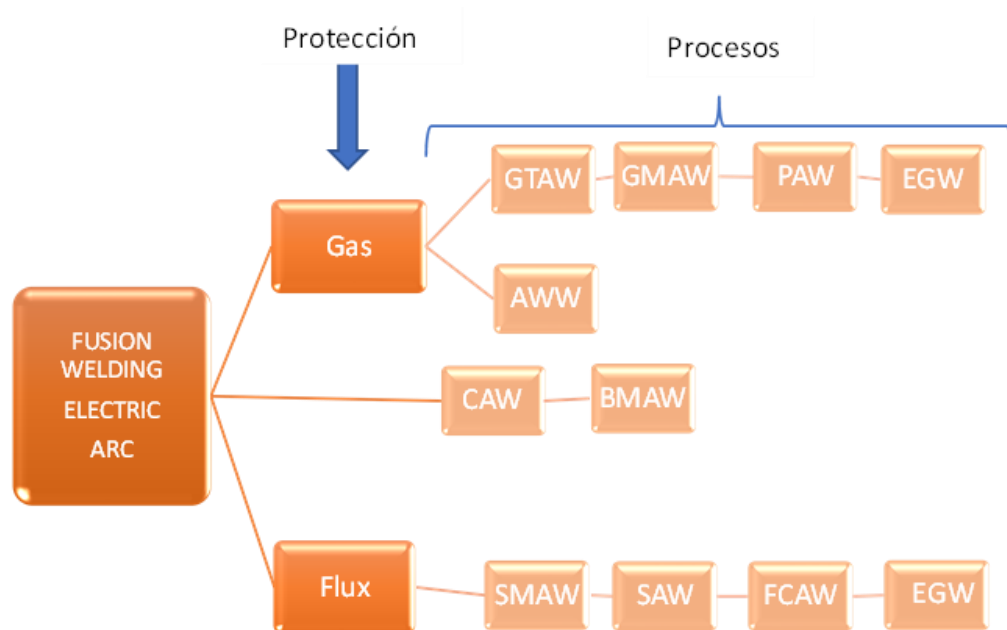
⁷ AMERICAN WELDING SOCIETY. Standard Welding Terms and Definitions. AWS A3.0M/A3.0. 12 ed. USA: AWS, 2010. 162p.

⁸ Ibid. P.67

la atmósfera, esto ayuda a que la soldadura sea más limpia y presente una mayor resistencia. Como mencionan Gianchino y Weeks⁹, en los procesos de soldadura que hacen uso de desoxidantes en lugar del gas de protección se arriesgan a la formación de sopladuras e inclusiones de escoria. El gas de protección también ayuda a que la deformación de las piezas sea menor. También se tiene la protección por *flux*, este modo de aislamiento se basa en los materiales de aporte, que llevan consigo algún recubrimiento o gas en su interior haciendo la misma función que el gas aplicado de forma externa.

A continuación, se describirán algunos procesos de soldadura por arco eléctrico frecuentemente usados en la industria.

Figura 1. Clasificación de procesos de soldadura por arco eléctrico según la AWS.

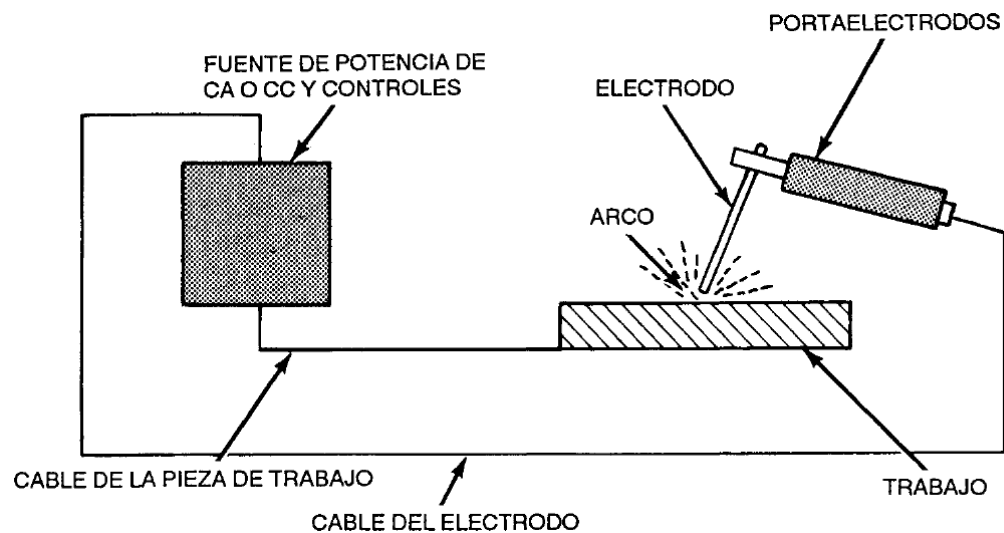


Fuente: Elaboración propia con base en AMERICAN WELDING SOCIETY. Standard Welding Terms and Definitions. AWS A3.0M/A3.0. 12 ed. USA: AWS, 2010. 54p.

⁹ GIANCHINO, Joseph W. y WEEKS William. Técnica y practica de la soldadura. Barcelona: Reverte S.A, 1988. 463 p.

4.1.1. Proceso de soldadura SMAW (Shielded Metal Arc Welding)¹⁰. También conocido como el proceso manual de electrodo revestido. Se caracteriza por tener bajo nivel de inversión, es un proceso simple, flexible y portable, perfecto para aplicaciones en el exterior y al aire libre gracias a la protección del metal fundido que se da a través de la generación de gas a partir del revestimiento que provee elementos de aislamiento y tiene la capacidad de soldar la mayoría de los metales ferrosos y no ferrosos. La siguiente figura ilustra el circuito con los elementos típicos al momento de aplicar soldadura con electrodo revestido.

Figura 2. Circuito para el proceso manual de electrodo revestido.

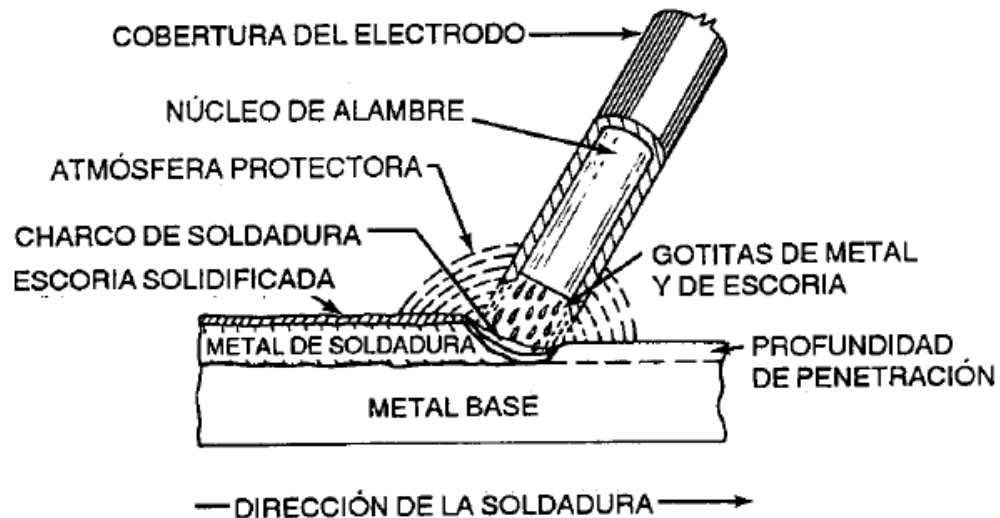


Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY. Manual de soldadura. Traducido por Ing. Roberto Escalona García. 8 ed. Nauculpan de Juárez: Pearson Educación,1996. p. 45. ISBN 968-880-767-2.

La aplicación de este proceso puede presentar discontinuidades en un tramo de soldadura largo, debido a la longitud del electrodo, afectando la productividad al no ser un alambre continuo, adicional a esto se tiende a generar escoria en el cordón de soldadura. La figura 3 representa este proceso de soldadura.

¹⁰ AMERICAN WELDING SOCIETY. Manual de soldadura. Traducido por Ing. Roberto Escalona García. 8 ed. Nauculpan de Juárez: Pearson Educación,1996. p. 44-47. ISBN 968-880-767-2.

Figura 3 Proceso de soldadura con electrodo revestido.



Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY. Manual de soldadura. Traducido por Ing. Roberto Escalona García. 8 ed. Nauculpan de Juárez: Pearson Educación, 1996. p. 46. ISBN 968-880-767-2.

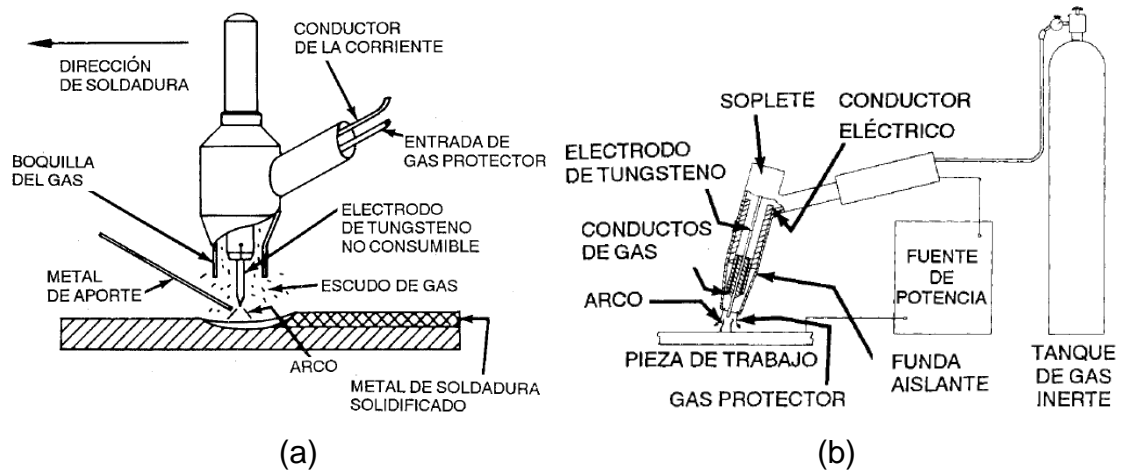
4.1.2. Proceso de soldadura GTAW (Gas-shielded Tungsten Arc Welding)¹¹.

También conocido como proceso TIG (Tungsten Inert Gas) hace uso de un electrodo de tungsteno sólido no consumible o consumible. El arco y el baño de fusión son aislados de la atmósfera a través de un gas inerte (Argón, Helio) a baja presión.

El proceso GTAW se caracteriza por generar soldadura de alta calidad y limpias, a tal punto que no requiere limpieza de escoria una vez terminada la soldadura, pero no alcanza un nivel de rendimiento como el proceso de soldadura MIG. La soldadura TIG es ampliamente usada para soldar aleaciones de aluminio, acero inoxidable y magnesio. La figura 4 enseña el proceso de soldadura GTAW.

¹¹ Ibid., p. 73-75

Figura 4 Proceso de soldadura GTAW: a) Con electrodo no consumible, b) Con electrodo consumible.

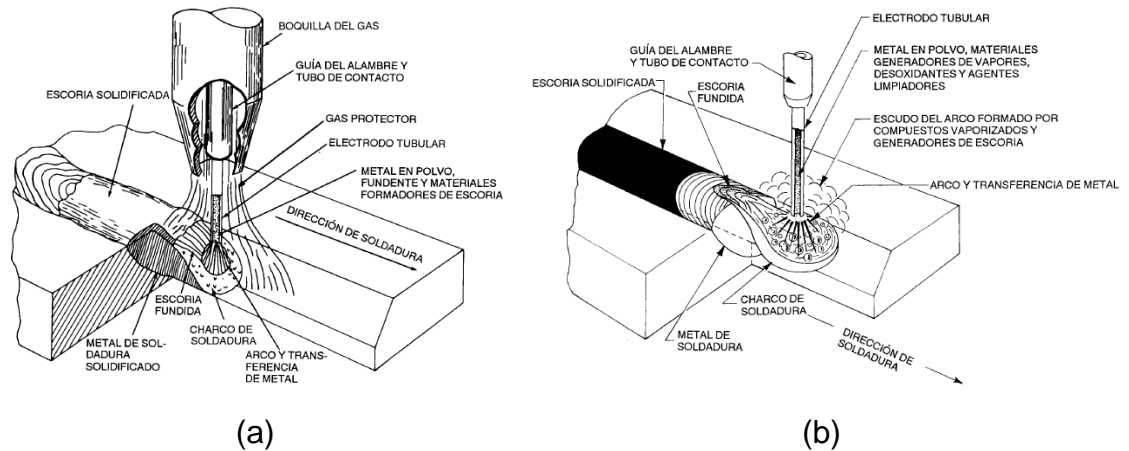


Fuente: Elaboración propia con base en AMERICAN WELDING SOCIETY. Manual de soldadura. Traducido por Ing. Roberto Escalona García. 8 ed. Nauculpan de Juárez: Pearson Educación, 1996. p. 74. ISBN 968-880-767-2

4.1.3. Proceso de soldadura FCAW (Flux Cored Arc Welding)¹². Utiliza un electrodo tubular que es material de aporte y aislante de protección al mismo tiempo, ver figura 5, tal como el proceso SMAW mencionado anteriormente, con la diferencia de que el ciclo de trabajo del operador y la tasa de deposición suele ser mayor en este proceso, ya que, el electrodo es continuo. El interior del electrodo está elaborado de ciertos componentes que al entrar en contacto con el arco generan el gas de protección, no obstante, dentro de este proceso también se puede hacer uso de una protección adicional de un gas suministrado externamente. Cuando el alambre se formula con protección de gas adicional, el cual puede ser CO₂ o una mezcla entre CO₂ y Ar, se le denomina FCAW-G y cuando no presenta protección del gas adicional se denomina FCAW-S. La figura 5 enseña estos 2 tipos de soldadura FCAW.

¹² Ibid., p. 157-182

Figura 5 Proceso de soldadura FCAW: a) con protección de gas, b) autoprotegido.



Fuente. Elaboración propia con base en AMERICAN WELDING SOCIETY. Manual de soldadura. Traducido por Ing. Roberto Escalona García. 8 ed. Nauculpan de Juárez: Pearson Educación, 1996. p. 159-160. ISBN 968-880-767-2

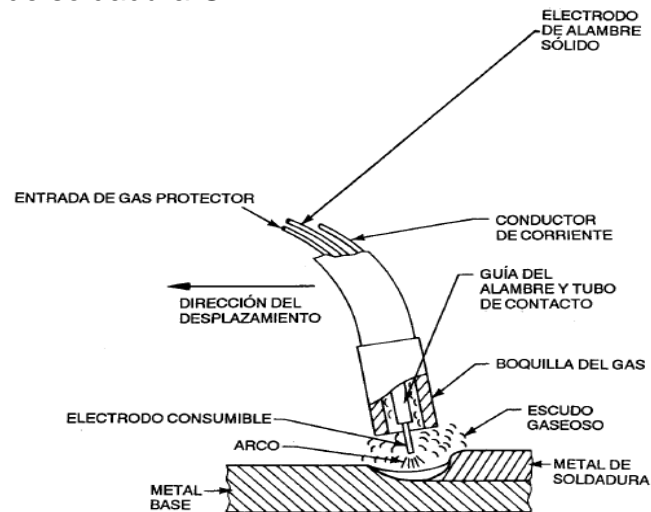
4.1.4 El proceso de soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding)¹³. El proceso de soldadura por arco de metal y gas es un proceso donde se emplea un electrodo tubular macizo continuo que debe utilizar un gas de protección suministrado externamente para evitar contaminación por parte de la atmósfera. También es denominado MIG (Metal Inert Gas) cuando el gas de protección es inerte (Argón o Helio) o MAG (Metal Active Gas) cuando el gas es activo (CO₂ o Mezcla Ar-CO₂).

Asta¹⁴ nos dice que este proceso maneja un equipo similar al usado en el proceso de soldadura FCAW el cual consta de una fuente de corriente continua y tensión constante, un devanador que alimente de manera continua el alambre macizo, haciendo que este proceso obtenga velocidades mayores a los procesos SMAW y GTAW, una antorcha con gatillo que recibe el alambre y una tobera o boquilla en su punta donde llega el gas que aísla el material de aporte de la atmósfera. La figura 6 describe el proceso GMAW.

¹³ Ibid., p. 73-75

¹⁴ ASTA, Eduardo. Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico. 1 ed. Buenos Aires: Fundación Latinoamericana de Soldadura, 2006. 32p. ISBN 987-23244-0-9

Figura 6 Proceso de soldadura GMAW.



Fuente: AMERICAN WELDING SOCIETY. Manual de soldadura. Traducido por Ing. Roberto Escalona García. 8 ed. Nauculpan de Juárez: Pearson Educación,1996. p. 111. ISBN 968-880-767-2

La manera de aplicación de este proceso, una vez configurado el equipo, se puede dar de manera semiautomática, aplicación directa de la mano del soldador, o de manera automática, donde el avance lo realiza un mecanismo de desplazamiento electromecánico donde se garantiza una velocidad constante y uniformidad en la presentación del cordón de soldadura¹⁵. En la figura 7 se puede observar dicho sistema de desplazamiento.

En el proceso de soldadura GMAW Existen 3 modos de transferir del material de aporte al metal de trabajo, variando los parámetros de entrada, esto permite que el tamaño de las partículas que están siendo depositadas varíen su tamaño dichos modos de transferencia se denominan: corto circuito, globular y aspersion¹⁶; su modo de transferencia se observa en la figura 8.

¹⁵ AMERICAN WELDING SOCIETY. Op. Cit., p. 123 - 125

¹⁶ Ibid., p. 112 – 116.

Figura 7 Sistema de desplazamiento constante electromecánico.

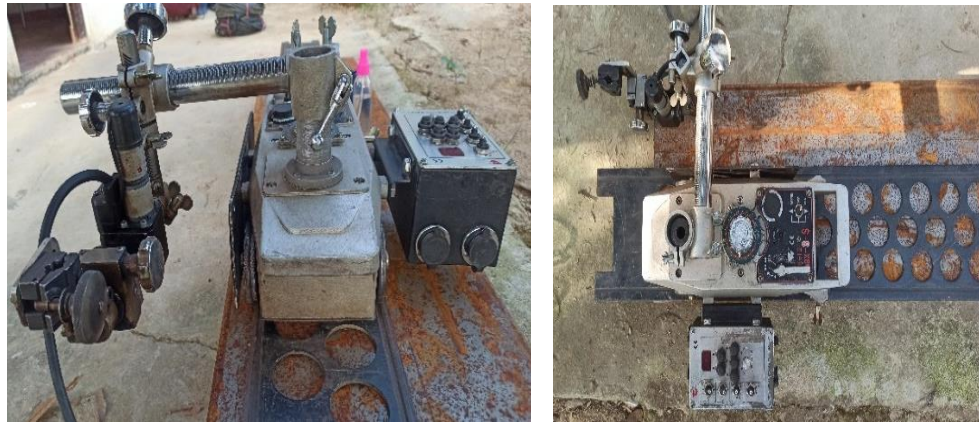
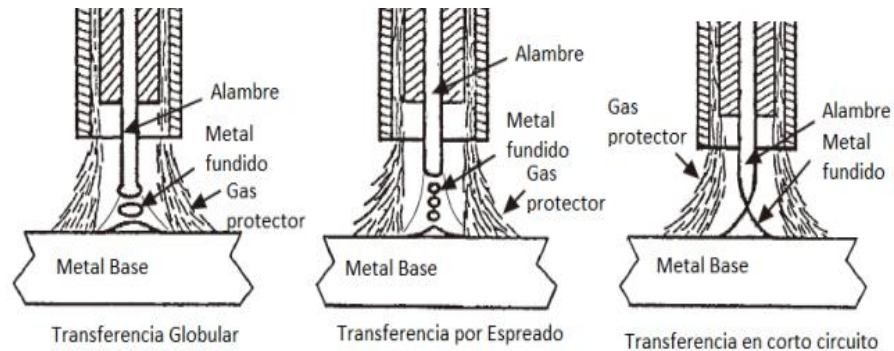


Figura 8 Modos de transferencia del material de aporte en el proceso GMAW.



Fuente. LOPEZ GONZALES, Luis Alberto. Estudio del fenómeno de desgaste en aleaciones de cobre para consumibles de proceso de arco sometidos a diferentes ciclos. [en línea]. Tesis de maestría. Corporación Mexicana de investigación en materiales. Santillo Coahuila. 2014 [Consulta: 18 de octubre 2022]. Disponible en: <http://surl.li/djxsb>

4.1.4.1. Transferencia por cortocircuito. Es ideal para soldar materiales delgados, dado que la deposición del aporte se realiza a través de la fusión de este, generada por los pulsos intermitentes del corto circuito generado, sin embargo, esto se realiza a una alta velocidad y de forma continua con voltajes y

corrientes de bajo rango, realizando una baja afectación del calor sobre el material soldado¹⁷.

4.1.4.2. Transferencia globular. En este sistema la proporción de la gota de material de aporte creada es depositada sobre el material a soldar siendo más grande que el diámetro del alambre de aporte y con una forma irregular, esta aplicación es típica de formas planas de deposición, y los valores de los parámetros son más altos que los del sistema corto circuito¹⁸.

4.1.4.3. Transferencia por aspersión¹⁹. Este sistema requiere la cantidad energética más alta, representada en la magnitud más elevada en los valores de voltaje y amperaje de todo el conjunto, su propósito es pulverizar el material de aporte antes de ser depositado en la zona de fusión en diminutas gotas y a una alta velocidad, el área de fusión presenta baja viscosidad y por esto la fluencia del material aportado es baja también, dando lugar a una limitante en las posiciones de aplicación, donde la gravedad debe influir²⁰.

4.1.5. Zonas de la unión soldada²¹. Un material que sea homogéneo una vez soldado se convierte en un material compuesto, ya que, al momento de soldar, la unión se divide en 3 zonas: La zona de fusión (FZ), que viene siendo el material de aporte; La zona afectada térmicamente (HAZ), región adyacente a la zona de fusión que recibe directamente la carga térmica; y el material base (BM) que es el material sometido a la soldadura, como se presenta en la figura 9. Cada una de

¹⁷ Ibid.,

¹⁸ Ibid.,

¹⁹ Ibid

²⁰ DIAZ NOVA, Diego Armando, *et al.* Estudio de propiedades mecánicas y análisis microestructural de las juntas soldadas en aceros ASTM A36 bajo 3 modalidades de transferencia GMAW. Trabajo de grado ingeniero mecanico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, 2021, p. 20-21.

²¹ ASTA, Eduardo. Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico. 1 ed. Buenos Aires: Fundación Latinoamericana de Soldadura, 2006. p 15. ISBN 987-23244-0-9

estas zonas tiene su propia microestructura y propiedades mecánicas debido a la carga térmica; y al medio y velocidad de enfriamiento.

Figura 9 Zonas del cordón de soldadura.



Fuente: Elaboración propia con base en ASTA, Eduardo. Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico. 1 ed. Buenos Aires: Fundación Latinoamericana de Soldadura, 2006. p 14. ISBN 987-23244-0-9

4.2. ENSAYOS

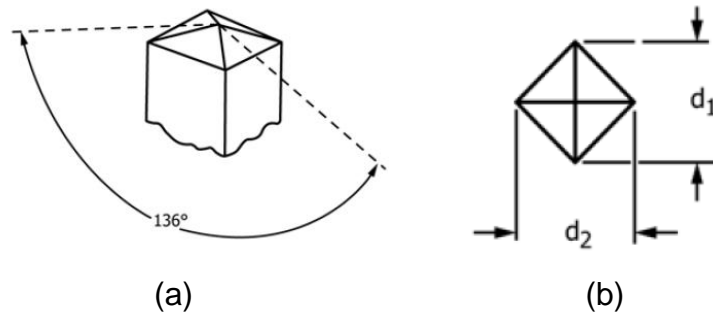
Los ensayos mecánicos son pruebas que ayudan a determinar las propiedades mecánicas resultantes de un material una vez ha salido de la colada o después de generar una afectación que incida en su microestructura. Todos los ensayos del presente trabajo se adoptó los estándares de prueba bajo la normativa American Society for Testing and Materials (ASTM).

4.2.1. Ensayo de dureza. El ensayo de dureza se basa en lo estipulado en la norma ASTM E384²² donde dependiendo del indentador utilizado se usa la escala correspondiente a la dureza, en este caso se utilizó un indentador Vickers. El ensayo Vickers (HV), es un ensayo de micro dureza que mide la resistencia superficial existente ante la penetración de un material de mayor dureza (indentador pirámide de diamante), dejando una huella sobre este, que, al tomar sus dimensiones con ayuda de un microscopio, se podrá obtener el valor

²² AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. E384-17. U.S. 40 p.

correspondiente a su dureza aplicando una fórmula que correlaciona la fuerza aplicada y la huella obtenida, tal como se observa en la figura 10.

Figura 10 Indentador Vickers: a) Geometría del indentador, b) Huella sobre el material y sus medidas geométricas para el cálculo de la dureza.



Fuente: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials. E384-17. U.S. p.3.

Para encontrar la dureza Vickers en Kgf/mm^2 se realiza mediante las siguientes ecuaciones (3)(4).

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

$$HV = \frac{1.8544 * P}{d^2} \quad (4)$$

Donde se tiene d como el promedio de las diagonales en mm , P la carga aplicada en Kgf .

4.2.2. Ensayo de tracción. Se basa en lo que dictamina la norma ASTM E8²³. Se determinan las propiedades elásticas y plásticas que posee un material con los

²³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. E8/E8M – 16a. U.S. 30 p.

datos obtenidos en este ensayo, donde se somete una probeta normalizada a una carga de tracción axial estática o que va incrementando a una velocidad constante. Con ayuda de las fórmulas presentadas a continuación se puede determinar su límite elástico (δ_y), límite plástico (δ_{sut}), deformación unitaria (ε) y módulo de elasticidad o módulo de Young (E); con dicha información se pueden generar diseños de usos estáticos y dinámicos que permiten establecer correlaciones con otras variables, asociar esquemas de tenacidad y dureza, entre otras.²⁴.

$$\delta = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (6)$$

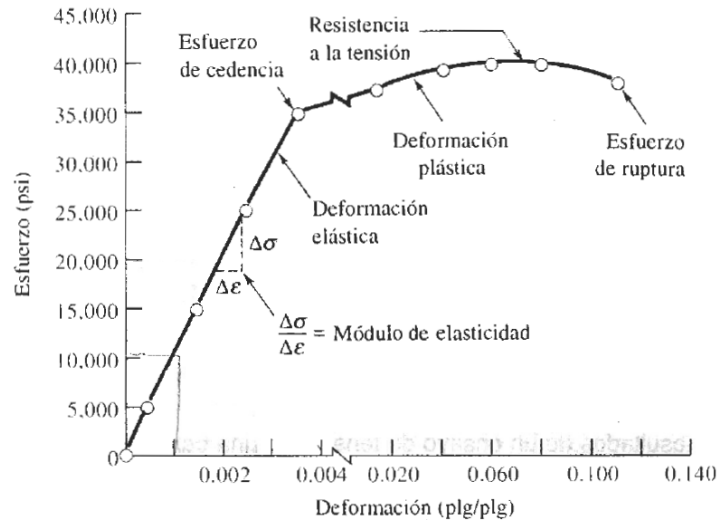
$$E = \frac{\Delta\delta}{\Delta\varepsilon} \quad (7)$$

Donde F es la fuerza ejercida sobre la probeta axialmente, A_0 es el área transversal inicial, l_0 es la longitud inicial de la probeta, l es la longitud de deformación que va sufriendo la probeta y δ es el esfuerzo.

La figura 11 representa un ejemplo de la gráfica esfuerzo vs deformación que se obtiene al tratar los datos adquiridos del ensayo de tracción. Analizando la gráfica se puede determinar las zonas de deformación elástica y plástica, el esfuerzo en su límite elástico, el esfuerzo último a la tracción, módulo de elasticidad con la pendiente en su zona elástica y la tenacidad del material con el área bajo la curva.

²⁴ ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. Mexico D.F: International Thomson Editores, 1998. p. 130-142. ISBN 968-7529-36-9

Figura 11 Gráfica esfuerzo deformación.



Fuente: ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. México D.F: International Thomson Editores, 1998. p. 132. ISBN 968-7529-36-9

4.2.3. Ensayo de fatiga. Se basa en lo estipulado en las normas ASTM entre otras, para este estudio en particular se adoptó lo dictaminado en la ASTM E606/E606M²⁵, control de tensión, en el cual se logra determinar la resistencia que posee un material al estar sometido a cargas cíclicas a una frecuencia específica, ya que en su estado de falla generará una grieta que seguirá creciendo hasta producir rotura.

La fluctuación de las cargas que sufre un cuerpo durante su tiempo de operación es dispersa, sin embargo, mediante modelos de corrección matemática se pueden llevar a modelos sinusoidales, los cuales permitirán un mejor análisis de su comportamiento. Durante los ensayos de fatiga se deben tener presente el esfuerzo mínimo (σ_{min}), el esfuerzo máximo (σ_{max}), que hacen referencia a las cargas a las que somete la probeta durante un ciclo. El componente de la amplitud (σ_a), componente de esfuerzo medio (σ_m) y la razón de esfuerzo R , que ayudan a

²⁵ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Testing of Metallic Materials. E466 – 15. U.S. 6p.

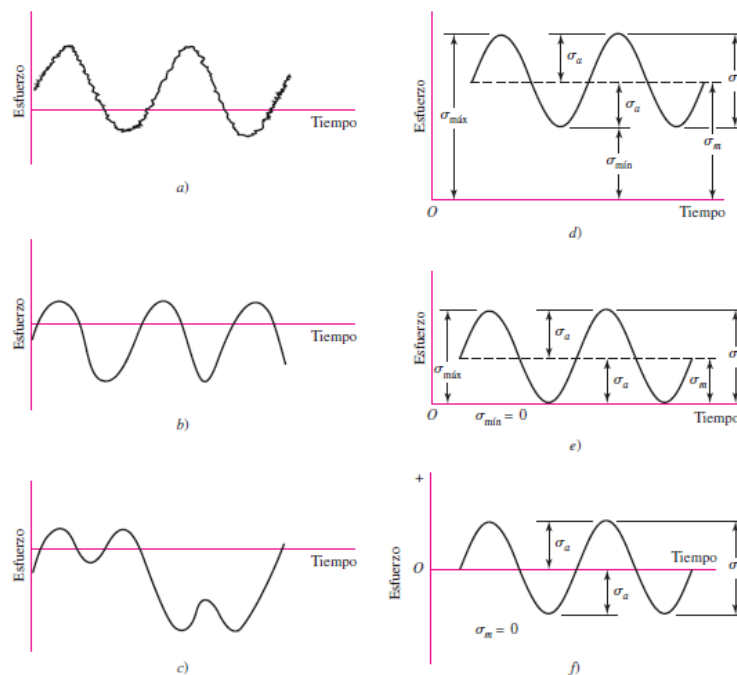
analizar el comportamiento a la que está sometida la probeta, de lo cual resultan las siguientes relaciones²⁶.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (8)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (9)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (10)$$

Figura 12 Relaciones Esfuerzo Vs Tiempo



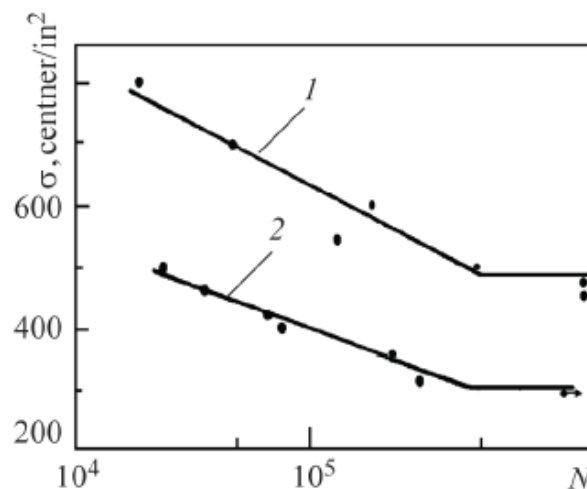
Fuente: G. BUDYNAS, Richard y J. KEITH, Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Caracterización de esfuerzos fluctuantes. 8 ed. México D.F: Mc Graw Hill, 2008. p. 293 ISBN 970-10-6404-6

²⁶G. BUDYNAS, Richard y J. KEITH, Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Caracterización de esfuerzos fluctuantes. 8 ed. Mexico D.F: Mc Graw Hill, 2008. p. 294 ISBN 970-10-6404-6

La figura 12 muestra algunas relaciones esfuerzo-tiempo: a) esfuerzo fluctuante con pulsaciones de alta frecuencia; b) y c) esfuerzo fluctuante no sinusoidal; d) esfuerzo fluctuante sinusoidal; e) esfuerzo repetido; f) esfuerzo sinusoidal completamente invertido.

A lo largo de los años, varios ingenieros y científicos han aportado sus ideas al estudio de la fatiga, August Wöhler fue uno de los pioneros en dar aporte al estudio de la fatiga en materiales, estableció una relación proporcional aproximada entre el límite de fatiga y la resistencia a la tracción para metales ferrosos, ver ecuación 1, con el fin de simplificar su búsqueda, pero esta solo puede usarse para ciertos materiales y condiciones de prueba, aun así, no es lo suficientemente exacta. Wöhler expresaba los datos encontrados en número de ciclos (N) con el límite de fatiga encontrado σ_f , lo que más tarde se graficó y ahora es llamado el diagrama de Wöhler²⁷ y se muestra en la figura 13.

Figura 13 Primeras curvas de fatiga.



Fuente: Tóth, L., Yarema, S.Y. Formation of the science of fatigue of metals. Part 1. 1825–1870. *Mater Sci.* 2006, vol. 42, nro. 5, p. 679

²⁷ Tóth, L., Yarema, S.Y. Formation of the science of fatigue of metals. Part 1. 1825–1870. *Mater Sci.* 2006, vol. 42, nro. 5, p. 673–680.

4.2.4. Microscopía. La normal ASTM E3-11²⁸ brinda los parámetros necesarios para la realización de este ensayo. La microscopía tiene como objetivo observar la microestructura de los materiales y determinar el tamaño y forma de grano que se presenta en la zona observada, para así tener una idea de las propiedades que presenta el material dependiendo de la zona.

4.3. MATERIALES²⁹

La vida ingenieril se encuentra rodeada de materiales de manera cotidiana. Durante los procesos de diseño se hace uso de materiales para lograr su manufactura, estos se deben seleccionar de acuerdo con sus propiedades y analizar las fallas de estos. Se clasifican en cinco grupos: metales, polímeros, semiconductores, cerámicos y materiales compuestos.

4.3.1. Los metales³⁰. Generalmente tienen como características principales buena conductividad térmica y eléctrica, una resistencia, rigidez, ductilidad y resistencia al impacto relativamente alta. Cuando hay una combinación de metales, se denominan aleaciones, esto se realiza con el fin de modificar algunas propiedades y que el material durante su tiempo de uso resista las condiciones y cargas a las cuales estará sometido.

4.3.1.1. Aceros³¹. Existen 2 tipos de aleaciones, ferrosas y no ferrosas. Como su nombre lo indica, las aleaciones ferrosas se basan en una composición de hierro (Fe) y carbono (C), mientras que las no ferrosas se basan en una composición diferente. Los aceros son una aleación ferrosa con una cantidad de carbono hasta 6.67% en peso. El diagrama Hierro-Carbono mostrado en la figura 14, permite

²⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. E3 - 11. U.S. 12 p.

²⁹ ASKELAND. Op. Cit., p.5.

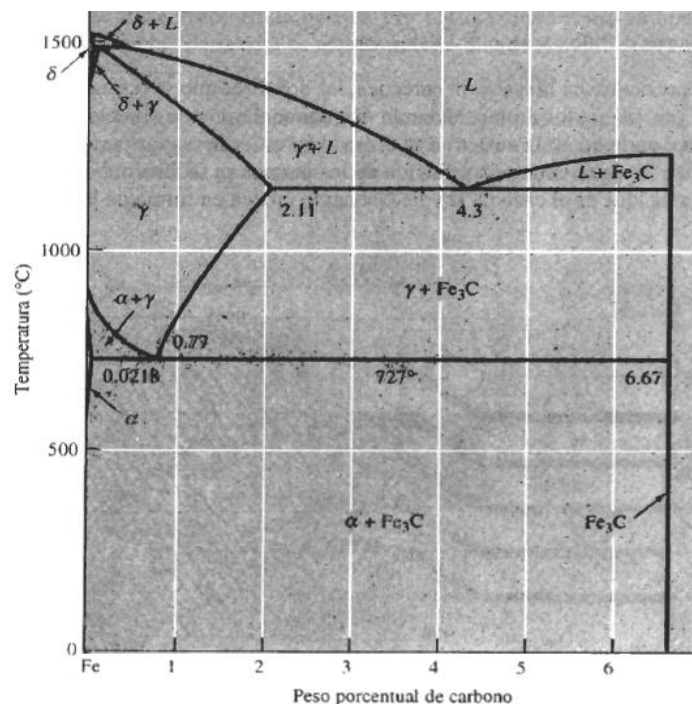
³⁰ Ibid., p 6.

³¹ Ibid., p 320.

evidenciar el comportamiento microestructural que presenta el acero de acuerdo con su tratamiento térmico. Un acero puede presentar diferentes propiedades de acuerdo con el tratamiento térmico, servicio de carga, transformación, conformado o manufactura que haya sido aplicado.

- **El acero estructural ASTM A36³²** es un acero ampliamente usado en la industria de la construcción de estructuras metálicas y elementos de máquina debido a su buena soldabilidad y versatilidad ya que se encuentra en diferentes formas (láminas, alambres, varillas, etc.). Su composición química y propiedades mecánicas normalizadas son presentadas en las tablas 2 y 3.

Figura 14 Diagrama Hierro – Carbono.



Fuente: ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. México D.F: International Thomson Editores, 1998. p. 297. ISBN 968-7529-36-9

³² AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Specification for Carbon Structural Steel. A36/A36M-19. U.S. 3 p.

Tabla 2. Composición química del acero estructural ASTM A36.

C ,Max %	Mn, %	P, Max%	S, Max %	Si, %	Cu, min %
0.26	...	0.04	0.05	0.40 Max	0.20

Fuente: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING ANG MATERIALS (ASTM). Standard Specification for Carbon Structural Steel. A36/A36M-19. U.S. p. 3.

Tabla 3 Propiedades mecánicas del acero estructural ASTM A36.

Tensile Strength (MPa)	Yield point, min (MPa)	Elongation min (%)
400-550	250	20

Fuente: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING ANG MATERIALS (ASTM). Standard Specification for Carbon Structural Steel. A36/A36M-19. U.S. p. 2.

4.4. ANTECEDENTES

Las revisiones correspondientes a las correlaciones de juntas soldadas se encuentran poco en la literatura. Se encuentran análisis y modelos matemáticos aplicados a materiales base sin afectación por soldadura, mientras que a juntas soldadas solo se encuentran análisis y estudios independientes.

4.4.1. J.C. Pang³³. Muestra en su artículo titulado “*General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials*” el nuevo modelo matemático universal de fatiga, donde relaciona el esfuerzo último a la tracción y la resistencia a la fatiga para un acero SAE 4340, no obstante, compara su modelo

³³ J.C,Pang. Et al. Op cit

con los valores experimentales de otros aceros donde obtiene un margen de error de solo un 5% y al compararlo con aleaciones no ferrosas el margen de error aumenta hasta un 20%.

4.4.2. Duqiang Ren³⁴. Realiza un análisis de los efectos que genera la soldadura TIG sobre las propiedades mecánicas en una aleación de titanio, en el artículo titulado “*Investigation of tensile and high cycle fatigue failure behavior on a TIG welded titanium alloy*” donde se realizan ensayos de dureza, tracción, fatiga, y microscopía con el fin de localizar las zonas afectadas por calor, grietas y dimensionar los tamaños de grano obtenidos después de la afectación térmica.

4.4.3. Jinkeun Oh³⁵. Presenta en su artículo titulado “*Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds*” la relación que se encuentra entre la fatiga y su modo de falla con dos procesos de soldadura, TIG y EB (Electro Beam) Welding, donde se descubre que los resultados de la fatiga de alto ciclaje indicaron que el proceso EB Weld tiene menor resistencia debido a la porosidad que genera el modo de transferencia de calor. También analizaron la microestructura inicial y final para observar el cambio en los granos y detectar las grietas.

4.4.4. M.G. Renteria, V.L. Morelos y R.G. Hernandez³⁶. Presentan en el artículo llamado “*Efecto de la interacción electromagnética de baja intensidad en la microestructura y propiedades mecánicas de soldaduras de acero inoxidable dúplex*”, los cambios presentados al momento de la interacción electromagnética reducen el tamaño de la zona afectada por calor y refina el grano en la fusión

³⁴ DUQIANG, Ren, et al. Investigation of tensile and high cycle fatigue failure behavior on a TIG welded titanium alloy. *Intermetallics*. 2021, Vol. 132, 107115, 12 p. ISSN 0966-9795

³⁵ JINKEUN, Oh, et al. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds. *Materials Science and Engineering: A*. 2003, Vol 340, Issues 1–2, pp 232-242. ISSN 0921-5093.

³⁶ GARCIA RENTERIA, Marco; LOPEZ MORELOS, Victor y GARCIA HERNANDEZ, Rafael. Efecto de la interacción electromagnética de baja intensidad en la microestructura y propiedades mecánicas de soldaduras de acero inoxidable dúplex. *INGENIUS*. 2014, Vol.12, pp 40-45.

contribuyendo a la mejora de la relación de fases de ferrita-austenita, todo esto a partir de un ensayo de tracción y la microscopía.

4.4.5. Liangbe Li³⁷. Aborda el tema de los esfuerzos residuales que genera la soldadura en estructuras que trabajan a presión en el artículo llamado “*Residual Stress release and its effects on the fatigue strength of typical welded joints in cone-cylinder pressure structures*” donde se hace uso de elementos finitos como método de ensayo no destructivo, luego se realizaron ensayos experimentales de fatiga donde se determinó que la tensión residual cerca al cordón de soldadura se liberaría, en gran medida, bajo una carga externa.

³⁷ LIANGBI, Li, et al. Residual Stress Release and Its Effects on the Fatigue Strength of Typical Welded Joints in Cone-Cylinder Pressure Structures. *Applied Ocean Research*.2021, Vol. 111, 102673, 8 p. ISSN 0141-1187.

5. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta la literatura relacionada para el desarrollo del presente proyecto se siguieron 3 fases, que, de forma general se comprenden desde la compra del acero estructural ASTM A36 para la generación de probetas normalizadas, pasando por el proceso de soldadura y ensayos mecánicos en los laboratorios que ofrece la escuela de ingeniería mecánica, hasta la entrega y análisis de los resultados. Cada fase de la metodología dio solución a cada objetivo específico propuesto.

5.1. OBTENCIÓN Y GENERACIÓN DE PROBETAS

5.1.1. Obtención de la lámina de acero. Actualmente en el mercado se podrá encontrar distintos proveedores de láminas de acero cercanas al área metropolitana de Bucaramanga, con uno de ellos se obtuvo una lámina de acero estructural ASTM A36 de 1.2m x 2.4m con un espesor de 4.5mm, la cual será destinada para la presente investigación, en el ANEXO A se muestra el certificado de composición de la lámina dada por el proveedor. Una vez obtenida la lámina de acero se destinó a corte por cizallamiento hidráulico, ya que es uno de los métodos de corte donde no se altera térmicamente el material y es más económico.

La norma UNE-EN ISO 15614-1 establece las medidas estandares para el corte de la lámina con el fin último de creación de las probetas soldadas a tope, en la Figura 14 se puede apreciar un plano referente al corte realizado en la cizalla creado en SolidWorks, las dimensiones estan dadas en *mm*. El detalle C indica que se debe respetar la continuidad de la lámina al momento de aplicar la soldadura.

Figura 15 Plano corte por cizallamiento a la lámina.

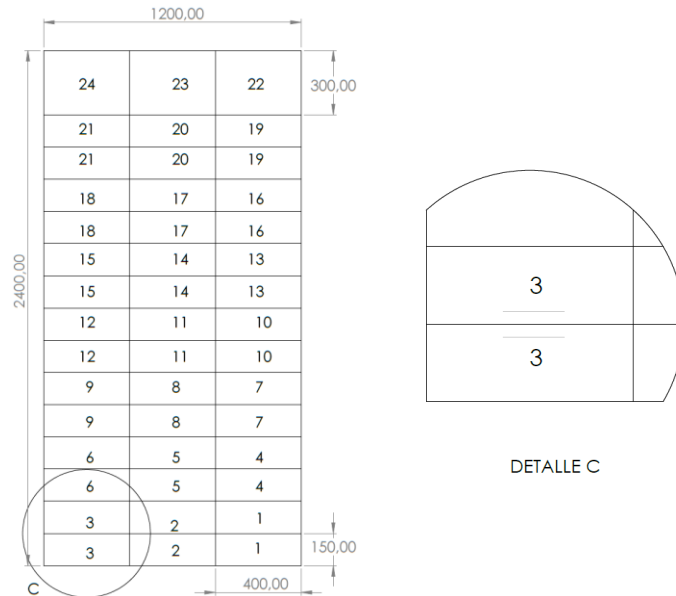


Figura 16 Máquina ALPMAC MODEL V, cizallamiento de la lámina de acero estructural ASTM A36.



5.1.2. Proceso de soldadura. Una vez obtenidas las láminas, fueron destinadas a la aplicación de soldadura a tope, dejando una separación entre las láminas de $1/8$ in, bajo el proceso GMAW, comúnmente conocido como MAG, ya que se utilizó un gas activo de protección, mezcla $Ar-CO_2$, con modalidad de transferencia por aspersión. El equipo utilizado fue el *SWEISS SKY WORKS 3550*, propiedad de la escuela de ingeniería mecánica, usando como material de aporte un

electrodo de denominación *ER70S-6*, en el ANEXO B se muestra el certificado de calidad dado por el proveedor donde se especifica la composición del alambre y sus respectivas propiedades mecánicas.

Figura 17 Equipo de Soldadura SWEISS SKY WORKS 3550.



Tabla 4 Parámetros proceso GMAW en transferencia por aspersion.

V [Vol]	A [Amp]	Gas [L/min]
24,4	185	15

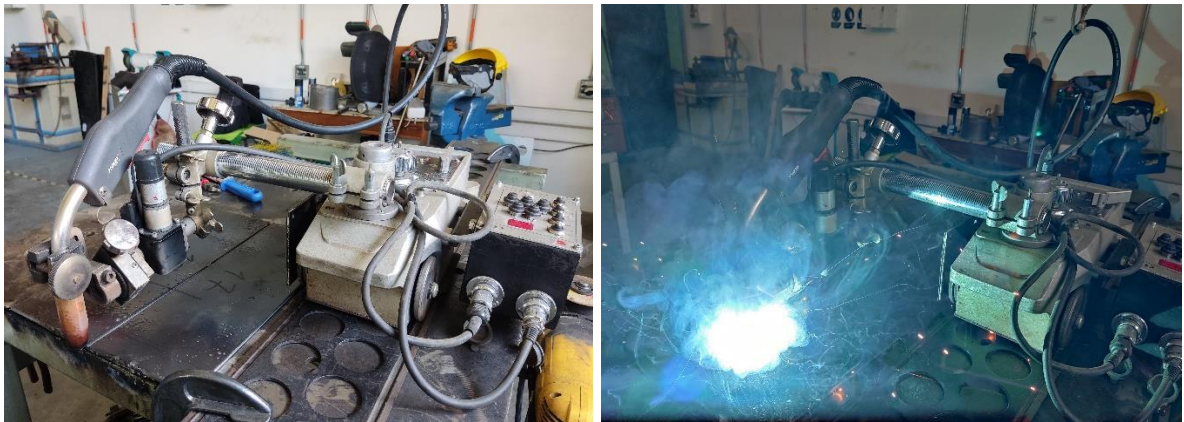
Los parámetros utilizados para la aplicación del proceso de soldadura que se muestran en la tabla 4, se obtuvieron basados en la norma AWS D1.1/D1.1M:2020 y los rangos presentados por los proveedores del material de aporte.

Un soldador certificado fue el encargado de aplicar la soldadura según lo dictamina las normas, no obstante, la soldadura no fue aplicada manualmente para no depender de las habilidades del soldador, se hizo uso de un sistema electromecánico automático de desplazamiento constante *HUAWEI* modelo *HK-12 MAX-3S*, ver Figura 18, el cual nos garantizó una velocidad de avance y oscilación en la aplicación constante. Los parámetros del mecanismo de arrastre se muestran en la tabla 5.

Tabla 5 Parámetros mecanismo de arrastre.

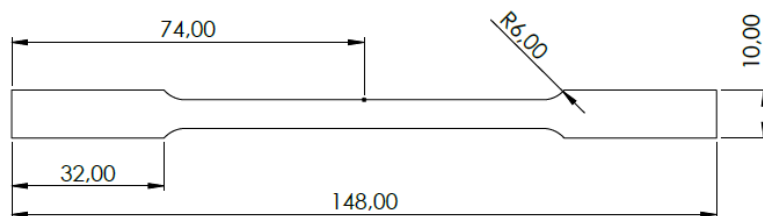
Ancho [in]	Ciclos [Hz]	Vel. Arrastre [mm/min]	Retrasos [s]		
			Izquierda	Centro	Derecha
0,60	90	115	0,01	0,08	0,01

Figura 18 Proceso de soldadura GMAW automatizado.

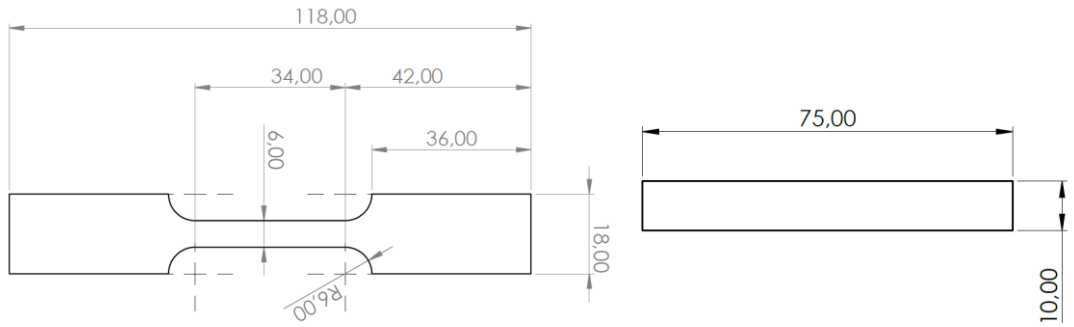


5.1.3. Obtención de probetas. Bajo las normas ASTM E8, ASTM E606 y la ASTM E384 se estableció la geometría adecuada para cada tipo de prueba a realizar, en la figura 19 se aprecian los planos de las probetas obtenidos para realizar cada uno de los ensayos mecánicos con unidades en *mm*.

Figura 19. Planos de probetas normalizadas: a) Ensayo de tracción, b) Ensayo de fatiga, c) Ensayo de micro dureza.



a)



(b)

(c)

Una vez se obtuvo el material soldado y las geometrías de las probetas normalizadas se procedió a realizar el corte de estas por medio de chorro de agua, para garantizar un buen acabado y no modificar la alteración térmica sufrida por la lámina después de la aplicación de la soldadura.

Figura 20 Máquina corte por chorro de agua *FLOW MACH 3*.



5.2. ENSAYOS MECÁNICOS

La escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander ofrece sus laboratorios para la realización de este tipo de ensayos mecánicos, en este caso se hizo uso de 2 laboratorios; el laboratorio de ensayos mecánicos, para los ensayos de tracción y fatiga; y el laboratorio de tribología para la realización del ensayo de micro dureza, además la escuela de metalurgia ofreció sus servicios

para la visualización de la microestructura del acero con un microscopio en el laboratorio de metalografía.

Con el fin de obtener las propiedades mecánicas del material y observar los cambios que se presentaron debido a la afectación térmica generada a partir de la soldadura, se realizaron las pruebas descritas a continuación.

5.2.1. Ensayo de tracción. Se realizó bajo la norma ASTM E8 en la máquina universal para ensayos mecánicos *MTS BIONIX* que es controlada por el software *MULTIPURPOSE ELITE*. La elongación que iba sufriendo la probeta era captada por el extensómetro laser *MTS LX 500*, la velocidad de deformación fue $V_{def} = 4 \text{ mm/min}$. El objetivo era realizar la gráfica esfuerzo vs deformación para determinar σ_y por medio del método *off-set*. El ensayo se realizó para 10 probetas de control (sin proceso de soldadura) y 10 probetas soldadas bajo el proceso en estudio. La figura 21 presenta el montaje que se realizó en el laboratorio.

Figura 21 Ensayo de Tracción.



5.2.2. Ensayo de fatiga. Se realizó bajo la norma ASTM E606 en la misma máquina utilizada en el inciso anterior. Una vez obtenidos y tratados los datos del

ensayo de tracción, se procedió a trabajar el ensayo de fatiga con una $R = 0.1$ en tracción controlado por deformación, se tomaron 4 niveles respecto a su límite elástico (0.95, 0.90, 0.85, 0.80) σ_y a una frecuencia de 40 Hz para estimar la cantidad de ciclos que resiste el material. Con esta información se realizó la curva S-N de Wöhler para llevar a cabo su respectivo análisis. El ensayo de fatiga fue realizado para 20 probetas de control y 20 probetas soldadas con el fin de ser comparativos.

5.2.4. Ensayo de micro dureza. Se realizó bajo la norma ASTM E384. Para este ensayo se hizo uso del laboratorio de tribología donde se encuentra la máquina *BRUKER UMT TRIBOLAB* con un indentador punta de diamante, aplicando una fuerza de 4N donde se llevó a cabo un barrido de microindentaciones cada 0.4 mm desde el material base de la placa 1 hasta el material base de la placa 2, pasando por las zonas afectadas por calor y la zona fusión; sobre una probeta debidamente pulida hasta dejarla tipo espejo y atacada con NITAL al 2% para el reconocimiento de la microestructura, como lo indica la norma ASTM E3 y ASTM E407 respectivamente. Las huellas del ensayo de dureza se pueden observar a simple vista con el microscopio.

Figura 22 Ensayo de Micro dureza en *BRUKER UMT TRIBOLAB*.

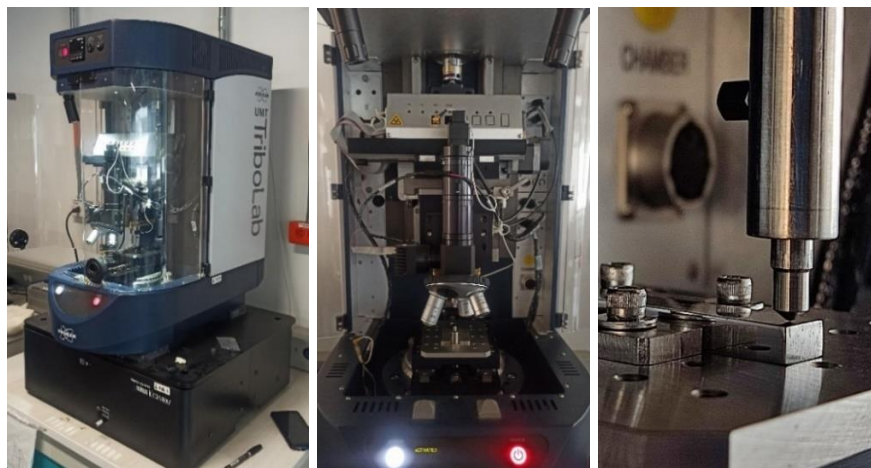
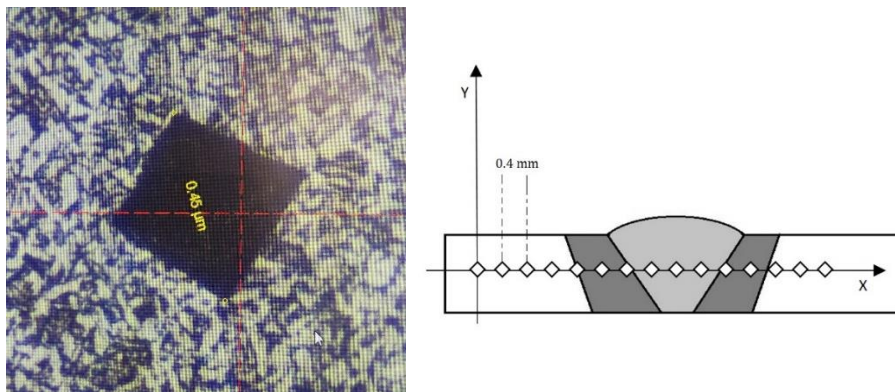


Figura 23 Tipo de huella a buscar y dirección de las microindentaciones.



5.2.3. Microscopía. Con el fin de observar en el microscopio el cambio microestructural que presentó el material e identificar las zonas afectadas térmicamente, las probetas fueron montadas en baquelita y preparadas bajo la norma ASTM E3-11 para lograr un acabado tipo espejo para después atacar con *NITAL* al 2% durante 12 segundos como lo indica la norma ASTM 407 y lograr observar así su microestructura. Se usó el microscopio invertido *OLYMPUS GX-71* que se observa a continuación.

Figura 24 Microscopio y probeta usados para observar la microestructura.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. PROBETAS OBTENIDAS

Una vez cortadas y soldadas las láminas a tope de acero estructural ASTM A36 bajo el proceso GMAW, se obtuvieron las probetas normalizadas bajo corte por chorro de agua que iniciaron los ensayos mecánicos. Aquí se cumplió el primer objetivo específico propuesto, ver figura 25.

Figura 25 Probetas cortadas y soldadas: a) Control, b) Tracción, c) Fatiga.

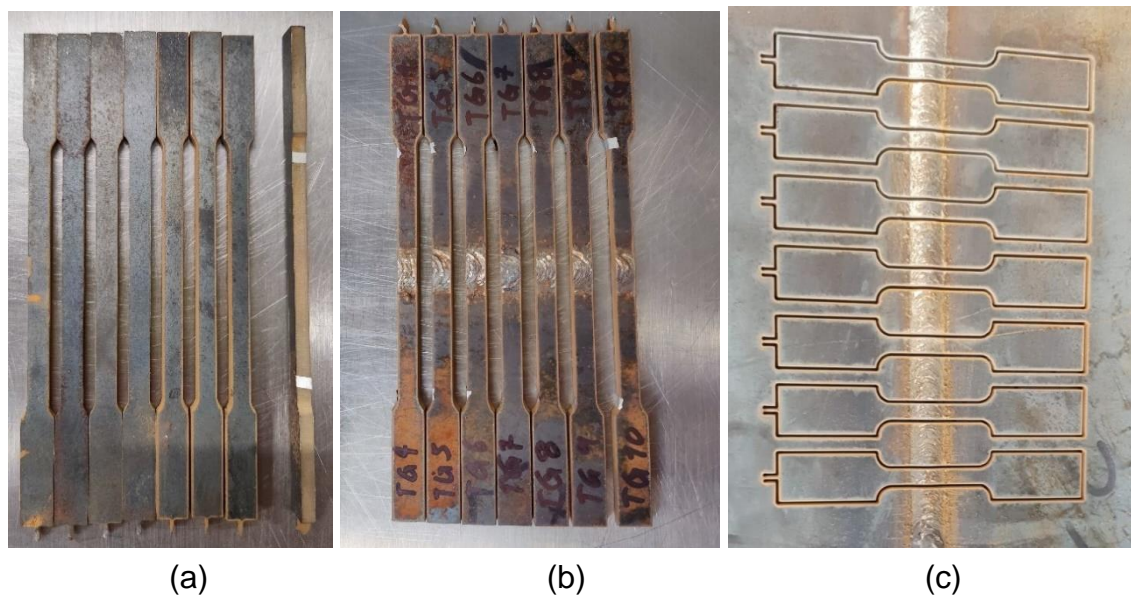


Figura 26 Inspección de cordón de soldadura.



La soldadura fue inspeccionada visualmente y no se encontraron socavaduras debido a las altas temperaturas, tampoco se encontraron agujeros tipo gusano en la sección transversal de la soldadura. La penetración obtenida fue la esperada, en cada par de lámina soldadas se respetó la distancia de 1 *in* de inicio y final del cordón de soldadura para la obtención de las probetas según lo dictamina la norma AWS B4.0.

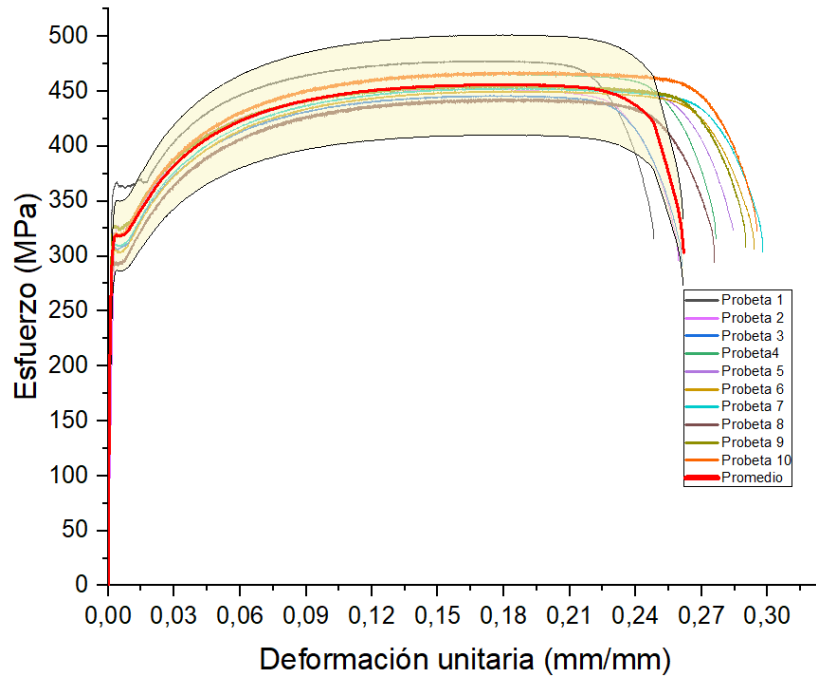
6.2. ENSAYO DE TRACCIÓN.

Finalizado el ensayo de tracción se procesaron los datos de *Fuerza (N)* y *Deformación (mm)* entregados por la máquina MTS para convertir los datos en términos de *Esfuerzo (MPa)* y *Deformación unitaria (mm/mm)* respectivamente. Dichos datos tratados se encuentran en el Anexo C. A continuación, se presentan las gráficas 1 y 2 obtenidas a partir del ensayo. Según la norma ASTM E8 las curvas que se encuentren en un rango fuera del 10% de error (bandas amarillas) a cada lado del promedio son inconsistentes.

Todas las probetas fallaron en el material base tal como se muestra en la figura 27. En la gráfica 1 se observa que la curva referente a la probeta 1 es la más alejada del grupo, pero no sale de la región sombreada, no obstante, en la sección de la zona elástica se observa que está por fuera, por tanto, no se tuvo en cuenta al momento de realizar el promedio. En la gráfica 2 la probeta 6 presenta las mismas características de la probeta 1 de la gráfica 1.

Con fin de observar con mayor claridad el comportamiento de las diferentes curvas se presenta en la gráfica 3 las curvas promedio de las probetas de control y las probetas afectadas con el proceso de soldadura GMAW, donde se observa que las probetas tienen un comportamiento similar, sin embargo, presenta una disminución de su límite elástico y una reducción del 33% aproximadamente en la deformación.

Gráfica 1 Probetas de control Esfuerzo Vs deformación.



Gráfica 2 Probetas GMAW Esfuerzo vs Deformación.

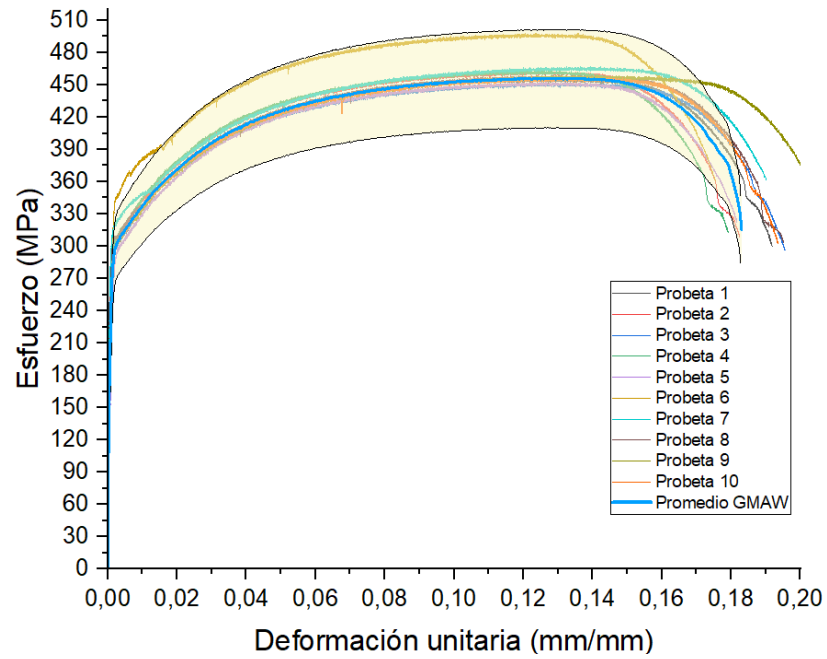
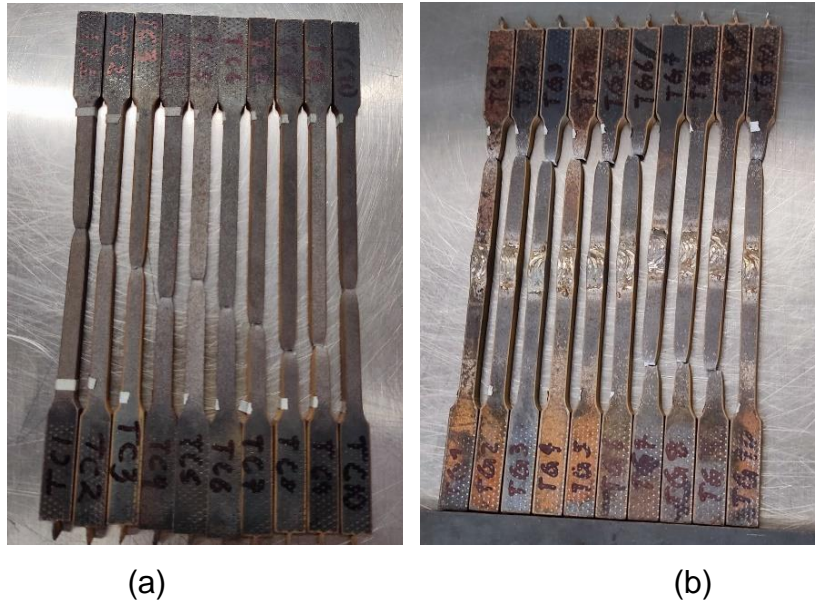
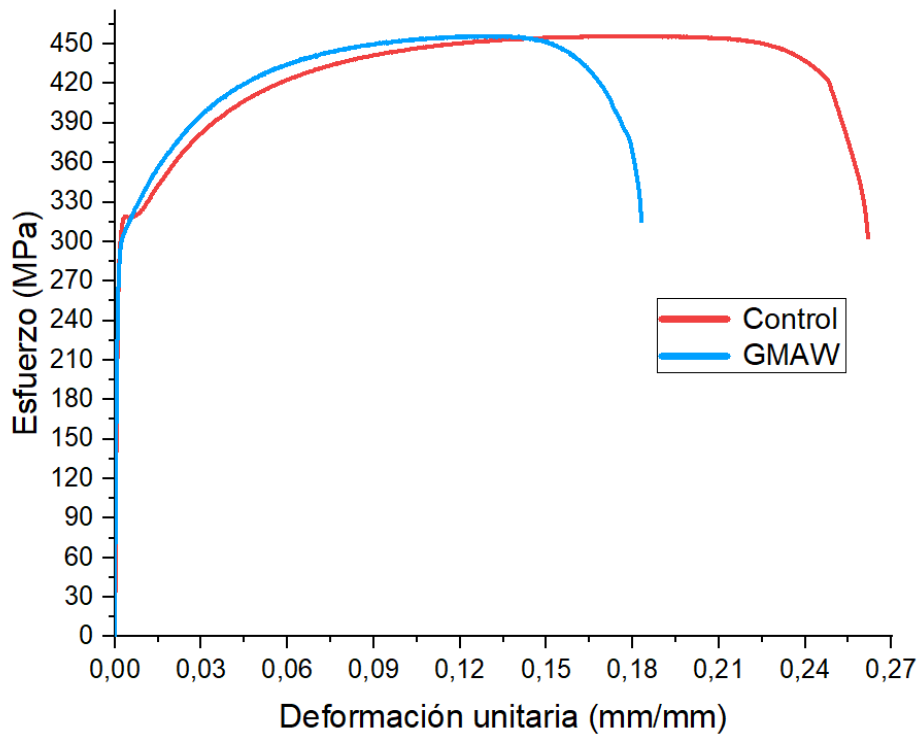


Figura 27 Falla de la probeta en el ensayo de tracción: a) control, b) GMAW.



Gráfica 3 Promedio Esfuerzo vs Deformación.



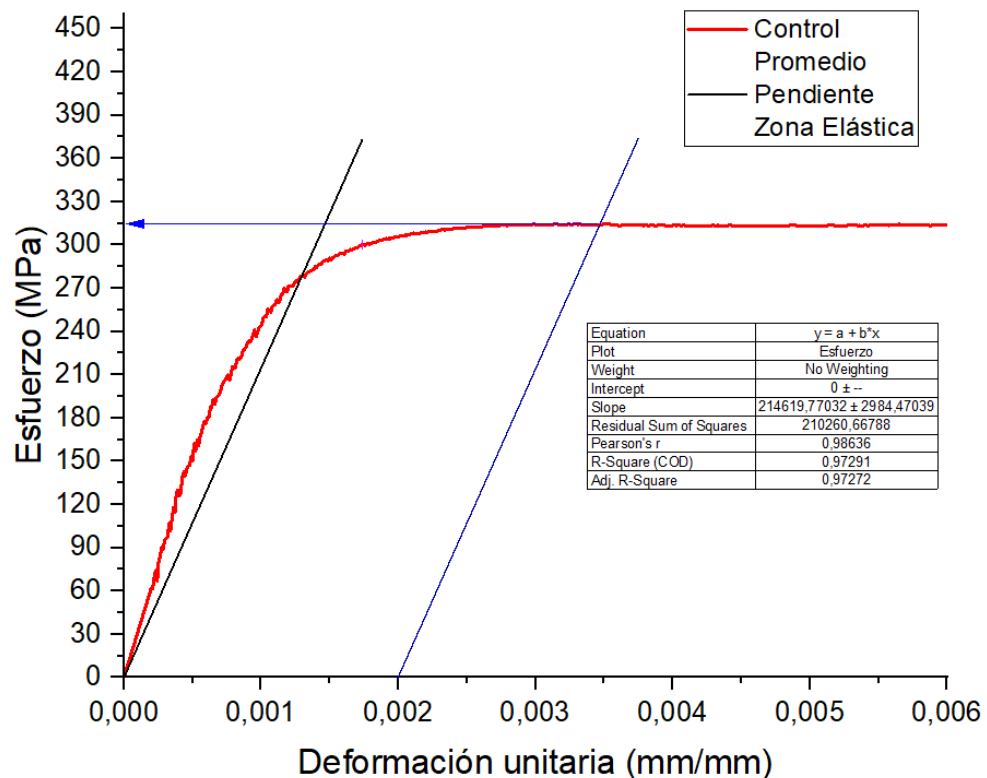
Una vez obtenidas las curvas promedio se determinó el valor del límite elástico por medio del método grafico Off-set y el módulo de elasticidad fue obtenido a través

de una regresión lineal para cada curva presente en la zona elástica. Las gráficas 4 y 5 presentan la información detallada para cada caso. La *Tabla 6* presenta un comparativo de las propiedades mecánicas obtenidas a través del ensayo de tracción, aquí se cumple el segundo objetivo específico propuesto.

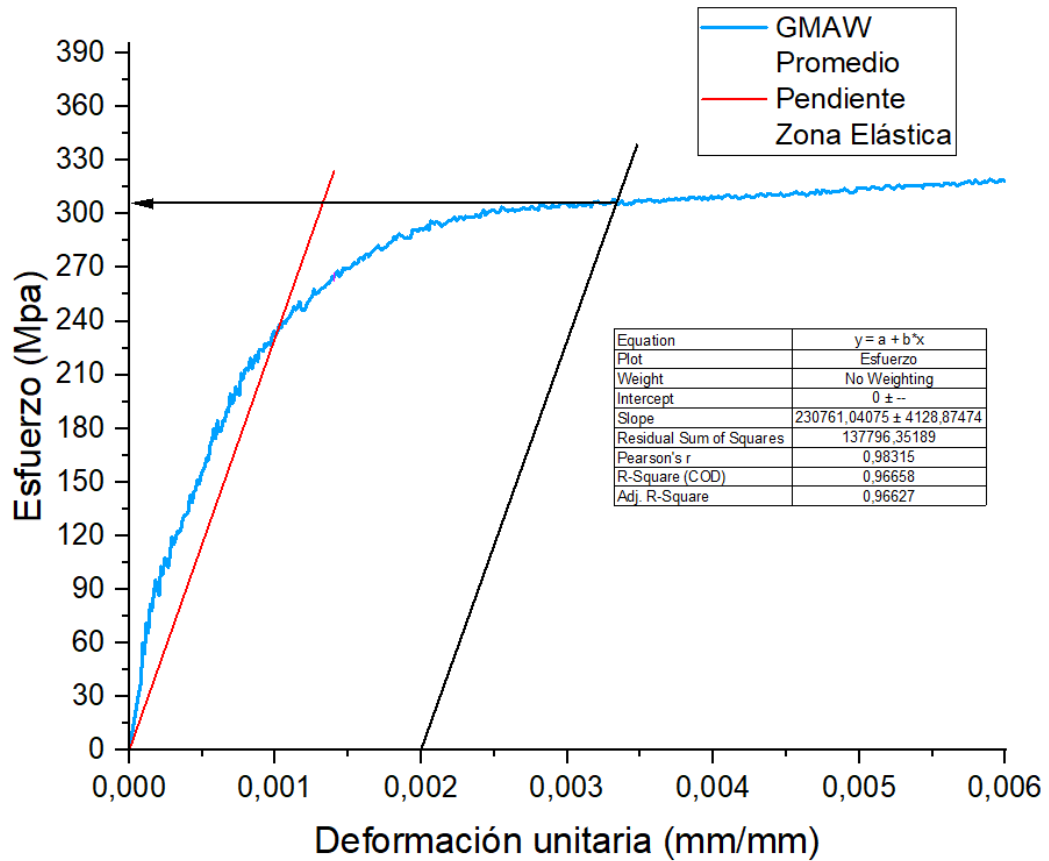
Tabla 6 Propiedades mecánicas obtenidas a partir del ensayo de tracción.

	Esfuerzo último a la tracción σ_{ut} [MPa]	Límite elástico σ_y [MPa]	Deformación unitaria [%]	Módulo de elasticidad [GPa]
CONTROL	456,11	315	26,18%	214,62
GMAW	456,22	308	18,31%	230,76

Gráfica 4 Probetas de control Esfuerzo vs Deformación zona elástica.



Gráfica 5 Probetas GMAW Esfuerzo vs Deformación zona elástica.



6.3. Ensayo de Fatiga

Una vez obtenidos los datos de σ_y para las probetas de control y las probetas GMAW del ensayo de tracción se procedió a determinar el esfuerzo correspondiente de los 4 niveles de deformación a los que se sometieron las probetas donde se garantizó una $R = 0,1$, no obstante, al momento de iniciar el ensayo de fatiga, la deformación no era el único parámetro para dar inicio, como la MTS posee un controlador PID para este tipo de prueba tocaba ajustar cada variable, todos estos datos se encuentran en el anexo D. La tabla 7 nos muestra los valores promedio de deformación y esfuerzo a los cuales fueron sometidas las probetas en cada nivel.

Tabla 7 Niveles de esfuerzo en el ensayo de fatiga.

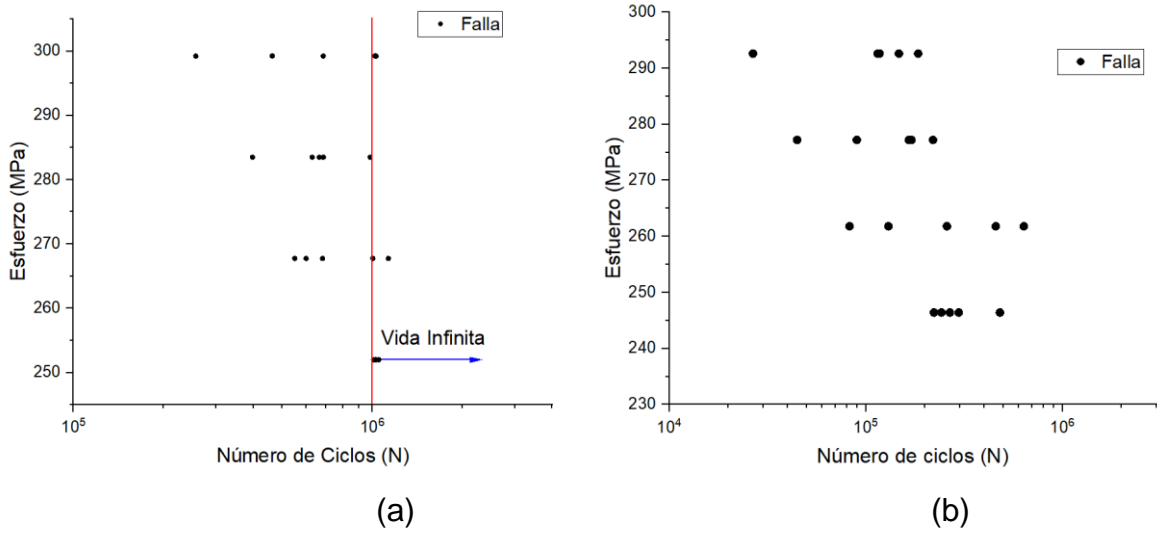
Proceso	Nivel	σ_{MAX}	σ_{MIN}	$\varepsilon_{MAX} X10^{-3}$	$\varepsilon_{MIN} X10^{-4}$
CONTROL	1	299,25	29,92	1.39	1.39
	2	283,50	28,35	1.32	1.32
	3	267,75	26,77	1.24	1.24
	4	252	25,20	1.17	1.17
GMAW	1	292,60	29,26	1.26	1.26
	2	277,20	27,72	1.20	1.20
	3	261,80	26,18	1.13	1.13
	4	246,40	24,64	1.06	1.06

Una vez procesados los datos del ensayo, la gráfica 6 muestra los datos obtenidos en cada nivel de la prueba para cada proceso, donde podemos constatar que el material sin afectación va a vida infinita, cuando se trabaja con un esfuerzo de $S = 252 MPa$ mientras que, al afectarla, no se llegó a encontrar un valor de vida infinita dentro de los 4 niveles de estudio. La aplicación de la soldadura reduce hasta en un nivel de un orden de 10^5 a 10^4 debido a la afectación térmica y los componentes del material de aporte.

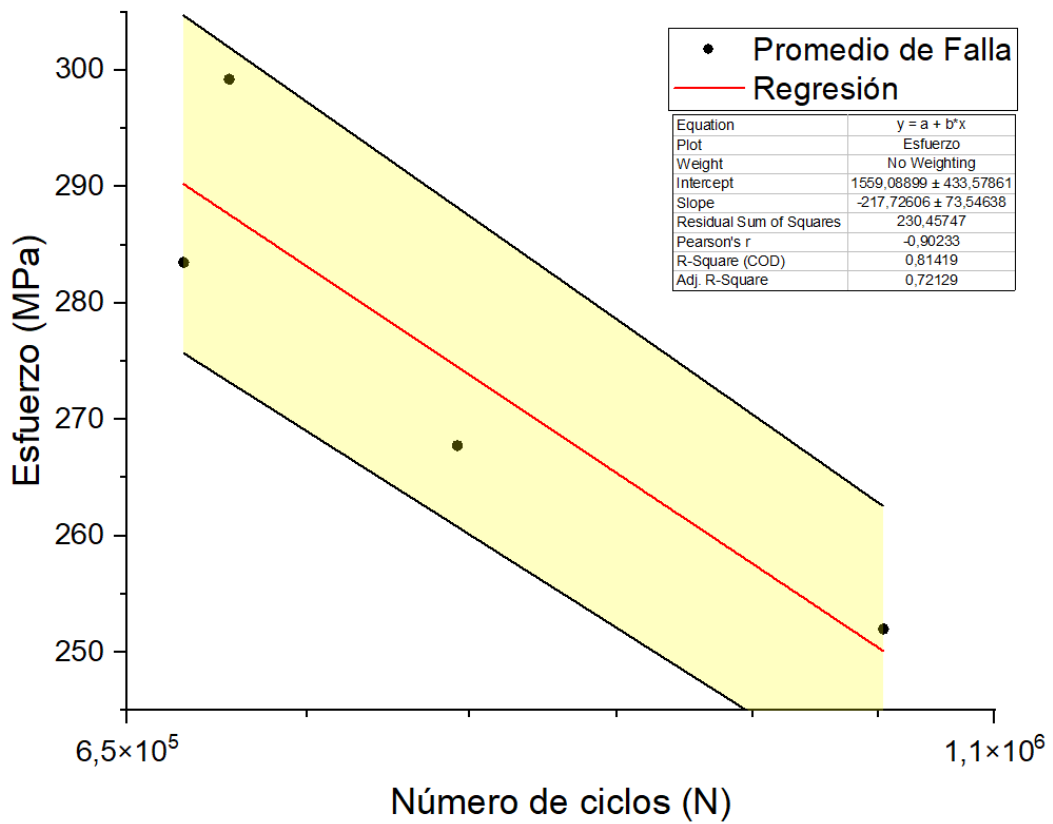
Las gráficas 7 y 8 enseñan la regresión de los valores promedios obtenidos como lo indica la norma ASTM 739, las ecuaciones 11 y 12 son las ecuaciones de cada curva respectivamente. Las probetas sometidas al ensayo de fatiga presentaron una zona de falla diferente a las sometidas al ensayo de tracción, estas fallaron en la zona de fusión.

Las desviaciones obtenidas de para el ensayo de fatiga parten desde el ensayo de tracción, ya que con esos datos se continuó la investigación, estos errores se atribuyen al montaje de las probetas en las mordazas, calentamiento del aceite de la máquina, vibraciones debido la base donde se encuentra montada la MTS.

Gráfica 6 Resultados del ensayo de fatiga: a) Control, b) GMAW.

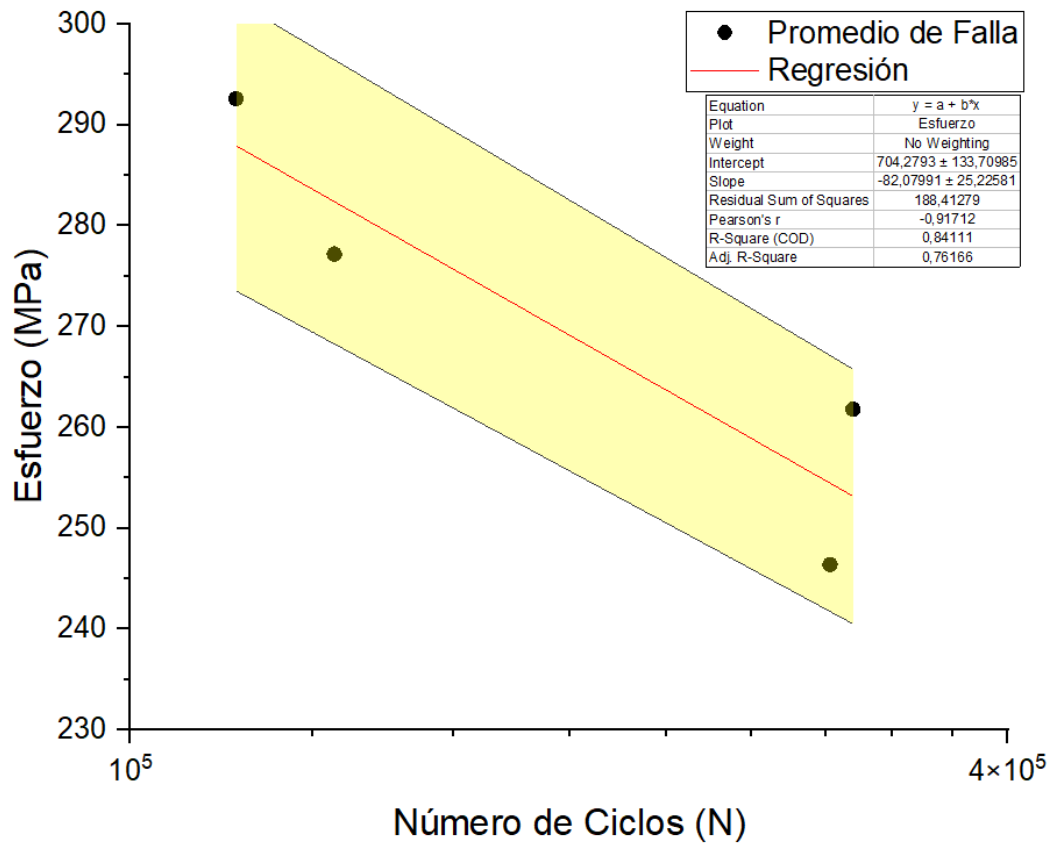


Gráfica 7 Curva S-N probetas de control.



$$\text{Log}(N) = 7.16 - 4.59 \times 10^{-3} S \quad (11)$$

Gráfica 8 Curva S-N probetas soldadas.



$$\text{Log}(N) = 8.58 - 0.01S \quad (12)$$

Figura 28 Falla de la probeta en el ensayo de fatiga.



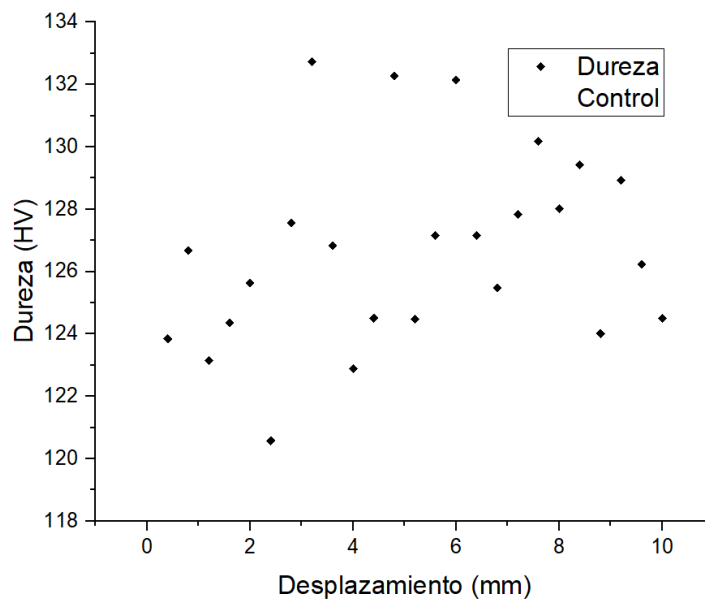
La figura 28 muestra la falla de una probeta en el ensayo de fatiga donde se observó una nucleación desde la parte inferior de la probeta, raíz de la soldadura y propagándose a través de la zona de fusión a pesar de tener mayor cantidad de área.

6.4. Ensayo de dureza.

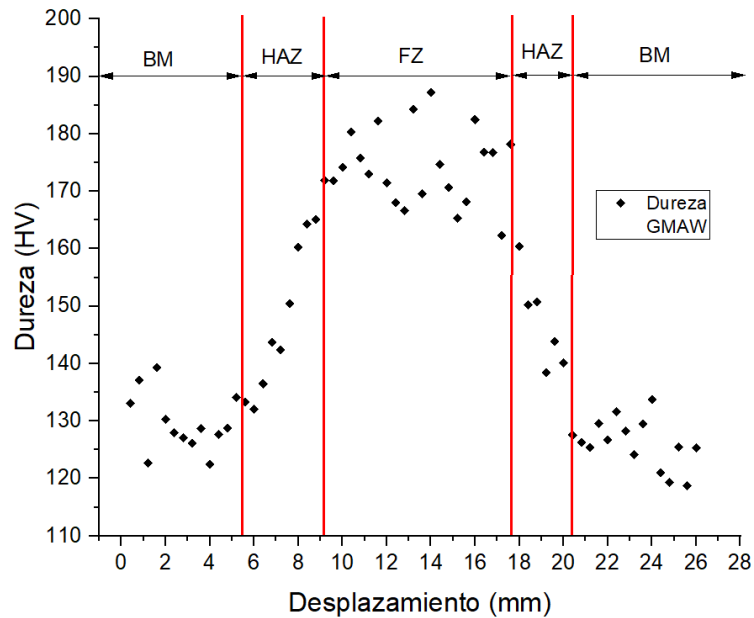
Hallados los datos de dureza se procedió a realizar la respectiva gráfica para observar con mayor claridad la diferencias con afectación térmica. En la gráfica 9 se aprecian los datos de dureza del material base sin afectación con un valor promedio de $HV = 126.12$ para el acero estructural ASTM A36.

En la gráfica 10 se aprecia que a medida que se acerca a la zona de fusión, la dureza va incrementando, estas zonas de incremento son las zonas afectadas térmicamente por el calor de la soldadura, y la zona de fusión, es la zona que presenta una mayor dureza, siendo el promedio de esta $HV = 174.18$.

Gráfica 9 Dureza VS Desplazamiento probeta de control.



Gráfica 10 Dureza VS Desplazamiento probeta soldada GMAW.



6.5. Microestructura.

Al presentar propiedades mecánicas diferentes después de la afectación térmica con la soldadura, se observó a través del microscopio el cambio de las diferentes zonas. El metal base (BM) presenta una fase ferrítica con colonias de perlita fina, zona blanca y zona oscura respectivamente, siendo mayor la fase ferrítica que la de perlita, característica de los aceros estructurales de bajo carbono, ver figura 29.

La zona afectada térmicamente (HAZ), presentó un tamaño de grano mayor con respecto al BM, que va creciendo a medida que se acerca a la zona de fusión (FZ). Los tamaños de grano van desde las 861.82 micras (0.861 mm) hasta 2764 micras (2,764 mm). Se evidencia una constitución por ferrita alotrópica ubicada en los límites de grano, ferrita acicular que crece desde el límite de grano al interior de este y colonias de perlita (zona oscura).

En la zona de fusión se encontró una estructura columnar de ferrita contraria a la dirección de solidificación con colonias de perlita.

Figura 29 Micrografía material base a 500X.

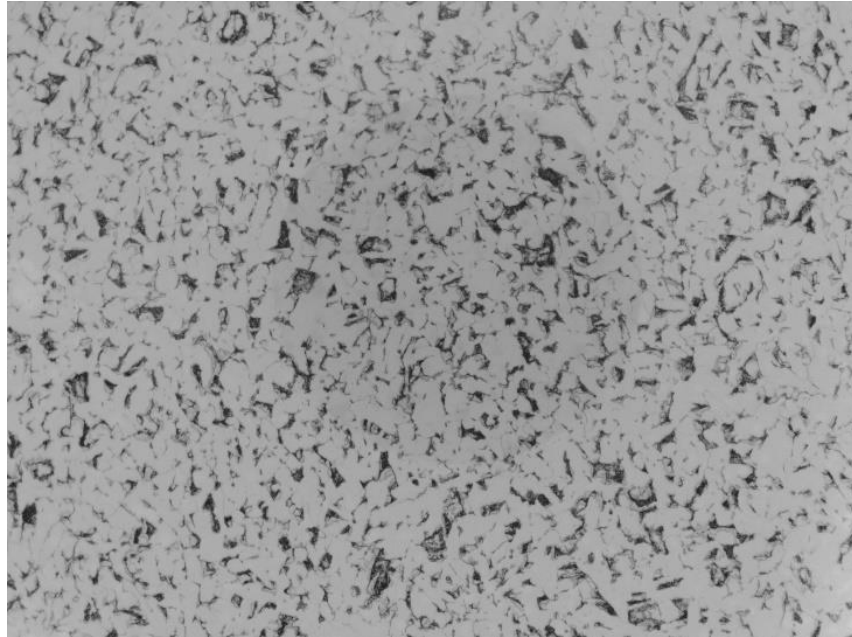


Figura 30 Micrografía zona afectada térmicamente a 200x.

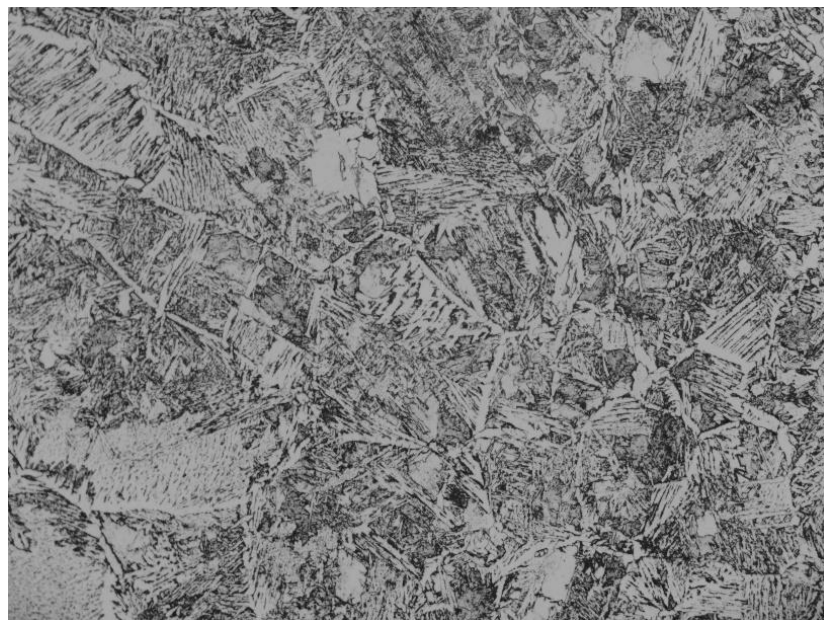


Figura 31 Micrografía zona de fusión a 200X.

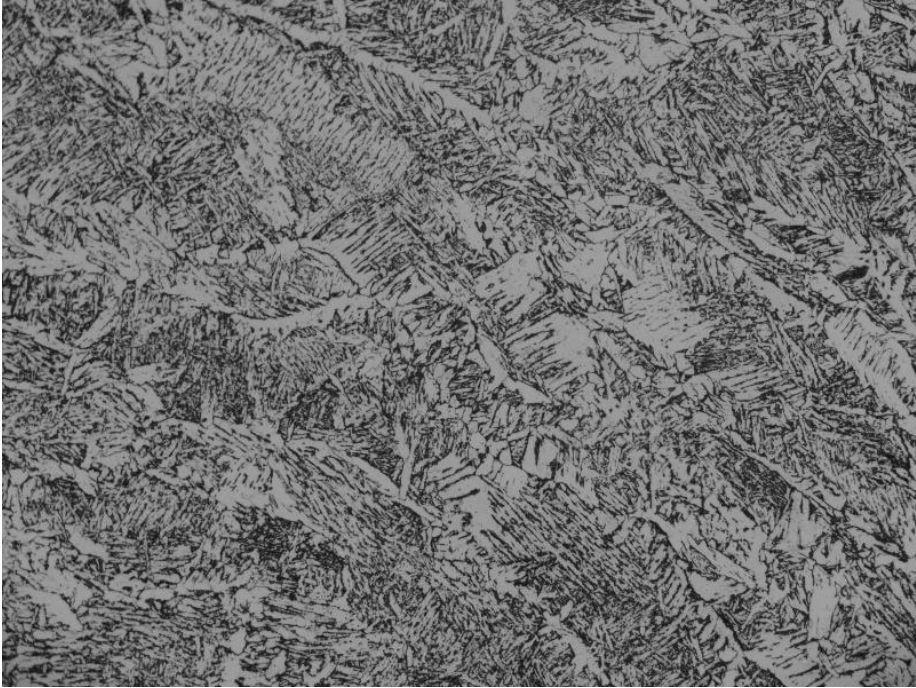
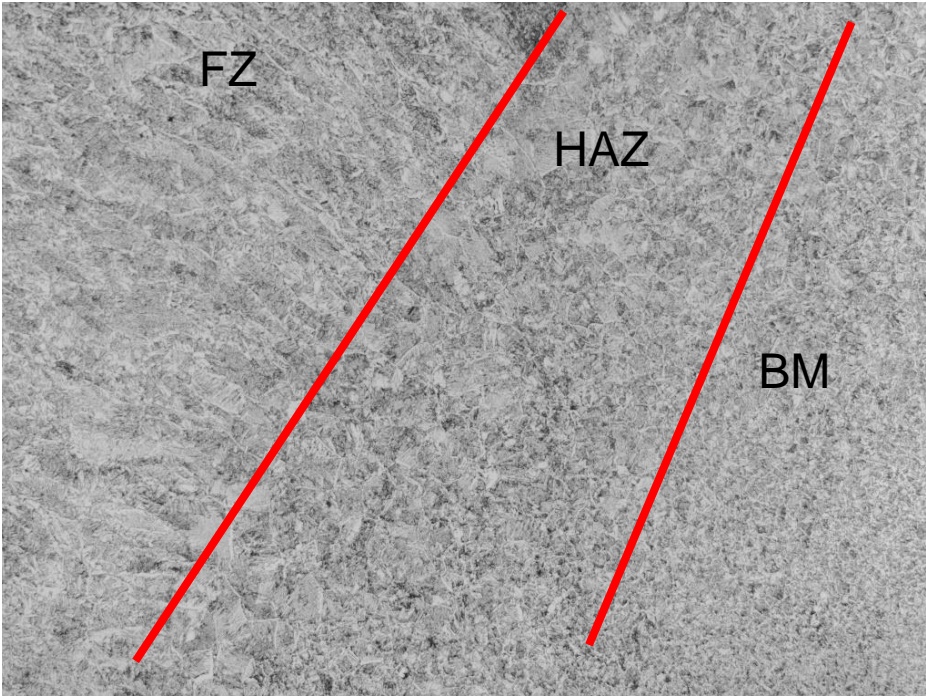


Figura 32 Micrografía de las 3 zonas FZ - HAZ - BM 50X.



6.6. Correlación entre la resistencia a la fatiga y resistencia a la tracción.

Durante la fase de diseño de algún proyecto en la vida ingenieril, buscamos estimar la durabilidad de este, pero los ensayos de fatiga y tracción son ensayos destructivos que conllevan tiempo y dinero. Es por esto que se realizó una correlación entre la resistencia a la fatiga y resistencia a la tracción, para que, en su aplicación en campo, con ayuda de un deformímetro podamos estimar la vida de este material cuando pasa de estar en carga estática a carga dinámica.

La correlación surgió de la sustitución de la regresión lineal encontrada en la zona elástica de los ensayos de tracción y la regresión logarítmica encontrada de los ensayos de fatiga. La ecuación 13 y 14 muestra una regresión lineal encontrada en los ensayos de tracción de las probetas con y sin afectación térmica respectivamente en su zona elástica, donde la pendiente de la recta corresponde al módulo de elasticidad de cada material, S es el esfuerzo y ε es la deformación unitaria.

$$S = 230761,04 * \varepsilon \quad (13)$$

$$S = 214619,77 * \varepsilon \quad (14)$$

Se reemplazaron las ecuaciones 13 y 14 en las ecuaciones 12 y 11 respectivamente, con esto obtuvimos las ecuaciones 15 y 16 donde N es el número de ciclos y ε es la deformación unitaria presente en los especímenes con y sin afectación térmica respectivamente.

$$\text{Log}(N) = 8.58 - 2307,61 * \varepsilon \quad (15)$$

$$\text{Log}(N) = 7.16 - 985,10 * \varepsilon \quad (16)$$

En la gráfica 11 se observa una curva que hace referencia a la ecuación 15 con un área sombreada haciendo referencia a un 10% de margen de error. Los puntos son los datos experimentales promedio obtenidos del ensayo de fatiga de las probetas afectadas bajo el proceso de soldadura.

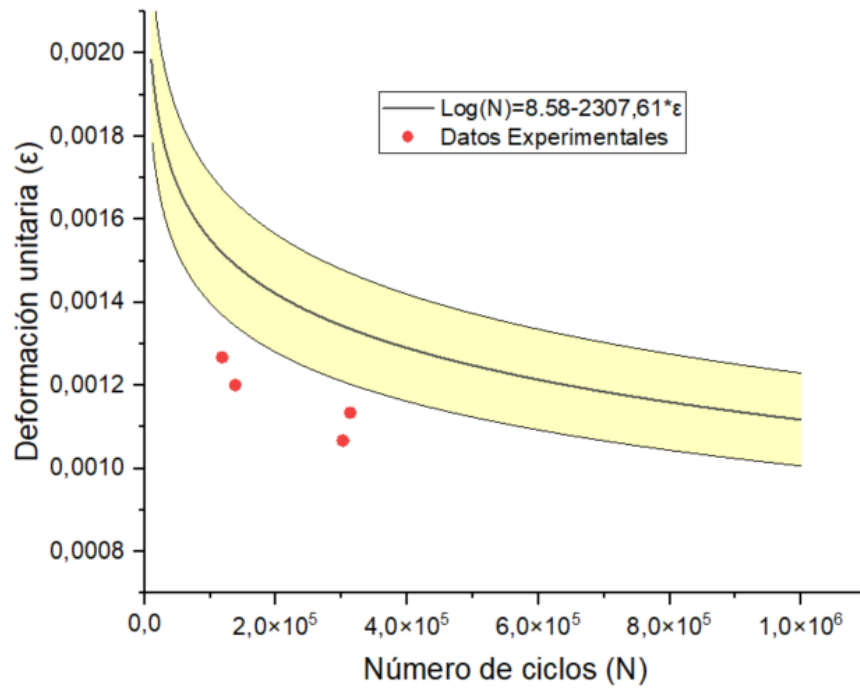
Como se aprecia en la gráfica 11, la desviación que se obtuvo fue mayor al 10% por tanto se presentó un factor de corrección de $k = -0.00025$ a la ecuación 15 para de esta forma poder bajar el margen de error a 5%. Este factor surge de las desviaciones presentadas en los ensayos, que se presentaron debido al montaje de las probetas en las mordazas, calentamiento del aceite de la máquina, vibraciones debido la base donde se encuentra montada la MTS y en las probetas afectadas bajo el proceso de soldadura tienen una desviación adicional debido a los componentes del material de aporte.

La correlación para las probetas afectadas térmicamente bajo el proceso de soldadura GMAW es la que se presenta en la ecuación 17 y se representa en la gráfica 12.

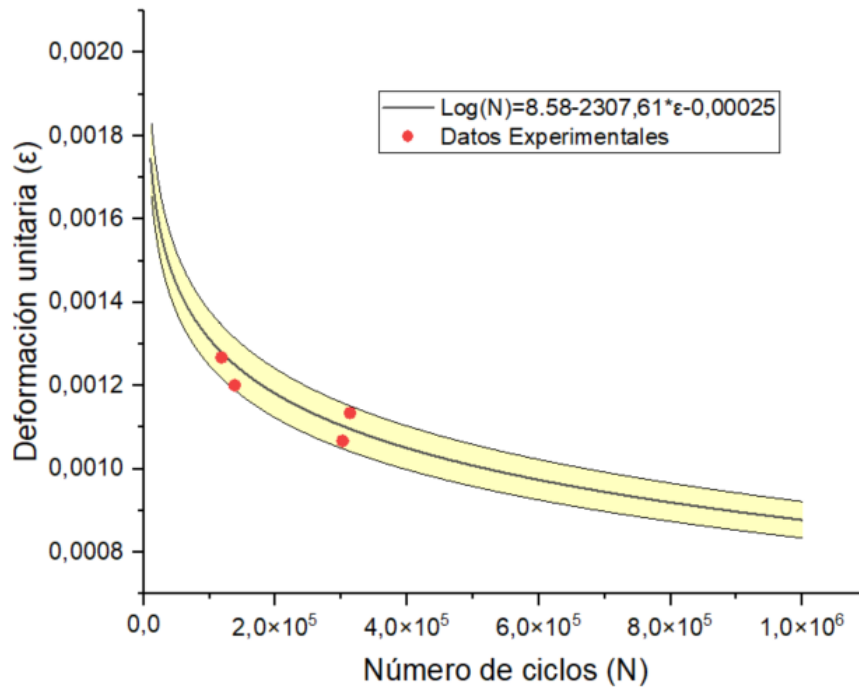
$$\text{Log}(N) = 8.58 - 2307,61 * \varepsilon - K \quad (17)$$

La gráfica 13 describe el comportamiento de la ecuación 16 junto con los datos experimentales promedio del ensayo de fatiga de las probetas de control, sin ningún tipo de afectación, la región sombreada hace referencia a un error del 5%. A diferencia del comportamiento presente en las probetas afectadas térmicamente en este caso los datos experimentales no obtuvieron una desviación mayor al 5%.

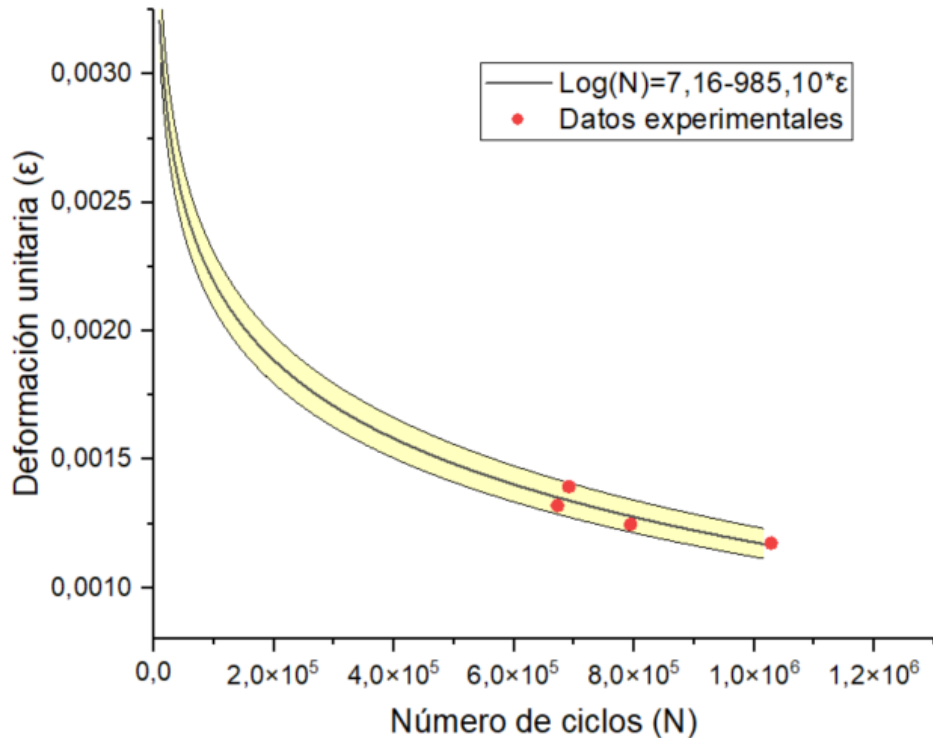
Gráfica 11 Validación de la correlación para juntas soldadas.



Gráfica 12 Validación de la correlación para juntas soldadas con factor de corrección.



Gráfica 13 Validación de la correlación para el material sin afectación.

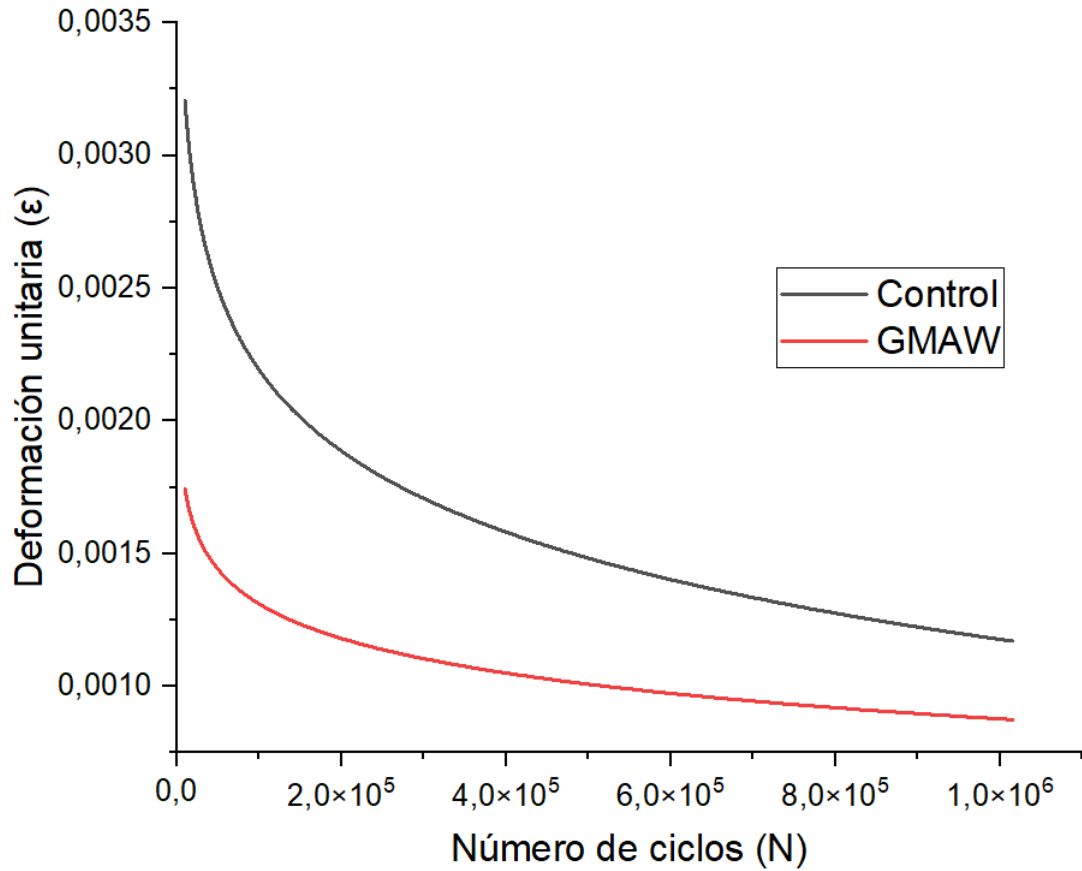


Las desviaciones presentadas en los ensayos para el material de control se le atribuyen principalmente al ambiente en el que se trabajó y las variaciones que se presentaron al momento de montar las probetas en las mordazas de la máquina, para los ensayos de tracción y fatiga, no obstante, también se le da cabida a la calibración del sistema y sensores. Para las probetas de afectadas por la soldadura se le atribuye principalmente a la soldadura debido sus componentes y las posibles impurezas y malformaciones que se pudieron presentar al momento de soldar, es por esto por lo que en la correlación se le tuvo que añadir un factor de corrección ya que los datos experimentales presentaban el mismo comportamiento que la curva con un desplazamiento.

De manera comparativa en la gráfica 14 se observó que la correlación tanto para el material afectado y no afectado presentan a tener la misma tendencia y las mismas asíntotas. Las correlaciones encontradas son para valores de esfuerzos

que estén por debajo del límite de resistencia elástica y una tendencia a vida infinita después del millón de ciclos.

Gráfica 14 Comparativo de las correlaciones.



7. CONCLUSIONES

La soldadura es un método de sujeción que posee muchas variables en su proceso como el ambiente donde se realiza, la temperatura del material de aporte y el material a soldar antes de iniciar la aplicación y la más importante, la habilidad que posea el soldador. Se obtuvieron probetas soldadas a tope normalizadas con una buena penetración, sin presencia de socavaduras ni agujeros gusanos en su interior, realizadas y evaluadas por un soldador certificado.

En el ensayo de tracción se determinó que la afectación de la soldadura incida en el material no afecta de manera considerable su límite elástico y su resistencia última a la tracción, ya que la diferencia entre estas propiedades es menor al 10%, la única afectación evidenciada es una reducción en su deformación de un 33% respecto a las que no fueron afectadas, a su vez, el módulo de elasticidad del material se ve afectado incrementando, ya que deja de ser un material homogéneo. Todas las probetas de tracción soldadas fallaron en el material base.

Se logró evidenciar una reducción aproximada del 10% en la vida del material al ser sometido a cargas dinámicas después del proceso de soldadura, todas las probetas soldadas fallaron en la zona de fusión, también se evidenció una mayor dureza y un crecimiento de grano en su microestructura a medida que se acerca a la esta zona.

La correlación que se logró establecer entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga en juntas soldadas a tope bajo el proceso GMAW es $\text{Log}(N) = 8.58 - 2307,61 * \epsilon - k$, donde $k = -0.00025$, es un factor de corrección añadido debido a la variabilidad que presentó el proceso al momento de aplicarlo junto con posibles impurezas e imperfecciones que se generaron.

8. BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Testing of Metallic Materials. E466 – 15. U.S. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. E384-17. U.S. 40 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. E8/E8M – 16a. U.S. 30 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. E3 - 11. U.S. 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Specification for Carbon Structural Steel. A36/A36M-19. U.S. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life ($S-N$) and Strain-Life ($\epsilon-N$) Fatigue Data. E739-10. U.S. 7 p

AMERICAN WELDING SOCIETY. Standard Welding Terms and Definitions. AWS A3.0M/A3.0. 12 ed. USA: AWS, 2010. 162p

ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. Mexico D.F: International Thomson Editores, 1998. 854p. ISBN 968-7529-36-9.

ASTA, Eduardo. Fundamentos de la soldadura por arco eléctrico. 1 ed. Buenos Aires: Fundación Latinoamericana de Soldadura, 2006. 32p.

DIAZ NOVA, Diego Armando, *et al.* Estudio de propiedades mecánicas y análisis microestructural de las juntas soldadas en aceros ASTM A36 bajo 3 modalidades de transferencia GMAW. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, 2021, 82p.

DUQIANG, Ren, *et al.* Investigation of tensile and high cycle fatigue failure behavior on a TIG welded titanium alloy. *Intermetallics*. 2021, Vol. 132, 107115, 12p. ISSN 0966-9795.

F. SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Traducido por Alicia Larena Pellejero. 3 ed. Madrid: Mc Graw-Hill, 1998. 707p. ISBN 0-07-059241-1.

G. BUDYNAS, Richard y J. KEITH, Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Caracterización de esfuerzos fluctuantes. 8 ed. Mexico D.F: Mc Graw Hill, 2008. 1092p. ISBN 970-10-6404-6

GARCIA RENTERIA, Marco; LOPEZ MORELOS, Victor y GARCIA HERNANDEZ, Rafael. Efecto de la interacción electromagnética de baja intensidad en la microestructura y propiedades mecánicas de soldaduras de acero inoxidable dúplex. *INGENIUS*. 2014, Vol.12, pp 40-45.

GIANCHINO, Joseph W. y WEEKS William. Técnica y práctica de la soldadura. Barcelona: Reverte S.A, 1988. 463 p

JINKEUN, Oh, *et al.* Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds. *Materials Science and Engineering: A*. 2003, Vol 340, Issues 1–2, pp 232-242. ISSN 0921-5093.

LIANGBI, Li, *et al.* Residual Stress Release and Its Effects on the Fatigue Strength of Typical Welded Joints in Cone-Cylinder Pressure Structures. *Applied Ocean Research*. 2021, Vol. 111, 102673, 8 p. ISSN 0141-1187.

PANG, J.C, *et al.* General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials. *Materials Science & Engineering A*. 2013, vol. 564, p. 331–341.

ROWE, Richard y JEFFUS, Larry. Manual de soldadura GMAW (MIG -MAG). Madrid: Parainfo, 2008. 191p.

TABOR, David. The hardness of metals. Londres: Clarendon Press, 1951. 175 p.

TÓTH, L. y YAREMA, S. Y. Formation of the science of fatigue of metals. part 1. 1825-1870. *Materials Science*. 2006, vol. 42. p. 673-680.