

**Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en
características estáticas y dinámicas**

Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra

Trabajo de Grado para Optar al Título de Doctor en Ingeniería de Materiales

Directores

Alberto David Pertuz Comas

Doctor en Ingeniería Mecánica

Mauricio Rincón Ortiz

Doctor en Ingeniería de Materiales

Codirector

Philippe Bocher

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Doctorado en Ingeniería de Materiales

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico inicialmente a Dios este trabajo y todos los que he realizado, sin su maravillosa voluntad y misericordia nada sería posible.

A mis padres y toda mi familia por ser ese soporte en los momentos de duda y flaqueza y por la paciencia con este humano en formación.

Muchos ven este paso como el último peldaño de formación, sin embargo, yo veo otra puerta que se abre con una inmensa escalera delante. Dios y ustedes saben que siempre he tratado de poner todo mi empeño en las cosas que hago, intentando dar algo de ejemplo a las personas que más me importan, mi familia, quienes a costa de su tiempo y felicidad he podido seguir este camino. Paola, Juan Diego, su amor, su sonrisa y su sincero abrazo saldan todo el esfuerzo realizado.

“Trata de no ser un hombre de éxito, sino más bien un hombre de valor”.

Albert Einstein

Agradecimientos

A mis directores, el profesor Alberto Pertuz, por su acompañamiento como doctor, ingeniero, tutor, psicólogo y amigo, charlas fructíferas y enriquecedoras nos acompañan cada vez que nos encontramos. Al profesor Mauricio Rincón, estandarte de la integridad, la planificación y la constancia, muchas gracias por su guía.

A mi codirector el profesor Philippe, y a todo el personal de ÉTS y el LOPFA por sus tiempos, apoyos y dedicación para explicarme los caminos de la caracterización de materiales bajo fatiga, merci beaucoup!

A la Escuela de Ingeniería Mecánica y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la UIS y sus profesores, administrativos y técnicos de laboratorio, por su tiempo, apoyo, comprensión y ayuda.

A GIEMA, GIC y GIMAT, grupos de investigación UIS que con todo el esfuerzo tratan de lograr un mejor país.

Al semillero SIMA, a sus gestores, integrantes y profesores participantes, a través de él, de su fundación y maduración, siento aún más pasión por la investigación.

A la vicerrectoría de investigación y extensión UIS VIE convocatoria 2827, a Minciencias convocatoria 891, por su apoyo económico y administrativo.

A Edgar Oviedo, Laura Arenas, Luis Calderón, Diego Díaz, John González y Mauricio Rojas, personas valiosas que con su tiempo, conocimiento y técnica aportaron a este proyecto.

A la empresa Insumma BG y su Gerente General Erich Calderón, quienes con su soporte contribuyeron a la realización de este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Marco Teórico.....	20
1.1. Soldadura por arco eléctrico.....	20
1.1.1. Entrada de energía en el proceso de soldadura.....	22
1.1.2. Tasa de enfriamiento y tiempo de solidificación	24
1.2. Procesos de soldadura por arco eléctrico	26
1.2.1. Proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW.....	27
1.2.2. Proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW	30
1.2.3. Proceso de soldadura por arco eléctrico FCAW	37
1.3. Generalidades de los modelos matemáticos.....	39
1.3.1. Modelos lineales y no lineales	39
1.3.2. Modelos determinísticos y estocásticos	40
1.3.3. Modelos estáticos y dinámicos.....	40
1.3.4. Modelos discretos y continuos	40
1.3.5. Fases de desarrollo de modelos matemáticos.....	40
1.3.6. Antecedentes de modelos de selección de procesos de soldadura	41
Sistema experto basado en PC	42
Lógica difusa	44
Modelo de decisión multicriterio o MCDM.....	45
Análisis Jerárquico de Proceso o AHP.....	47
TOPSIS.....	48

2.	Objetivos.....	55
2.1.	Objetivo general	55
2.2.	Objetivos específicos.....	55
3.	Marco experimental	56
3.1.	Materiales	57
3.1.1.	Acero ASTM A36.	57
3.1.2.	Acero Inoxidable AISI 316L.....	58
3.1.3.	Materiales de aporte (electrodos)	60
3.1.4.	Consumibles utilizados en los procesos de soldadura.....	61
3.1.5.	Procesos de soldadura por arco eléctrico	62
3.2.	Otros procesos	65
3.3.	Ensayos mecánicos y evaluación microestructural	66
3.3.1.	Caracterización microestructural de juntas soldadas.....	66
3.3.2.	Ensayos mecánicos estáticos.....	69
	Ensayo de microdureza	69
	Ensayo de tracción	70
3.3.3.	Ensayo dinámico de fatiga	71
4.	Resultados y discusión.....	74
4.1.	Análisis metalográfico.....	74
4.1.1.	Análisis microestructural en ASTM A36.....	75
	Zona de fusión o ZF	77
	Zona afectada por calor o ZAC	78
	Zona de metal base o MB.....	79

4.1.2.	Análisis microestructural en AISI 316L.....	81
	Zona de fusión o ZF	83
	Zona afectada por calor o ZAC	85
	Zona de metal base o MB.....	86
4.2.	Ensayos de microdureza	88
4.2.1.	Ensayos de microdureza en ASTM A36	88
4.2.2.	Ensayos de dureza en AISI 316L	92
4.3.	Ensayos de tracción	95
4.3.1.	Ensayos de tracción para ASTM A36	96
4.3.2.	Ensayos de tracción para AISI 316L.....	101
4.4.	Ensayos de fatiga.....	105
4.4.1.	Ensayos de fatiga para ASTM A36.....	105
4.4.2.	Ensayos de fatiga para AISI 316L.....	114
5.	Desarrollo del modelo matemático	122
5.1.	Paso 1 Normalización de criterios.....	125
5.2.	Paso 2 Establecimiento de la matriz de ponderación de criterios	127
5.3.	Paso 3 Matriz de criterios y obtención del vector promedio.....	129
5.4.	Paso 4 Matriz de alternativas y obtención del vector promedio	129
5.5.	Paso 5 Matriz de vectores promedio	132
5.6.	Paso 6 Generación del vector final de jerarquización	132
6.	Conclusiones.....	137
7.	Recomendaciones	141
	Referencias Bibliográficas	142

Apéndices..... 173

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Ventajas y desventajas de los modos de transferencia del proceso GMAW.</i>	35
Tabla 2 <i>Matriz modelo de decisión multicriterio MCDM</i>	46
Tabla 3 <i>Análisis jerárquico del proceso AHP con matriz de prioridad normalizada</i>	47
Tabla 4 <i>Publicaciones científicas en selección de procesos de soldadura</i>	50
Tabla 5 <i>Composición química del acero ASTM A36</i>	58
Tabla 6 <i>Composición química del acero AISI 316L</i>	60
Tabla 7 <i>Materiales de aporte por proceso de soldadura por arco eléctrico y material base</i>	61
Tabla 8 <i>Parámetros de proceso de soldadura por arco eléctrico para ASTM A36</i>	63
Tabla 9 <i>Parámetros de proceso de soldadura por arco eléctrico para AISI 316L</i>	63
Tabla 10 <i>Composición química de líquidos de ataque para probetas metalográficas</i>	68
Tabla 11 <i>Tamaños de grano G en la ZAC para juntas soldadas en ASTM A36</i>	76
Tabla 12 <i>Entrada de energía HI en procesos soldadura para ASTM A36</i>	80
Tabla 13 <i>Tamaños de grano G en la ZAC para juntas soldadas en AISI 316L</i>	83
Tabla 14 <i>Entrada de energía HI en procesos soldadura para AISI 316L</i>	84
Tabla 15 <i>Datos estadísticos de dureza en ASTM A36</i>	91
Tabla 16 <i>Datos estadísticos de dureza en AISI 316L</i>	94
Tabla 17 <i>Parámetros obtenidos del ensayo de tracción en ASTM A36</i>	99
Tabla 18 <i>Parámetros obtenidos del ensayo de tracción en AISI 316L</i>	104
Tabla 19 <i>Ecuación de la curva S-N para ASTM A36 bajo procesos de soldadura</i>	108
Tabla 20 <i>Ecuación de la curva S-N para AISI 316L bajo procesos de soldadura</i>	116
Tabla 21 <i>Resultados de ensayos mecánicos en ASTM A36 utilizados en el proceso AHP</i>	124

Tabla 22 <i>Resultados de ensayos mecánicos en AISI 316L utilizados en el proceso AHP</i>	125
Tabla 23 <i>Matriz normalizada de criterio límite elástico para carga estática en ASTM A36</i>	126
Tabla 24 <i>Matriz normalizada de criterio dureza para carga estática en ASTM A36</i>	126
Tabla 25 <i>Parámetros de influencia de Saaty para calificación del AHP</i>	127
Tabla 26 <i>Matriz de criterios para carga estática en ASTM A36</i>	128
Tabla 27 <i>Matriz normalizada de criterios y vector promedio para carga estática en ASTM A36</i>	129
Tabla 28 <i>Matriz de alternativas del criterio de límite elástico para carga estática en ASTM A36</i>	130
Tabla 29 <i>Matriz de alternativas del criterio de dureza para carga estática en ASTM A36</i>	130
Tabla 30 <i>Matriz normalizada de alternativas del límite elástico para carga estática en ASTM A36</i>	131
Tabla 31 <i>Matriz normalizada de alternativas de dureza para carga estática en ASTM A36</i>	132
Tabla 32 <i>Matriz ensamblada de vectores promedio de alternativas para carga estática en ASTM A36</i>	132
Tabla 33 <i>Vector final de jerarquización estática para ASTM A36</i>	133
Tabla 34 <i>Vector final de jerarquización dinámica para ASTM A36</i>	134
Tabla 35 <i>Vector final de jerarquización estática para AISI 316L</i>	134
Tabla 36 <i>Vector final de jerarquización dinámica para AISI 316L</i>	135

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Zonas de una unión soldada</i>	22
Figura 2 <i>Proceso de soldadura SMAW o de electrodo revestido</i>	29
Figura 3 <i>Mecanismos de transferencia de metal de aporte en proceso GMAW</i>	33
Figura 4 <i>Tasa de generación de gotas respecto a la corriente aplicada en proceso GMAW</i>	34
Figura 5 <i>Proceso FCAW o soldadura por arco con núcleo fundente</i>	39
Figura 6 <i>Consideraciones del proceso de soldadura</i>	41
Figura 7 <i>Algoritmo de sistemas expertos</i>	43
Figura 8 <i>Variables del método de lógica difusa</i>	45
Figura 9 <i>Combinación de las variables en el análisis jerárquico de procesos (AHP)</i>	48
Figura 10 <i>Matriz experimental de la investigación</i>	56
Figura 11 <i>Montaje de aplicación de soldadura mecanizada</i>	64
Figura 12 <i>Obtención de probetas soldadas</i>	65
Figura 13 <i>Zona de extracción de muestras para ensayos de las placas soldadas</i>	67
Figura 14 <i>Medición de diámetro promedio de grano en micrografía a 100x</i>	69
Figura 15 <i>Probeta de microdureza y localización de indentaciones</i>	69
Figura 16 <i>Plano de probeta de tracción</i>	70
Figura 17 <i>Montaje de ensayo de tracción</i>	71
Figura 18 <i>Ensayo dinámico de fatiga</i>	73
Figura 19 <i>Micrografías de procesos de soldadura en ASTM A36</i>	75
Figura 20 <i>Tamaños promedio de ZAC en ASTM A36 según el proceso de soldadura</i>	80
Figura 21 <i>Micrografías de procesos de soldadura en AISI 316L</i>	82

Figura 22 Zonas de fusión para AISI 316L a 100x	83
Figura 23 Tamaños promedio de ZAC en AISI 316L según el proceso de soldadura	87
Figura 24 Perfiles de dureza versus posición para ASTM A36	89
Figura 25 Valores de dureza promedio para ASTM A36.....	91
Figura 26 Perfiles de dureza versus posición para AISI 316L	92
Figura 27 Valores de dureza promedio para AISI 316L.....	95
Figura 28 Probetas de ensayo de tracción ASTM A36 bajo proceso FCAW.....	96
Figura 29 Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para ASTM A36 bajo proceso FCAW.....	97
Figura 30 Curvas promedio esfuerzo contra deformación unitaria para ASTM A36 sometido a procesos de soldadura y material base.....	98
Figura 31 Probetas de ensayo de tracción AISI 316L bajo proceso GMAW.....	101
Figura 32 Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L bajo proceso GMAW.....	102
Figura 33 Curvas promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L sometido a procesos de soldadura y material base.....	103
Figura 34 Probetas de ensayo de fatiga en ASTM A36	106
Figura 35 Curvas S-N generadas del conjunto de probetas ASTM A36 bajo proceso de soldadura GMAW.....	107
Figura 36 Curvas S-N para ASTM A36 sometido a procesos de soldadura y material base	108
Figura 37 Localización de falla en probetas de fatiga de ASTM A36	111
Figura 38 Análisis fractográfico de probeta fallada de ensayo de fatiga para ASTM A36.....	113
Figura 39 Probetas de ensayo de fatiga en AISI 316L.....	115

Figura 40 <i>Curva S-N generada del conjunto de probetas AISI 316L bajo proceso de soldadura FCAW</i>	115
Figura 41 <i>Curvas S-N para AISI 316L sometido a procesos de soldadura y material base</i>	116
Figura 42 <i>Localización de falla en probetas de fatiga de AISI 316L</i>	119
Figura 43 <i>Análisis fractográfico de probeta fallada de ensayo de fatiga para AISI 316L</i>	120
Figura 44 <i>Funcionamiento del modelo matemático planteado</i>	122
Figura 45 <i>Algoritmo de aplicación de AHP para selección de procesos de soldadura</i>	123
Figura 46 <i>Resultados de jerarquización de procesos de soldadura bajo AHP</i>	136

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1: Entrada de energía durante la soldadura. 22

Ecuación 2: Ecuación de la conservación de la energía en soldadura por fusión 23

Ecuación 3: Tasa de enfriamiento en una junta soldada. 25

Ecuación 4: Tiempo de solidificación de una junta soldada. 26

Ecuación 5: Función de relación en lógica difusa. 44

Ecuación 6: Cálculo de elementos de matriz normalizada en TOPSIS 48

Ecuación 7: Cálculo de distancias entre punto ideal y punto despreciado en TOPSIS 49

Ecuación 8: Determinación del diámetro promedio de grano a través del método de Heyn. 68

Ecuación 9: Normalización de escala cero a uno y uno a nueve. 125

Ecuación 10: Normalización de matriz de ponderación de criterios 129

Ecuación 11: Vector de jerarquización de alternativas 133

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Certificados de calidad de materiales e insumos implicados en el estudio	173
Apéndice B. Definición de parámetros y formatos de los procesos de soldadura.....	189
Apéndice C. Figuras de resultados de ensayos.	204

Glosario

AD: austenita dendrítica

AHP: análisis jerárquico del proceso

CE: crecimiento epitaxial

DC: corriente directa

DEA: data envelopment analysis

EBW: electron beam welding

FA: fase ferrítica alotriomórfica

FCAW: flux cored arc welding

FW: fase de ferrita Widmanstätten

GMAW: gas metal arc welding

MA: maclas de orientación de granos

MB: metal base

MCDM: matriz modelo de decisión multicriterio

PE: fase de perlita

SMAW: shielded metal arc welding

TOPSIS: technique for order preference by similarity to ideal solution

ZAC: zona afectada por calor

ZF: zona de fusión

Resumen

Título: Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas *

Autor: Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra **

Palabras Clave: Selección de proceso, soldadura por arco eléctrico, modelo matemático, microscopia, propiedades mecánicas.

Descripción: Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo matemático que permite realizar una selección de proceso de soldadura por arco eléctrico, con el objetivo de escoger el que brinde mejores desempeños del material en servicio. El enfoque de este proyecto fue generar un conocimiento para la industria, la cual muchas veces implementa aplicaciones sin considerar los criterios suficientes sobre las consecuencias de la decisión en su implementación. El documento presenta una revisión de modelos matemáticos aplicados a la selección de procesos de soldadura en la bibliografía existente. La caracterización de las juntas soldadas permitió cuantificar la afectación que se generó en los materiales revisados. Esta información se incluyó dentro de un modelo matemático de priorización. La investigación se enmarcó en dos materiales ferrosos, el acero de bajo carbono ASTM A36 y el acero inoxidable austenítico AISI SAE 316L. Fueron aplicados tres procesos de soldadura por arco eléctrico, SMAW, GMAW y FCAW. Los ensayos de caracterización incluyeron pruebas de tracción, dureza, fatiga y evaluación microestructural. Todas las fases de prueba incluyeron comparaciones con el material base. El análisis microestructural y fractográfico permitió confirmar las valoraciones realizadas. El comportamiento de materiales afectados por el proceso de soldadura FCAW presenta un límite elástico 9% superior frente al material base en el AISI 316L y un 1% en ASTM A36. Sin embargo, el proceso SMAW muestra mejores desempeños en el comportamiento a la fatiga. Aun cuando el comportamiento a fatiga de las juntas soldadas con cada proceso empleado reveló un descenso en la cantidad de ciclos resistivos. El modelo matemático propuesto para la decisión fue el análisis jerárquico de proceso AHP. Fue desarrollada la adaptación del modelo matemático AHP para la selección del proceso de soldadura por arco eléctrico en SMAW, GMAW y FCAW y materiales empleados basado en la relevancia dada a las variaciones del desempeño y sus interacciones.

* Tesis doctoral.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Doctorado en Ingeniería de Materiales. Directores: Alberto David Pertuz Comas. Doctor en Ingeniería Mecánica. Mauricio Rincón Ortiz. Doctor en Ingeniería de Materiales. Codirector: Philippe Bocher. Doctor en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Mathematical Model for Arc Electric Welding Process Selection based on Static and Dynamic Characteristics*

Author: Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra**

Key Words: Process selection, electric arc welding, mathematical model, microscopy, Mechanical properties.

Description: This work presents the development of a mathematical model that selects an electric arc welding process, with the objective of choosing the one that provides the best performance of the material in service. The purpose of this project was to generate knowledge for the industry, which many times implements applications without considering enough criteria about the consequences of the decision in its implementation. The research presents a review of mathematical models applied to the selection of welding processes from the literature. The characterization of the welded joints allowed quantifying the influence generated in the reviewed materials. This information was included in a mathematical prioritization model. The research was focused on two ferrous materials, ASTM A36 low carbon steel and AISI 316L austenitic stainless steel. Three electric arc welding processes, SMAW, GMAW, and FCAW, were applied. Characterization tests included tensile, hardness, fatigue, and microstructural evaluation. All testing phases included comparisons with the base material. Microstructural and fractographic analysis allowed confirming the assessments made. The behavior of materials welded by the FCAW welding process shows a 9% higher yield strength compared to the base material in AISI 316L and 1% in ASTM A36. However, the SMAW process shows better performance in fatigue behavior. Although the fatigue behavior of the welded joints with each process employed showed a decrease in the number of resistive cycles. The mathematical model proposed for the decision was the AHP hierarchical process analysis. The adaptation of the AHP mathematical model was developed to select the electric arc welding process in SMAW, GMAW, and FCAW and materials used based on the relevance given to the performance variations and their interactions.

* PhD. Thesis

** Faculty of Physic-Chemical Engineering. Department of Metallurgical Engineering and Science of Materials. PhD. in Materials Engineering. Directors: Alberto David Pertuz Comas. PhD. In Mechanical Engineering. Mauricio Rincón Ortiz. PhD. In Materials Engineering. Codirector: Philippe Bocher. PhD. In Mechanical Engineering.

Introducción

El desarrollo industrial va muchas veces a ritmos acelerados debido a su afán de producción y generación de rentabilidad, a pesar de que en algunas ocasiones sus sistemas y métodos permanezcan de forma constante en el tiempo. Estas situaciones se ofrecen como oportunidades para analizar de manera más profunda a través del conocimiento y la experimentación los mecanismos implícitos que pueden mejorar la aplicación de las tecnologías. Dentro de este compendio de desarrollo, la soldadura cumple un papel relevante. Este proceso de unión es ampliamente utilizado en sectores productivos como el automotriz, el aeronáutico, el petroquímico, el constructivo y en general en la manufactura de equipos y estructuras. Una clasificación general de los procesos de soldadura emitida por la American Welding Society (American Welding Society (AWS), 2001) identifica más de setenta y dos procesos a través de los cuales una unión puede ser realizada. El enfoque de este trabajo se centra en la soldadura por arco eléctrico. Bajo esta misma clasificación se tienen al menos dieciséis procesos a través del arco eléctrico. Este tipo de soldadura realiza la unión de dos o más partes a través de los estados de fusión de los metales, alcanzando el punto de fusión a través del arco eléctrico como fuente de calor y generando como único elemento al conjunto producido. Alcanzar las temperaturas de fusión configura un cambio dentro de los modelos metalúrgicos que implican un material, identificando a la soldadura como un evento multifísico que genera diversas modificaciones. La soldadura implica cambios térmicos por las elevaciones de temperatura. A su vez involucra cambios microestructurales por la modificación de fases, tamaños de granos formados, y la inclusión de un material de aporte. Finalmente, un cambio mecánico por la distorsión y los esfuerzos residuales que se generan en el material. El desempeño de las piezas producidas en el marco de la durabilidad y la resistencia a los modelos de carga a los que se somete se manifiesta a

través de sus propiedades mecánicas y su microestructura. Debido a esto, el estudio de caracterización del nivel resistivo en términos estáticos y dinámicos que se realiza a estos materiales es presentado como la opción adecuada para determinar su confiabilidad. Siendo la durabilidad y la funcionalidad de elementos y estructuras el objetivo principal dentro de los procesos de fabricación, así como un indicador del desempeño de un buen diseño, y una buena operación. Sin embargo, pretender que la acelerada industria recuerde estos datos de manera permanente se hace menos práctico. Por lo anterior surge la necesidad de plantear una metodología de decisión sobre la selección del proceso de soldadura que ofrezca bases cuantificadas de la transformación o afectación que pueda sufrir el material unido por este tipo de procesos. Esto ofrece una herramienta de diseño para la planificación en la fabricación de estructuras o piezas metálicas. También como un mecanismo de cuantificación para modelos de integridad.

Este trabajo doctoral se enfoca en comprobar la hipótesis de formular un modelo matemático que ofrezca solución a la selección del proceso de soldadura por arco eléctrico. En específico se trazó un alcance de aplicación entre tres procesos específicos, SMAW, GMAW, y FCAW y en dos materiales intervenidos, el ASTM A36 y el AISI 316L. El método de selección fue planteado desde el comportamiento de materiales unidos por soldadura y sometidos bajo esquemas de carga estática y dinámica. Iniciando desde los procesos de fabricación estandarizados a través de normas constructivas, se aplicaron técnicas de caracterización para los modelos de carga. Los datos fueron usados como fuente de prioridad y elección de los procesos de soldadura a través de un modelamiento matemático que permitió jerarquizar las variables de diseño más importantes.

1. Marco Teórico

1.1. Soldadura por arco eléctrico

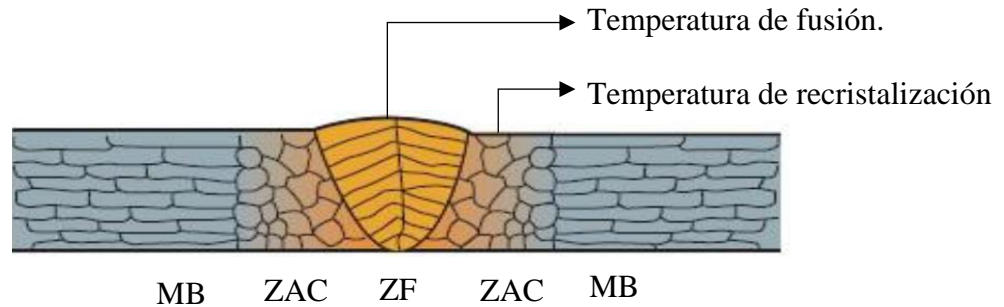
La American Welding Society (AWS, Sociedad Americana de Soldadura) define la soldadura como *“Una coalescencia localizada de metales o no metales producida calentando los materiales a la temperatura de soldadura, con o sin aplicación de presión, o mediante la aplicación de presión sola y con o sin el uso de material de aporte”*. (American Welding Society (AWS), 2001). Asimismo, la AWS ha clasificado más de 72 procesos de soldadura los cuales pueden dividirse principalmente en dos grupos: la soldadura por fusión y la soldadura por estado sólido; la característica más importante que los diferencia es la temperatura de trabajo, en la cual, para los procesos clasificados por fusión, se logra alcanzar la temperatura de fusión de los materiales base y en la mayoría de los procesos existe material de aporte (Pástor, 2004). La unión en los procesos de estado sólido, a diferencia de los procesos de fusión, proviene de la deformación plástica producto de una presión generada entre los dos materiales y la aplicación de una temperatura que no alcanza el punto de fusión de los materiales, así mismo, la adición de material de aporte puede o no existir. En la soldadura por fusión con arco eléctrico un equipo o fuente de calor genera una cantidad de energía necesaria que cruza a través de los elementos a unir logrando que alcancen la temperatura del punto de fusión a través del modelo de cortocircuito de un arco eléctrico y puede o no utilizarse material de aporte. Aun cuando la energía producida es mayor y se permite establecer, ya sea con material de aporte o no, la coalescencia entre los materiales base (Schulz, 2003).

El producto de la aplicación del proceso de soldadura es una junta o unión soldada. La cual, en el caso de los procesos de soldadura por fusión, está conformada por tres zonas que caracterizan el comportamiento del material, dado que entre ellas no existe homogeneidad y sus propiedades

siendo distintas pueden afectar el desempeño bajo carga de la unión producida (Messler, 1999). La primera zona es la zona de fusión o ZF, la cual en el caso de aplicar material de aporte, posee una alta proporción del mismo material de aporte que ha sido fundido para la unión de los metales. Esta área contiene una porción del material base que proviene de los elementos a unir. Aun cuando la dilución presentada en el caso de tener material de aporte, la fuente de material proveniente del material base es muy baja en esta zona. Es pertinencia del diseño de proceso seleccionar adecuadamente la compatibilidad de los materiales de aporte respecto al material base para impedir procesos de dilución excesiva que puede desembocar en precipitaciones de elementos que generan concentradores de esfuerzo o fases indeseadas dentro del material. Otros escenarios de excesiva dilución reflejan modelos de agrietamiento por diferenciación en temperaturas de solidificación (Lippold & Kotecki, 2005). La segunda zona corresponde a uno de los puntos más estudiados y conocido como la zona afectada por calor o ZAC. La zona afectada por calor comprende el metal base a muy alta temperatura, aún en estado sólido, y que no llega a temperatura de fusión. Este escenario de gradiente térmico genera formaciones de fase diversas y su conformación microestructural tiene una fuerte influencia sobre las propiedades mecánicas del material (O'Brien & Guzman, 2011). Finalmente, la tercera zona denominada metal base o MB que está constituida por el metal que forma la unión. Aun cuando en algunas aplicaciones se requiere que los elementos a unir sean disimiles, pero que en términos generales preserve su composición química y propiedades (Maurya et al., 2021; Shah Hosseini et al., 2011). En la Figura 1 se aprecia un esquema de estas zonas.

Figura 1

Zonas de una unión soldada



Nota. Adaptado de *Ciencia e ingeniería de los materiales* (pág. 334), por (Askeland & Wright, 2015).

A continuación, se presentan los parámetros más relevantes y comunes dentro de los procesos de soldadura por arco eléctrico.

1.1.1. Entrada de energía en el proceso de soldadura

La principal característica que realiza una convergencia absoluta sobre los demás parámetros es la entrada de energía entregada a la junta durante el proceso de soldadura por arco eléctrico. La entrada de energía sobre el material es determinante al momento de precisar la afectación sobre el material, ya que determina eventos de la cantidad de calor aportado durante la aplicación. Esta entrada de energía puede calcularse con la Ecuación 1 (American Welding Society (AWS), 2020).

Ecuación 1: Entrada de energía durante la soldadura.

$$HI = EI * \frac{60}{TS * 1000}$$

Donde:

HI: Es la entrada de calor o energía [KJ/mm].

E: Tensión de arco [V].

I: Corriente de soldadura [A].

TS: Avance del arco [mm/min].

Solo una parte de la energía generada por la fuente de calor es absorbida por el metal base. Sin embargo, experimentalmente su medición resulta bastante compleja. Aun así, la fracción de energía absorbida por la pieza es la responsable de desarrollar la soldadura, incluyendo la formación del charco de metal líquido, la generación del campo de temperaturas, dependiente del tiempo, a través de toda la longitud de la soldadura, o la geometría sobre la cual sea aplicada, y la evolución estructural con sus propiedades mecánicas resultantes. Esta transferencia de calor puede ser mayor o menor, y reflejarse en la cantidad necesaria de calor sobre el material que permita afectar metalúrgicamente la unión (Schulz, 2003). De esta forma, se plantea la cantidad de energía como el transporte de calor dependiente del tiempo, por fenómenos de conducción y convección, expresando la conservación de la energía mediante la Ecuación 2 (S Kou, 1996).

Ecuación 2: Ecuación de la conservación de la energía en soldadura por fusión .

$$\rho \frac{\partial(CT)}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial(CT)}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial(CT)}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial(CT)}{\partial z} = \frac{\partial(k \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(k \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(k \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} + S$$

Donde:

k: Conductividad térmica [J/mm s °C].

T: Temperatura en la soldadura [°C].

ρ : Densidad del metal [g/mm³].

C: Calor específico del material [J/g °C].

t: Tiempo [s].

v_x : Componente de la velocidad en la dirección de x [mm/s].

x: Coordenada en la dirección de la soldadura [mm].

v_y : Componente de la velocidad en la dirección de y [mm/s].

y : Coordenada en la dirección transversal a la soldadura [mm].

v_z : Componente de la velocidad en la dirección de z [mm/s].

z : Coordenada en la dirección normal a la superficie de la soldadura [mm].

S : Velocidad de generación de calor interno volumétrico [$J/mm^3 s$].

En esta ecuación el primer término izquierdo es transitorio, es decir, en función del tiempo, lo cual se tiene presente para el contenido de calor en la pieza soldada. Los términos restantes del lado izquierdo representan la transferencia de calor por convección. Los términos de la derecha representan la conducción de calor y el último término denota la tasa de generación de calor volumétrico interno, la cual es una variable relevante en procesos de soldadura por arco donde la entrada de energía se encuentra bajo la superficie de la pieza de trabajo, por ejemplo, los procesos Submerged Arc Welding (SAW, Soldadura de arco sumergido) y Electron Beam Welding (EBW, Soldadura por haz de electrones) (Jenney & O'Brien, 1991).

1.1.2. Tasa de enfriamiento y tiempo de solidificación

A partir de la aplicación, la tasa de enfriamiento dictamina la formación microestructural debido a que este parámetro influye directamente en la formación de fases y el modelo de nucleación del sistema. De esta forma puede afirmarse que la variación de la temperatura en el tiempo afecta la evolución microestructural, las tensiones residuales y la magnitud de las distorsiones en la soldadura, a esto se le define como ciclo térmico. Por lo que la composición, la microestructura y propiedades resultantes del metal de soldadura se ven afectadas. De esta forma, la tasa de enfriamiento desde el valor máximo alcanzado durante la aplicación ejerce influencia directamente en la generación de la estructura metalúrgica final de la pieza soldada (Di et al., 2015). La tasa de enfriamiento en muchas ocasiones aporta de manera práctica los datos para el

cálculo de temperaturas de precalentamiento y poscalentamiento que contribuyen a sostener condiciones de generación de fases con mejores propiedades en los materiales intervenidos y proporcionalmente disminuyen las tasas de enfriamiento (Mathers, 2002), Ecuación 3.

Ecuación 3: Tasa de enfriamiento en una junta soldada.

$$T_e = \frac{2\pi k(T_c - T_0)^2}{H_{net}}$$

Donde:

T_e : tasa de enfriamiento [°C/s]

k : conductividad térmica del material [J/mm s °C]

T_c : temperatura a la que se calcula la tasa de enfriamiento [°C]

T_0 : temperatura de precalentamiento [°C]

H_{net} : calor aportado neto [J/mm]

Según algunos autores (Harrison & Farrar, 1989; Poorhaydari et al., 2005) la tasa de enfriamiento presenta dependencia a la geometría de la junta que se aplique, esto en función de la efectividad de la convección en la superficie de la junta, donde se libera más calor, en contraposición a la zona inferior de la junta. Los estudios experimentales de Poorhaydari y otros han esbozado factores de corrección entre valores cero y uno, con niveles de incertidumbre razonables aplicados a la ecuación general de Rosenthal, presentada aquí como Ecuación 2, tratando de compensar los modelos de análisis de la tasa de enfriamiento en dos y tres dimensiones. Mientras que el razonamiento de Harrison y Farrar da cuenta de la manipulación en la tasa de enfriamiento para alcanzar la austenización general del material acero inoxidable AISI SAE 304L. La tasa de enfriamiento posee estrecha relación con el tiempo de solidificación del metal de

soldadura, el cual está en función directa del calor aportado neto, es decir, el que recibe la pieza, y la temperatura inicial del material, Ecuación 4 (Jenney & O'Brien, 1991).

Ecuación 4: Tiempo de solidificación de una junta soldada.

$$T_s = \frac{LH_{net}}{2\pi k\rho C(T_f - T_0)^2}$$

Donde:

Ts: tiempo de solidificación [s]

L: Calor latente de fusión [J/mm³]

Tf: temperatura de fusión [°C]

1.2. Procesos de soldadura por arco eléctrico

Los procesos de soldadura por arco eléctrico que son objeto de interés en el estudio planteado son SMAW, GMAW y FCAW, debido a su alta tasa de deposición de material de aporte al igual que su condición de disponibilidad para la industria con equipos más asequibles y procesos más simples (Messler, 1999), sin dejar de lado que dentro de esta clasificación también abundan los procesos costosos y de una alta complejidad que ofrecen algunas ventajas en calidad o costos a largo plazo. En general, la soldadura SMAW puede ser más lenta en comparación con procesos como la soldadura por arco sumergido (SAW) o la soldadura por arco de gas con electrodo no consumible de tungsteno (GTAW/TIG). Sin embargo, el proceso SMAW tiene ventajas en términos de portabilidad y versatilidad, ya que no requiere equipo pesado y se puede utilizar en diversas posiciones y condiciones de trabajo (Jeffus, 2004). A continuación, se presenta la definición de cada uno de sus principios rectores, así como sus variables de proceso, las cuales para este estudio han sido estipuladas bajo las condiciones del estándar para no generar alteraciones superiores al volumen energético aportado por cada uno.

1.2.1. Proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW

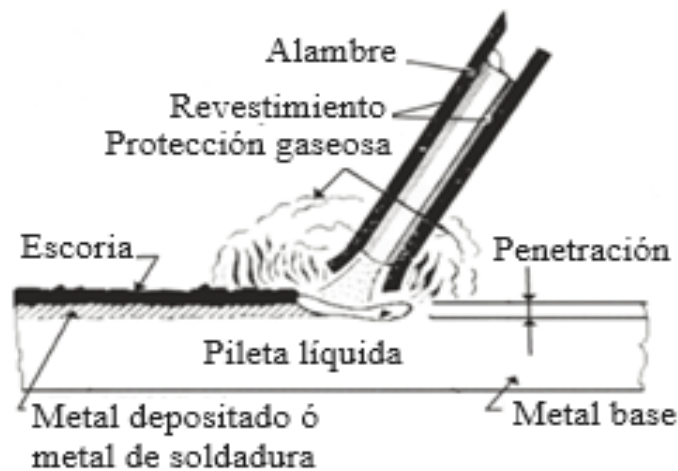
Habitualmente conocido como Shielded Metal Arc Welding (SMAW, Soldadura de Arco con Metal Revestido), como todos los procesos de arco eléctrico, su principio de alcanzar la fusión consiste en una descarga de energía relativamente alta a través de un canal gaseoso térmicamente ionizado denominado columna de plasma. El arco se establece entre un electrodo de soldadura y la pieza de trabajo. El electrodo puede ser no consumible (Jenney & O'Brien, 1991). De forma simultánea el electrodo en caso de ser consumible, y siendo de composición química similar a los sustratos de unión, va siendo fundido y aportando este material al proceso de unión. El electrodo es el punto de contacto que origina el corto circuito, y por el cual el arco eléctrico es transmitido. El electrodo se calienta a punto de fusión depositando el material sobre la superficie, esto debido al calor generado en el arco eléctrico. La atmósfera del entorno es controlada por los gases que se generan al fundir el material que recubre el electrodo de aporte denominado fundente. Dado que el electrodo está recubierto por materiales que favorecen la protección del charco de materiales fundidos y preserva la aplicación de enfriamientos bruscos que puedan originar fallas tempranas. Esto a través de la formación de una capa protectora de escoria de este fundente que cumple el propósito mencionado. El proceso SMAW no utiliza gases de aporte como mecanismo de protección, más que los generados por el fundente del electrodo. Por otro lado, la aplicación de este proceso tiene múltiples usos dada su versatilidad para realizarse en lugares distantes a grandes alturas y a la intemperie (Tobar, 2015). Gran parte de su popularidad radica en que la aplicación aparentemente no representa complejidad, sin percibir la inmensa cantidad de variables implícitas en el proceso, entre ellas la que más destaca, la habilidad del personal designado para realizarla (Tekker & Kursun, 2017). Esto debido a que siendo un electrodo consumible, el extremo del electrodo debe preservar casi constante la distancia que mantiene con el punto de contacto a la

pieza, esta variable es denominada stickout y debe permanecer lo más estable posible, para no alterar las condiciones de potencial y corriente que rodean el cortocircuito manteniendo estable el arco eléctrico y por ende la temperatura de los materiales base y de aporte (Ospina López et al., 2007). Su dificultad radica en que en procesos mecanizados como el GMAW o el FCAW, la alimentación del material de aporte se realiza de forma motorizada, mientras que en SMAW depende de la habilidad del operador (Messler, 1999). El proceso cuenta con un equipo del tipo generador o transformador, del cual se espera convierta las variables de corriente y potencial a los niveles requeridos para que a la entrega del material de aporte, la fusión sea homogénea entre los tres materiales implicados, las dos bases o sustratos y el aporte de material desde el electrodo (López & Vitriago, 2011). La consideración en la selección adecuada del electrodo influye fuertemente en la calidad de la soldadura, revestimientos rutílicos, básicos o celulósicos son los más comunes, sin dejar de percibir la existencia de electrodos de aplicaciones especiales como los basados en óxidos de hierro y los de aleación con tierras raras (Carmen & Carolina, 2010; Singh, 2022). Estos fundentes permiten generar mayor o menor cantidad de penetración, así como influir en la resistencia del material. La polaridad de los cables que alimentan el sistema de cortocircuito reviste una importancia al definir la dirección del flujo de electrones del sistema. Esto es común en los procesos de arco eléctrico (Khafifudin, 2017; Rontescu et al., 2015; Talkington, 1998). Diversos autores (Abdulkareem Aloraier et al., 2014; Talkington, 1998; H. Zhang et al., 2020) mencionan que bajo procedimiento experimental la influencia de la polaridad puede generar mejores modelos de penetración del material, deposición del material de aporte, y así como también, permitir una captación más efectiva de la entrada de energía suministrada por la fuente y finalmente variables como la estabilidad del arco, que terminan repercutiendo en los modelos de solidificación del material y por ende en la microestructura y las propiedades mecánicas de la junta

realizada. La Figura 2 presenta una imagen esquemática del proceso SMAW donde la deposición de material de aporte se realiza sobre una pieza en corte. La pileta líquida de este procedimiento se genera en medio de una atmósfera gaseosa formada por el material de recubrimiento del aporte a alta temperatura. Esto facilita el enfriamiento controlado del material depositado, a la vez que durante la aplicación disminuye la presencia de agentes contaminantes dentro del charco de los materiales fundidos. Al final del procedimiento en la superficie se aloja una capa de escoria que siendo de menor densidad que el material depositado flota y se solidifica, para posteriormente ser retirada.

Figura 2

Proceso de soldadura SMAW o de electrodo revestido



Nota. Tomado de Análisis de la microestructura y estudio de las propiedades en piezas soldadas por soldadura MAG entre acero F-1140 y fundición laminar sometidas a tratamientos térmicos (pág. 14), por (Roca, 2019).

Dentro del proceso SMAW los principales parámetros están dictaminados por la geometría de la soldadura, dado que la longitud del arco debe permanecer constante durante el tiempo de fusión. Siendo que así lo permita la habilidad del operador en el caso de aplicación manual. Otros

autores (A. Aloraier et al., 2006; Baskoro et al., 2008; Chu & Tung, 2005; Khamari et al., 2019) han presentado desarrollos modelados o manufacturados de sistemas, que siendo semiautomáticos su influencia consiste en conservar esta longitud de arco constante, dado que la compensación (o transformación entre potencial y corriente) no tiene serias fluctuaciones que alteren la entrega de aporte, ni la temperatura generada en el proceso. Finalmente, las variables que se presentan como disponibles para manipular en la fuente de energía del equipo en el proceso de soldadura SMAW son la cantidad de corriente entregada en amperios, el tipo de corriente, que puede ser corriente alterna CA o corriente directa DC, y la polaridad de corriente para los equipos con configuración de corriente directa o DC (Abdulkareem Aloraier et al., 2014; Khamari et al., 2019). Esto indica que el potencial permanece constante, y que otras variables como la velocidad de aplicación de soldadura o la longitud de arco son suministradas acorde a la habilidad del operador.

1.2.2. Proceso de soldadura por arco eléctrico GMAW

El proceso Gas Metal Arc Welding (GMAW, Soldadura de arco metálico con gas) se desarrolla bajo un modelo de producción de mayor rendimiento. Esto acorde a la condición de ahorro de tiempo que se genera frente al cambio de electrodos en el proceso SMAW. El proceso GMAW posee un mecanismo automático de alimentación del electrodo (COSUDE & CAPLAB, 2001) el cual es un alambre devanado que se alimenta a través de una antorcha o pistola de aplicación con un motor eléctrico y unos rodillos de arrastre. En adición, también se genera una atmósfera de protección dada la inyección de gas inerte o activo a través de la boquilla de disparo, que protege la aplicación e inhibe ampliamente modelos de contaminación, y enfriamientos bruscos o intempestivos. Este gas de protección está constituido por diferentes tipos de gases, tales como el oxígeno, el argón, el helio, el dióxido de carbono, o mezclas de estos. En la composición química del gas es donde surge la distinción entre llamar al proceso GMAW con la denominación

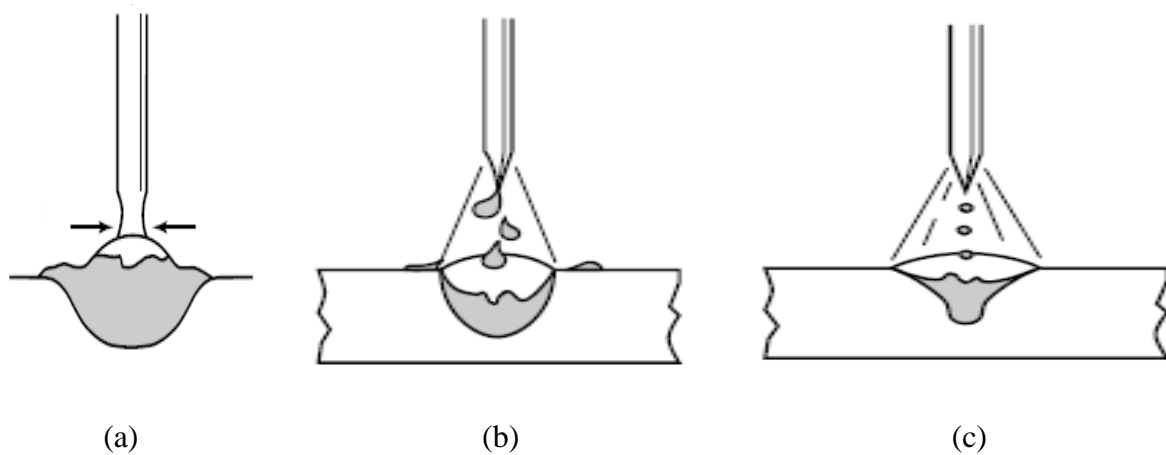
de MIG y MAG, la cual se basa principalmente en el tipo de gas de protección utilizado. Si se utiliza un gas inerte, se denomina MIG, mientras que si se utiliza un gas activo o una mezcla de gases activos, se denomina MAG. Adicionalmente el proceso GMAW no genera escoria como es el caso del proceso SMAW. El proceso GMAW puede considerarse entre los más productivos en relación costo y beneficio, su amplia gama de aplicaciones le permite ser utilizado en materiales delgados, así como también en material de mediano y grueso espesor (Jeffus & Rowe, 2008). Existen tres mecanismos de transferencia del material de aporte, cortocircuito, globular y rocío también conocido como spray. Este último mecanismo se presenta en esquema de spray axial y spray pulsado (ESAB, 2016). El primer mecanismo es el corto circuito o GMAW-S, el cual realiza la entrega continua del material de aporte a través de la producción de 20 hasta 200 pulsos de cortocircuito por segundo ocasionando que el material del alambre sea transferido de forma continua al charco de fusión de los materiales implicados. Esta alta frecuencia de transformación hace que la corriente genere alrededor de la entrega del material un campo magnético que atrae el material de aporte hacia las piezas donde se está realizando la fusión, aunado a esto, la acción de la tensión superficial una vez realizado el corto circuito presenta una fuerza de corte que asiste la deposición del material de aporte sobre la pieza de trabajo (Zeng et al., 2023). Por tanto, el modelo de transferencia presenta esa continuidad de entrega sin interrumpir el flujo de material o realizando goteo de este. El segundo mecanismo es la transferencia globular, es un esquema de pulsos que permite la formación de gotas de menor tamaño frente al mecanismo anterior que se desprenden del modelo de tensión superficial y caen de forma errática por gravedad sobre el charco de soldadura, sin embargo, la entrega se presenta en forma irregular, dado que las gotas no tienen el mismo efecto de adherencia magnética que se da en el GMAW-S (González Pérez et al., 2023). La transferencia globular tiene la particularidad de alta productividad. Su avance permite entregar

altas tasas de longitud soldada en corto tiempo, y por su característica de aporte, es preferido en láminas delgadas, y en aplicaciones de bajo desempeño donde la adherencia o la geometría de fusión no son fundamentales. La generación exagerada de humos del proceso y la salpicadura de proyecciones son atributos de este modelo (Singh, 2022). El último mecanismo de transferencia es el rocío o spray, en el cual una gran densidad de energía permite el flujo de múltiples gotas que son impulsadas fuertemente a la superficie de los materiales a unir. Estas gotas se integran al charco de soldadura donde yacen los materiales parcialmente fundidos para lograr la integración. Este tipo de transferencia de metal se presenta en forma de spray pulsado y spray axial, que se refiere a las formas en que se transfieren las gotas de metal fundido desde el electrodo hacia la pieza de trabajo. Ambos modelos tienen características particulares. En la transferencia de spray pulsado, se intercalan pulsos de corriente alta y baja para controlar la transferencia de metal fundido. Durante el pulso de alta corriente, se forma una pequeña gota de metal que se desprende del electrodo y es dirigida hacia la pieza de trabajo. Este proceso se repite en ciclos pulsados. La transferencia de metal en spray pulsado es adecuada para materiales más finos y posiciones de soldadura vertical ascendente. Proporciona un control más preciso del tamaño de la soldadura y minimiza la generación de salpicaduras (Bohnart & Sacks, 2012). En la transferencia de spray axial, la corriente es más constante y fluye de manera axial a lo largo del electrodo. Se forma un arco estable entre el electrodo y la pieza de trabajo, y las gotas de metal fundido se desplazan axialmente desde el electrodo hacia la pieza de trabajo. La transferencia de spray axial es más adecuada para materiales más gruesos y aplicaciones de soldadura de alta velocidad. Ofrece una mayor tasa de deposición en comparación con el spray pulsado, pero puede generar más salpicaduras (Singh, 2022). El mecanismo de transferencia en general sea pulsado o axial depende del espesor de los materiales a unir, puesto que por la densidad de energía tan alta, puede llegar a

fundir sin control los metales implicados (Praveen et al., 2005). En este mecanismo de transferencia, la dedicación de la energía está enfocada en la transformación del material de aporte en las pequeñas gotas y en la proyección (Carlson, N., Johnson, J. and Kunerth, 1992). La Figura 3 presenta esquemáticamente los mecanismos de transferencia.

Figura 3

Mecanismos de transferencia de metal de aporte en proceso GMAW

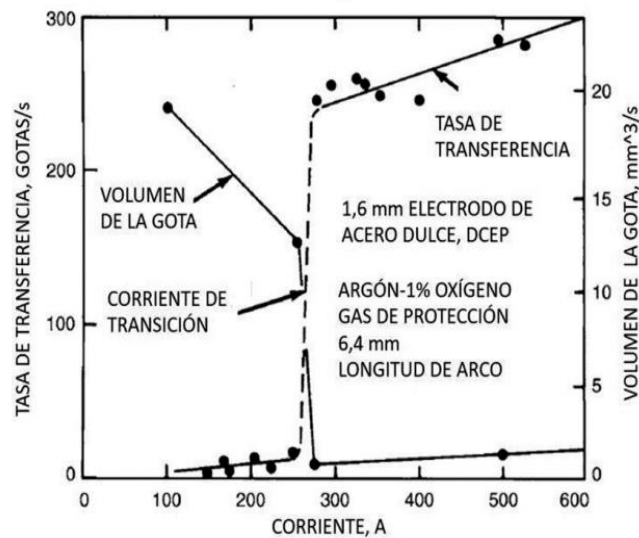


Nota. (a) GMAW-S o corto circuito, (b) GMAW globular, (c) GMAW Spray. Tomado de Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection (pág. 96), por (Nadzam et al., 2014), Lincoln Global Inc.

El nivel de corriente es vinculado al modelo de transferencia que permite asociar la tasa de formación de gotas que en probabilidad caigan sobre el charco de soldadura. La Figura 4 muestra esta relación que esclarece que a mayor cantidad de corriente se presenta mayor generación de gotas que pueden depositarse en el proceso de soldadura o dispersarse como salpicaduras alrededor del área de trabajo.

Figura 4

Tasa de generación de gotas respecto a la corriente aplicada en proceso GMAW



Nota. Tomado de *Study of the transition current in GMAW (MIG/MAG)* (pág. 2) de (Moreno-Uribe et al., 2020)

Sobre las ventajas y desventajas de cada uno de los mecanismos de transferencia del proceso GMAW se presenta la Tabla 1. Un estudio preliminar realizado para ver los efectos producidos en el comportamiento a la tracción un acero estructural sometido a los tres mecanismos de transferencia (Díaz Nova et al., 2021), arrojó como resultado que el mecanismo de transferencia spray ofrece mejores comportamientos para el diseño de elementos. Se tomó el mecanismo de transferencia tipo rocío o spray GMAW-P como base para el proceso experimental de este trabajo. A diferencia de los procesos SMAW y FCAW que presentan modelos de transferencia más simplificada como el modelo de goteo, en el cual el metal fundido se desprende del extremo del electrodo y cae sobre la pieza de trabajo (Lancaster, 1984).

Tabla 1

Ventajas y desventajas de los modos de transferencia del proceso GMAW.

Modos de transferencia	Ventajas	Desventajas
Cortocircuito (GMAW-S)	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo nivel de temperatura que reduce la distorsión geométrica. • Se puede aplicar en todas las posiciones. • Alto aprovechamiento del material de aporte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso restringido a láminas de cierto espesor. • Alta proyección de partículas, que genera procesos de limpieza. • Exige control de parámetros durante la aplicación para evitar falta de fusión y salpicaduras.
Globular (GMAW – G)	<ul style="list-style-type: none"> • Exhibe la mejor velocidad de deposición de aporte de la aplicación. • Utiliza insumos de gas protector de bajo costo. • El equipo de aplicación es de bajo costo y bajo consumo comparado con los otros modos. • Buena penetración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta proyección de partículas y genera postprocesos de limpieza. • La apariencia del cordón es convexa y tosca. • Por alta proyección de partículas el rendimiento del material de aporte es bajo. • Produce gran cantidad de humos. • Limitada a la posición plana
Rocío o Spray (GMAW-Spray)	<ul style="list-style-type: none"> • Alta tasa de deposición. • Ausencia de salpicaduras. • Excelente fusión. • Alto aprovechamiento del material de aporte. • Excelente apariencia de cordón. • Control de emisiones gaseosas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posición limitada al eje axial. • La elevada radiación exige protecciones adicionales. • Los equipos son más costosos. • El gas usado es más costoso.

El proceso GMAW posee múltiples variables que deben ser coordinadas e influyen en el comportamiento del arco durante la aplicación o la calidad de la junta soldada. Dos de estas variables son la composición química del gas y la cantidad del flujo de gas. Las cuales pueden modificarse en componentes y proporciones, argón, oxígeno, dióxido de carbono, nitrógeno y helio

(Jonsson et al., 1995). En términos generales y de acuerdo al propósito de esta investigación la selección de un gas binario, como la mezcla de argón y dióxido de carbono puede ser escogida a través de los conceptos manifestados por diversos autores afectando aunque no de forma significativa sobre los resultados geométricos o de propiedades de los materiales de la soldadura (Campbell et al., 2012; Menzel, 2003). Mencionando la estabilidad del arco, obtenida a partir del potencial de ionización y el efecto de la energía de disociación del gas, o la capacidad de protección del gas que puede conducir a evitar la corrosión sobre el material depositado, son criterios suficientes de selección (Jeffus & Rowe, 2008; T. Lienert et al., 2011) Ebrahimnia y otros (Ebrahimnia et al., 2009) divulgaron resultados con el trabajo de una mezcla enriquecida en un gas binario, mostrando que con una mayor cantidad de argón las inclusiones dentro del charco de soldadura tienden al crecimiento, otros autores ratifican esta premisa (Costanza et al., 2016; Mukhopadhyay & Pal, 2006). Gadallah y otros (Gadallah et al., 2012) presentaron una investigación a partir de la variación de componentes de este gas binario y la afectación en la formación microestructural de ferrita de límite de grano como fase predominante. De igual forma, la cantidad de flujo entregado ya sea por exceso o defecto puede generar cambios en la temperatura del proceso de fusión. Donde se afecta la entrega del material de aporte y su continuidad dentro de la morfología de la unión soldada (Wilhelm et al., 2010). En algunos escenarios el tipo de mezcla puede afectar negativamente la efectividad de la densidad de corriente, modificando el mecanismo de transferencia para el aporte. Este factor es dependiente de la calidad de gas utilizado que beneficia la atmósfera del proceso de fusión (Ogino et al., 2016). Diversos autores (Kah & Martikainen, 2013; Mvola & Kah, 2017; Suban & Tušek, 2001; Zielinska et al., 2008) mencionan la influencia aún más pronunciada a partir del tipo de mezcla del gas que genera consecuencias como la falta de protección contra la contaminación externa y puede ocasionar defectos tales como,

la forma y apariencia del cordón de soldadura, las propiedades metalúrgicas y mecánicas, la estabilidad del arco, la velocidad de la aplicación, y las emisiones de humos. Otro parámetro influyente es el proceso de alimentación de alambre. La velocidad de alimentación del alambre representa una variable importante del proceso GMAW, debido a que el parámetro de corriente, el efecto en penetración y la morfología del cordón están vinculados a este parámetro. Algunos autores (Hackenhaar et al., 2018; Jorge et al., 2020) también relacionan matemáticamente y de forma directa la velocidad de alambre con el parámetro de velocidad de fusión, esto indica que a mayor velocidad de alambre, mayor será la velocidad de fusión y que es esencial para mantener la estabilidad del arco, la penetración adecuada y el perfil de soldadura deseado. Existen investigaciones preliminares que han presentado modelos matemáticos correlacionando la velocidad del avance respecto a la velocidad de alambre (Wêglowski, M. S., Huang, Y., & Zhang, 2008). Modelos experimentales más complejos han utilizado la captación de efectos sonoros del arco y la medición de parámetros geométricos del cordón, estableciendo una velocidad de alimentación de alambre apropiada (Johnson et al., 1991). Parámetros adicionales como el stickout, ya mencionados en la introducción del proceso SMAW, que corresponde a la distancia entre la boquilla de la antorcha al punto de aplicación, o el potencial de entrada (Castellanos-González et al., 2021; Karadeniz et al., 2007), el cual sufre pequeñas fluctuaciones durante la aplicación, pueden ser coordinados dentro de los parámetros normativos o sugeridos por fabricantes o investigadores. Estos valores representan una guía para la ejecución del proceso por parte del operador o del sistema programado (Modenesi & De Avelar, 1998).

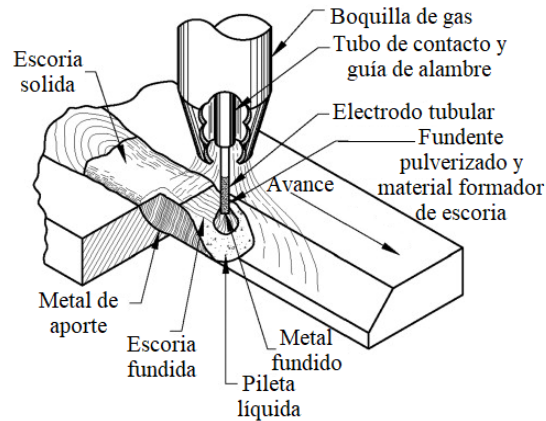
1.2.3. Proceso de soldadura por arco eléctrico FCAW

El proceso Flux Cored Arc Welding (FCAW, Soldadura de arco con núcleo fundente) posee una gran similitud con el proceso GMAW, los equipos y elementos guardan especial

integración, salvo pequeñas modificaciones físicas en los sistemas de arrastre y alimentación. Una diferencia importante reside en el alambre tubular del material de aporte, el cual posee en su interior el material fundente constituido por los elementos que generan la atmósfera de protección. Este material es similar a los elementos añadidos en el recubrimiento de la varilla o electrodo revestido del proceso SMAW. De esta forma estos materiales pueden contener elementos de aleación para enriquecer la fusión y generan una atmósfera que concentra los gases para proteger el proceso. Estos fundentes producen una escoria que, siendo más liviana en el charco de fusión, flota y preserva el modelo atenuado de enfriamiento en la junta, evitando agrietamientos o contaminación (A. Aloraier et al., 2006). El proceso FCAW es utilizado en diversas áreas, por su alta productividad y la calidad de unión. Sin embargo, uno de los grandes problemas es la emisión de gases nocivos, principalmente NO_x , que pueden ser contrarrestados por control de ambiente y ventilación (Moisa et al., 2011). El proceso puede desarrollarse con gas o sin gas de protección, dado que el entorno es producido por los materiales que se alojan al interior del alambre tubular (Groover, 2015). Y para lo cual adopta diversos nombres en función de la utilización del gas que puede generar modos de transferencia diversos o sobreproteger la condición de la aplicación. La denominación para estos procesos es FCAW-G cuando se aplica gas y FCAW-S cuando no se suministra gas. Excluyendo las condiciones en las cuales el gas de protección no es utilizado, las variables del proceso FCAW son similares a las del proceso GMAW, velocidad de alimentación del alambre, potencial, velocidad de avance de la antorcha y ángulo de aplicación de la antorcha (Katherasan et al., 2014). Algunos autores sugieren que debido a las tasas de productividad, la alta penetración y la ausencia de procesos térmicos posteriores a la soldadura FCAW, dicho proceso supera en ventajas al GMAW y al SMAW (A. Aloraier et al., 2006; Hrabê et al., 2009). Un esquema del proceso se presenta en la Figura 5.

Figura 5

Proceso FCAW o soldadura por arco con núcleo fundente.



Nota. Adaptado de AMPCO METAL. (2021). <https://academy.ampcometal.com/how-to-weld-copper-alloys-using-shield-metal-arc-welding-or-flux-cored-arc-welding>

1.3. Generalidades de los modelos matemáticos.

El modelamiento matemático es el proceso racional de elaborar relaciones numéricas para expresar fenómenos reales (Santos et al., 2000). La conjugación matemática de las posibles predicciones de comportamiento que puedan ocurrir en un evento hace parte del proceso de modelamiento matemático. Esto clasifica de diferentes formas los escenarios bajo los cuales un conjunto de datos puede ser trazado. De esta definición pueden englobarse las siguientes clasificaciones de modelos matemáticos (Segel, 1979).

1.3.1. Modelos lineales y no lineales

El desarrollo de modelos básicamente se compone del análisis de variables con abstracción de las cantidades de interés y las correlaciones que existen entre ellas, de manera que su interacción esté determinada en operadores matemáticos que exhiben linealidad o no linealidad (Edwards & Hamson, 1989).

1.3.2. Modelos determinísticos y estocásticos

Los escenarios determinísticos plantean la condición de descripción de modelos a partir de la interpretación única de los datos recopilados, sin contemplar fluctuaciones aleatorias o futuras, de caso opuesto se presentan los modelos estocásticos que contemplan estados variables y perturbados con valores de distribución probabilística, es decir la estadística juega un papel importante en su definición (Meskens & Roubens, 1999).

1.3.3. Modelos estáticos y dinámicos

La condición transitoria o variable en el tiempo es el efecto diferenciador en este esquema de planteamiento, por cuanto los modelos matemáticos estáticos no contemplan variaciones a partir de los cambios en el tiempo, mientras que los dinámicos incluyen las perturbaciones que el tiempo pueda generar en los términos del modelo (Hritonenko & Yatsenko, 2003).

1.3.4. Modelos discretos y continuos

Un modelo matemático discreto toma la función de tiempo y en términos habituales genera cambios eventuales a partir del avance en el tiempo, los modelos continuos toman esta variable tiempo y la integran de manera permanente sobre el intervalo de cálculo (Bender, 2012).

1.3.5. Fases de desarrollo de modelos matemáticos

De forma transversal para todas las clasificaciones mencionadas anteriormente, las fases de desarrollo que implican la generación de un modelo matemático son las siguientes (Fernández, 2004).

- Fase de análisis: Se realiza la conceptualización de las situaciones reales que identifican las propiedades relevantes del fenómeno, se abstrae la funcionalidad del modelo, describiendo lo que se espera de su aplicación, sin concebir el método o forma en que lo realizará.

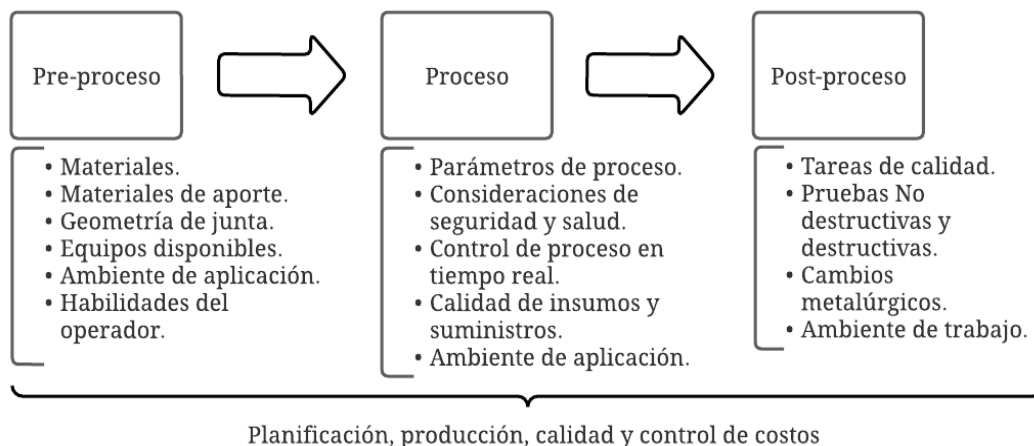
- Fase de diseño: Se identifican los subsistemas pertenecientes a cada evento del fenómeno y se plantean los términos de la función objetivo, en esta fase se aplican las estrategias numéricas de resolución que permiten dar tratamiento adecuado a los datos recopilados que afianzan el comportamiento planteado.
- Fase de implementación: Se desarrolla la validación del modelo matemático a partir de pruebas cíclicas que integren valores extremos o condiciones que excedan el dominio de aplicación, esperando que se generen las incongruencias a que habría lugar, de igual forma se revisan condiciones de control con modelos repetitivos conocidos o comparando con escenarios no analíticos, sino experimentales o de simulación numérica que permitan establecer desviaciones, errores o rangos de convergencia.

1.3.6. Antecedentes de modelos de selección de procesos de soldadura

La realización de un planteamiento de selección del proceso de soldadura implica una revisión exhaustiva de varios criterios que causan una marcada influencia en los resultados esperados, de ahí que sea necesario revisar el escenario de la soldadura. La Figura 6 presenta un proceso de evolución sistémico en tres pasos de consideración, todos junto con el factor del costo.

Figura 6

Consideraciones del proceso de soldadura



Fueron realizadas revisiones a los modelos matemáticos de selección del proceso de soldadura por arco eléctrico existentes en la literatura, sin embargo no se encontró percibirse un enfoque en los criterios de decisión que tenga presente la aplicación posterior del material soldado.

Las referencias presentadas muestran procesos de selección fundamentados en perspectivas diferentes al uso posterior del material y las cargas a las que será sometido. En las descripciones de los estudios revisados se han encontrado modelos tales como el modelo Analytic Hierarchical Process (AHP, Proceso analítico jerárquico), el Multicriteria Decision Making (MCDM, Ejecutor de decisiones multicriterio), otros modelos numéricamente más complejos y de mayor dificultad al obtener variables cuantificables como Graph Theory and Matrix Approach (GTMA, Teoría de gráficos y enfoque matricial) o el Data Envelopment Analysis (DEA, Análisis de desarrollo de datos), y el Technique for Order Preference and Similar Ideal Solution (TOPSIS, Técnica para orden preferencial y solución ideal similar). Se presenta a continuación una descripción breve de los modelos y se reportan los trabajos que con el enfoque de implementación en la selección de procesos de soldadura existentes en la literatura han sido realizados. Estos procesos de selección muestran que han sido desarrollados contemplando los factores que influyen en la decisión, y con metodologías de algoritmos de decisión ponderada, sin examinar la influencia que ejerce el análisis de datos sobre resultados de ensayos en los materiales intervenidos.

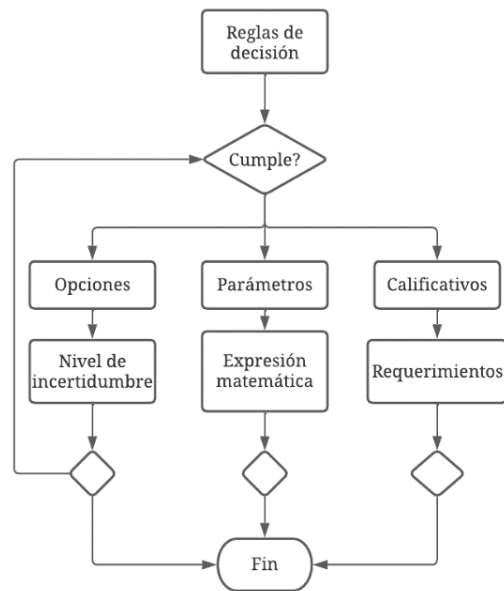
Sistema experto basado en PC

Este método establece detalles de los parámetros incluidos en la Figura 6, que abarcan en el caso de la soldadura, preproceso, proceso y post proceso, posteriormente se enlistan en una matriz de prioridades, y se les atribuyen determinados valores subjetivos. Finalmente es posible configurar un algoritmo que ubica las variables del sistema, con base en los requerimientos del usuario de la interfaz. El sistema toma la decisión a través de los resultados del algoritmo. Algunos

autores (Darwish et al., 1997; Lovegrove et al., 1989) han desarrollado análisis basados en este método para la selección de procesos de soldadura, incluyendo matrices de ponderación y enumerando hasta treinta procesos de soldadura simultáneamente. De igual forma, otros autores han utilizado el método durante mucho tiempo y sigue siendo vigente para procesos de identificación y selección en otras disciplinas tan diversas como la medicina de seres humanos, animales y plantas (Ahyar Sholihuddin et al., 2024; Q. Li et al., 2024; Tahir et al., 2024), y hasta sistemas de selección de piezas y procesos de diseño (Long et al., 2021; Patil et al., 2024). La Figura 7 muestra el sistema de decisión booleano que se aplica de forma transversal a todos los sistemas expertos cualquiera sea su disciplina de aplicación.

Figura 7

Algoritmo de sistemas expertos



Nota: Algoritmo general, Tomado de *Mathematical Modelling: Theory and Applications. Advance in Decision Analysis. Vol. 4. 1999.* (pág. 400), por (Meskens & Roubens, 1999), Kluwer Academic Publishers.

El modelo matemático de sistemas expertos fue desarrollado por primera vez en la década de 1960 por investigadores de la Universidad de Stanford (Feigenbaum et al., 1988). El modelo se basa en la idea de que el conocimiento de un experto en un dominio particular puede ser representado en forma de reglas.

Lógica difusa

El sistema de lógica difusa o lógica Fuzzy promueve la ponderación numérica de los criterios dentro de un rango de aceptación o negación de su valor. Esto genera que la decisión tenga en cuenta elementos subjetivos con menor o mayor ponderación en la aplicación de un modelo de selección. Lo anterior se logra a partir de la aplicación de operaciones que permiten ubicar la ponderación en funciones matemáticas que describen elementos geométricos. Estos se correlacionan con otros criterios de selección. La aplicación de condiciones booleanas permite que la decisión tenga en cuenta varios parámetros simultáneamente (Zadeh et al., 1996).

La lógica difusa propone un esquema de ecuaciones para acotar la conexión entre la incertidumbre y la subjetividad de dos posibles criterios de selección. Sea una variable de selección A representada por un número difuso triangular TFN \tilde{A} , con componentes (a_1, a_2, a_3) , su función de pertenencia al conjunto de selección se representará como se muestra en la Ecuación 5.

Ecuación 5: Función de relación en lógica difusa.

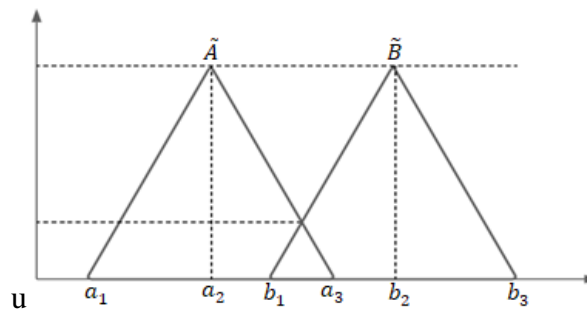
$$\mu_{\lambda}(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & \text{si es diferente al rango} \end{cases}$$

Donde a_2 es el valor más posible de la TFN \tilde{A} , y a_1 , y a_3 son los límites inferior y superior, y se utilizan para mostrar los bordes de esta variable como función para el proceso de selección.

Estos límites se pueden vincular con otras variables a través de operaciones como la suma, el producto, el cociente y la distancia de Euler. La Figura 8 muestra cómo interactúan dos variables \tilde{A} y \tilde{B} para cuantificar su relevancia en el proceso de decisión.

Figura 8

Variables del método de lógica difusa



Nota: Tomado de *Fuzzy sets*. 1996. (pág. 397), por (Zadeh et al., 1996), World Scientific Publishers.

Recientemente el modelo matemático de lógica difusa ha sido empleado en la parametrización de diversos procesos de soldadura (Abebe & Bogale, 2023; Bindhushree et al., 2023; Cavazos Hernández et al., 2023; Choudhury & Chandrasekaran, 2023; Mounika et al., 2023; Senthilkumar et al., 2023), aun cuando su uso se extiende a la selección del proceso de soldadura adecuado, lo que se discute en la revisión bibliográfica realizada al final de esta sección.

Modelo de decisión multicriterio o MCDM

En este método es necesario enumerar los atributos que pueden influir en el rendimiento del proceso de soldadura, y aplicar valores que clasifiquen su relevancia. Será habitual aplicar procedimientos de normalización y desarrollar matrices que operen el total de afectación para dar lugar a un valor de decisión a partir de esa ponderación. Desde la década de 1960, fecha en la que se presentó el método (Keeney & Raiffa, 1979) se han desarrollado numerosos métodos matemáticos de MCDM. Estos métodos se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones,

incluyendo la selección de proyectos, la asignación de recursos, la gestión de riesgos y la toma de decisiones en la ingeniería (Gong et al., 2024; Kadapa, 2024; Manoujan & Riasi, 2024; Rafiquee & Shabbiruddin, 2024; Saravanan et al., 2023). En el campo de la soldadura, el MCDM se ha utilizado para una variedad de aplicaciones, incluyendo la selección de materiales de soldadura, la selección de procesos de soldadura y la evaluación de la calidad de la soldadura (Al-Mendwi & Doos, 2023; Bui & Nguyen, 2023; Ramu et al., 2023).

El esquema de asignación de valores dependerá del nivel de fortaleza o debilidad que aporte cada variable y de la información que suele provenir de los modelos experimentales o de la literatura científica. Lógicamente, este método arroja subjetividad sobre el modelo de decisión, dada la condición de asignación de valores de ponderación, la cual está en responsabilidad de asignación de quien ejecuta el análisis. Sin embargo, es viable para variables directas como los materiales, los flujos de gas, los sistemas de transferencia de insumos, y también para variables indirectas como los costos, el personal de mano de obra, la habilidad de los operadores, el impacto ambiental y otras (Ramos et al., 2010). En la Tabla 2 se presenta un ejemplo de matriz para este método.

Tabla 2

Matriz modelo de decisión multicriterio MCDM

Proceso	Welding Quality Calidad de la soldadura	Operator Skills Habilidades del operador	Consumable Costs Costo de consumibles	Surface Cleaning Limpieza de superficie
SMAW	0.6	0.3	0.1	0.3
GMAW	0.7	0.2	0.5	0.5
FCAW	0.4	0.4	0.4	0.3
GTAW	0.8	0.6	0.7	0.6

Análisis Jerárquico de Proceso o AHP

La principal ventaja sobre otros modelos de selección de procesos de soldadura radica en la inclusión numérica y la mezcla de factores cuantitativos y cualitativos. Los cuales, unificados en una matriz jerarquizada revisan la permutación de todas las variables para medir su nivel de influencia (Saaty, 1987). Es habitual en este método realizar combinaciones y calcular los productos de las matrices de prioridades normalizadas. A estos resultados se les conoce como el vector selección o vector priorización (Vaidya & Kumar, 2006). La Tabla 3 muestra un ejemplo de una matriz de prioridades normalizada con las variables anteriores analizadas en otros métodos.

Tabla 3

Análisis jerárquico del proceso AHP con matriz de prioridad normalizada

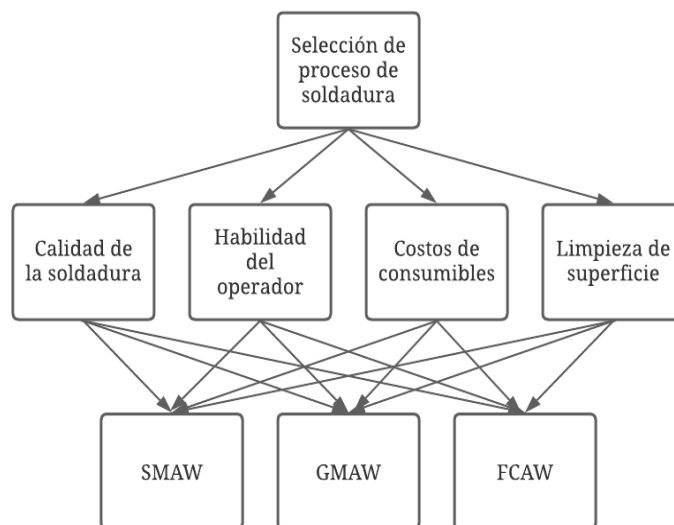
Variable	Welding	Operator	Consumable	Surface	Vector de priorización
	Quality	Skills	Costs	Cleaning	
	Calidad de la soldadura	Habilidades del operador	Costo de consumibles	Limpieza de superficies	
WQ	1 (0.091)	1/5 (0.032)	1/2 (0.086)	1/3 (0.057)	0.266
OS	5 (0.455)	1 (0.161)	1/3 (0.057)	1/2 (0.086)	0.759
CC	2 (0.182)	3 (0.484)	1 (0.171)	4 (0.686)	1.523
SC	3 (0.273)	2 (0.323)	4 (0.686)	1 (0.171)	1.453
Total	11	6.2	5.833	5.833	4

Es importante resaltar la correlación establecida entre las alternativas y criterios que desemboca en la adición de factores de decisión. Dentro de la matriz presentada se pueden ver los valores recíprocos de estos factores y que ponderan numéricamente el valor de correlación. El

modelo matemático propuesto para selección por AHP ha sido empleado en diversas aplicaciones, en específico para el área de soldadura, en la selección de procesos, adecuación de parámetros y calidad de elementos soldados (Ajmi et al., 2024; Joshi & P Nerkar, 2023). Adicionalmente, la Figura 9 muestra las variables vinculadas del ejemplo propuesto y la interrelación generada al ejecutar la priorización y realizar la permutación de combinaciones.

Figura 9

Combinación de las variables en el análisis jerárquico de procesos (AHP)



TOPSIS

Como su acrónimo indica, el modelo TOPSIS es una técnica de orden preferencial por similitud de la solución ideal. Este modelo puede ser comparable al método AHP, la matriz de prioridad normalizada tiene un cálculo diferente. Sea $Y = (y_{ij})$ la matriz de decisión, se puede obtener la matriz de prioridad normalizada $R = (r_{ij})$ Ecuación 6.

Ecuación 6: Cálculo de elementos de matriz normalizada en TOPSIS

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_{ij}^2}}$$

TOPSIS también mide el valor diferencial entre la solución ideal propuesta y el punto de la solución no ideal (Capraz et al., 2015). A través de la Ecuación 7 usada para acercarse a la solución ideal y para medir la distancia del punto despreciado, definido como el punto que más se aleja del estado ideal aun cumpliendo con la condición buscada (Mirhedayatian et al., 2013).

Ecuación 7: Cálculo de distancias entre punto ideal y punto despreciado en TOPSIS

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^+)^2}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - r_j^-)^2}$$

Donde d_i^+ y d_i^- representan la distancia mencionada anteriormente entre los valores de la matriz normalizada r_{ij} y los valores ideales r_j^+ hacia el acercamiento objetivo y r_j^- en su alejamiento.

Se han descrito varios métodos para la selección de un proceso de soldadura. Muchos de estos métodos basados en técnicas matemáticas o en modelos de elección subjetiva que contemplan criterios de selección los cuales no son cuantificables. La Tabla 4 presenta un resumen de los métodos y autores que han desarrollado conocimientos científicos sobre el tema, junto con el año de sus publicaciones en un orden cronológico y un índice de citas al momento de generar este documento como reflejo de la calidad de sus trabajos. Para la compilación y análisis de los datos de esta información se consultaron las bases de datos más representativas, Web of science, Scopus y Google Scholar (Bohórquez et al., 2021). Este análisis se vigiló permanentemente durante el desarrollo del presente trabajo con el propósito de actualizarlo a las fuentes o metodologías que surgieran y contrastarlo con las técnicas aquí presentadas.

Tabla 4

Publicaciones científicas en selección de procesos de soldadura

Método empleado	Autor	Año de publicación	Índice de citación y fuente
Sistemas expertos	Lovegrove (Lovegrove et al., 1989)	1989	4 – GS
	Darwish (Darwish et al., 1997)	1997	31 – GS/ Scopus
Lógica difusa	Jafarian (Jafarian & Ebrahim Vahdat, 2012)	2012	838 – GS/ Scopus
	Wardana (Wardana et al., 2020)	2020	2 – GS
	Saluja (Saluja & Singh, 2023)	2023	1 - Springer
MCDM	Badhesia (Cerjak & Bhadeshia, 1997)	1997	29 – GS
	Yeo (Yeo & Neo, 1998)	1998	45 – GS/ Scopus
	Brown (Brown et al., 2002)	2002	10 – GS
	Silva (Silva et al., 2005)	2005	32 – GS/ Scielo
	Correia (Correia & Ferraresi, 2007)	2007	22 – GS/ Scopus
	Lazic (Lazić et al., 2012)	2012	19 – GS/ Scopus
	Araque (Araque de los Ríos & Arzola de la Peña, 2013)	2013	17 – GS/ Conicyt
	Rao (Rao, 2013)	2013	953 – GS
	Sproesser (Sproesser et al., 2016)	2016	13 – GS/ Scopus
	Thakur (Thakur et al., 2019)	2019	6 – GS
AHP	Balasubramanian (Balasubramanian et al., 2000)	2000	2 – GS
	Ravisankar (Ravisankar et al., 2006)	2006	67 – GS/ Springer
	Jayant (Jayant et al., 2015)	2015	33 – GS
TOPSIS	Mirhedayatian (Mirhedayatian et al., 2013)	2013	69 – GS/ Scopus
	Capraz (Capraz et al., 2015)	2015	13 – GS
	Sanchez (Sánchez-Lozano et al., 2017)	2017	12 - Springer
	Omar (Omar & Soltan, 2020)	2019	1 – GS/ Springer

Se presenta a continuación el análisis y discusión de los modelos existentes.

Bhadeshia (Cerjak & Bhadeshia, 1997), realizaron selección a través de MCDM y plantearon un análisis microestructural de las formaciones de ferrita con un único proceso de soldadura, realizando una revisión microestructural con fundamento experimental y confrontando los resultados con modelos analíticos de composición que predican las diluciones y las fases presentes en la soldadura.

Darwish y otros (Darwish et al., 1997), presentaron un modelo de selección basado en conocimiento tecnológico, y con procedimiento determinístico usando sistemas de lógica difusa, basado en elementos de calidad de la soldadura, tipo de material, geometría de la junta, método de uso, posición de aplicación, basados en calificaciones ponderadas por expertos sobre las condiciones metalográficas y los ensayos de las propiedades mecánicas, como fuente de fiabilidad sobre los resultados, este artículo presenta un modelo de análisis jerárquico para la selección.

Ravisankar y otros (Ravisankar et al., 2006), realizaron la selección de soldadura bajo un proceso de análisis jerárquico AHP, donde considera diferentes criterios y efectúa la decisión basado en ponderaciones y combinaciones, los parámetros contemplados son procedimientos previos a la soldadura, disponibilidad de consumibles, requerimientos de habilidad del operador, limpieza posterior, capacidad de posiciones de aplicación, costos, y calidad de la soldadura basados en la geometría del cordón aplicado, este trabajo consideró tres procesos diferentes.

Balasubramanian y otros (Balasubramanian et al., 2009), propusieron un modelo de selección basado en varios procesos de soldadura, bajo un modelo de análisis jerárquico AHP, estableciendo un alcance específico sobre la aplicación de soldaduras de relleno, las cuales van sobre la superficie del material y su propósito está enfocado en reconstruir el elemento de máquina que ha sufrido desgaste por uso o corrosión.

Lazic y otros (Lazić et al., 2012), mostraron la selección del método de aplicación MCDM basado en la compatibilidad de los materiales de aporte y en garantizar la soldabilidad de aporte y sustrato, analizando la composición química de los materiales a unir y de los revestimientos que acompañan los electrodos de aplicación, así como propiedades mecánicas de las juntas realizadas.

Jafarian (Jafarian & Ebrahim Vahdat, 2012) presentaron un modelo de selección bajo la metodología de lógica fuzzy, en la cual el proceso considera las funciones para cada uno de los criterios y formula matemáticamente los posibles puntos donde los parámetros son máximos en cada función, este análisis se emplea en la selección de un proceso de soldadura para la fabricación de un reactor de alta presión, en este trabajo se contemplaron nueve procesos de soldadura, y los criterios de selección incluyeron, aplicación del diseño, configuración de las juntas, costos, espesor de las partes, aleaciones implicadas en el proceso de fabricación.

Mirhedayatian y otros (Mirhedayatian et al., 2013), expusieron el proceso de selección TOPSIS, una mezcla del método DEA y aplicación posterior de lógica fuzzy, donde se revisan parámetros principales como, aplicación del diseño, configuración de la junta, posiciones de la junta, espesor de las partes, y aleaciones presentes, combinado con nueve procesos de soldadura.

Araque (Araque de los Ríos & Arzola de la Peña, 2013), realizaron una revisión del estado del arte sobre dos procesos el SMAW y el GTAW a partir de análisis de mecánica de la fractura, se presentó un resumen de los principales trabajos sobre la soldadura y la mecánica de fractura con los modelos analíticos empleados, así como con escenarios de modelamiento numérico con software de elementos finitos.

Jayant y otros (Jayant et al., 2015), expusieron un modelo de selección AHP proceso de análisis jerárquico con cinco procesos y doce criterios de selección, entre los que se incluyen, configuración de la junta, posición de la soldadura, costos, tasa de deposición del aporte, espesor

de paredes de las piezas, calidad de soldadura basada en la geometría, tipos de material a utilizar, procedimientos de la soldadura, portabilidad del proceso, material de aporte, y equipos.

Sproesser y otros (Sproesser et al., 2016), plantearon un modelo matemático comparativo desde el método MCDM entre el proceso GMAW aplicado en forma manual y el aplicado en forma automática, las variables fundamentales de comparación se relacionan con el consumo energético y el costo de la operación.

Sánchez-Lozano y otros (Sánchez-Lozano et al., 2017) efectuaron una adaptación de los valores presentados por Mirhedayatian ((Mirhedayatian et al., 2013) y propusieron una técnica que involucra el AHP, DEA y TOPSIS, con la inclusión de ocho criterios que contemplan costos, fatiga del operador, eficiencia de la aplicación, cantidad de energía utilizada, productividad, limpieza y confiabilidad de los procesos de soldadura involucrados.

Omar (Omar & Soltan, 2020) desarrollaron un proceso de selección basado en la combinación de métodos como la lógica difusa, el sistema TOPSIS y el AHP, realizando la inclusión de diez criterios entre los que se cuentan diseño de la aplicación, configuración de la junta, posiciones de aplicación, portabilidad del equipo, costos, tasas de deposición del material, tipos de material de aporte, espesor de las piezas y elementos de aleación. Estos criterios pueden destacar como constitutivos de la soldadura, desde una perspectiva de datos de entrada al proceso.

Wardana y otros (Wardana et al., 2020) expusieron una técnica de implementación que combina la lógica difusa con el modelo DEA a través de diversos criterios como la preparación inicial de junta, los procedimientos de soldadura, la limpieza postproceso, el costo de consumibles y equipos, las habilidades del operador y el nivel de los riesgos de los procesos analizados.

Saluja (Saluja & Singh, 2023) exhibieron técnicas de selección de lógica difusa para el proceso de selección, abordando los datos de investigaciones anteriores y centrando el desarrollo

de la investigación en la técnica de asignación de atributos a cada uno de los criterios escogidos, estas valoraciones se realizan sobre la ponderación de importancia a parámetros de entrada del proceso.

Estos son los artículos revisados existentes en las bases de datos, y como pudo constatarse, no pudo percibirse un enfoque del proceso de selección que sea similar al planteado, dando así el espacio para desarrollar la investigación propuesta. La cual profundizará el conocimiento sobre las variaciones que generan los procesos de soldadura de forma cuantitativa en las propiedades mecánicas de los materiales implicados en el proceso de unión. Este horizonte de análisis permitirá establecer condiciones para la selección adecuada de los procesos de soldadura acorde al uso que se le dará a los materiales, así como refuerzo en los procesos de diseño, y reparación de elementos bajo el uso de la soldadura como método de unión. Realizando en paralelo procesos de observación bibliográfica que permitan validar la innovación en el campo de aplicación.

Dos frentes fundamentales fueron planteados como núcleo de la investigación. El primero de ellos fue la caracterización mecánica y microestructural del comportamiento de materiales sometidos a procesos de soldadura por arco eléctrico. Esto con el propósito de validar que las juntas desarrolladas cumplen con los modelos estandarizados de calidad y obtener su desempeño en el comportamiento mecánico y su evaluación microestructural. El segundo tema corresponde al modelamiento matemático alrededor de la selección de procesos de soldadura. El cual como se resaltó en la revisión de la literatura existente ha sido fundamentado en otros enfoques que no corresponden a la funcionalidad de los materiales una vez aplicados los procesos de soldadura.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Proponer un modelo matemático para la selección apropiada de proceso de soldadura por arco eléctrico a partir de criterios de afectación metalúrgica y propiedades mecánicas del material.

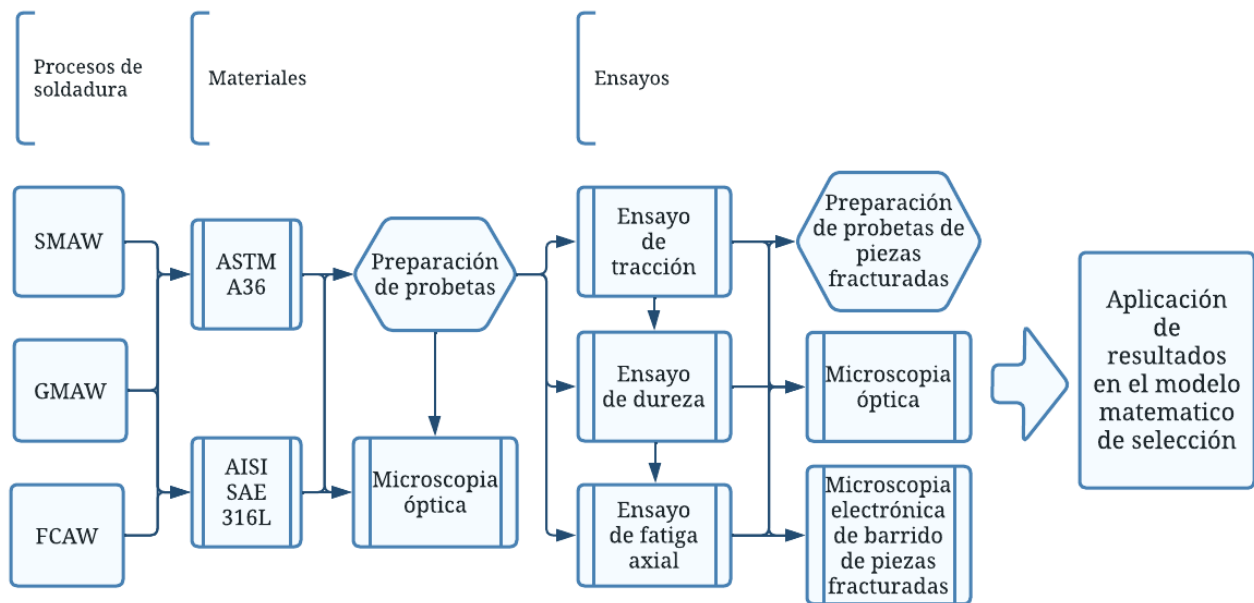
2.2. Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones metalúrgicas a partir de la caracterización microestructural de dos diferentes materiales ferrosos, acero estructural ASTM A36 y acero inoxidable AISI 316L, afectados por tres diferentes procesos de soldadura SMAW, GMAW-P, FCAW, para relacionar cambios en microestructura con el tipo de proceso aplicado.
- Establecer las condiciones mecánicas estáticas de dos diferentes materiales ferrosos, acero estructural ASTM A36 y acero inoxidable AISI 316L, afectados por tres diferentes procesos de soldadura SMAW, GMAW-P, FCAW usando modelos propuestos, para relacionar cambios en las propiedades mecánicas estáticas acorde con el tipo de proceso aplicado.
- Determinar las propiedades mecánicas dinámicas en dos diferentes materiales ferrosos, acero estructural ASTM A36 y acero inoxidable AISI 316L, afectados por tres diferentes procesos de soldadura SMAW, GMAW-P, FCAW usando modelos propuestos, para relacionar cambios en las propiedades mecánicas dinámicas acorde con el tipo de proceso aplicado.
- Desarrollar un modelo matemático que considere las relaciones estáticas y dinámicas anteriormente establecidas y que permita la adecuada selección del proceso de unión por soldadura de arco eléctrico capaz de otorgar a la estructura las condiciones mecánicas acorde a su uso.

3. Marco experimental

A partir de las propiedades planteadas como enfoque principal para el trazado de la decisión sobre la selección de los procesos de soldadura por arco eléctrico y el marco del alcance de esta investigación se planteó una matriz experimental mostrada en la Figura 10.

Figura 10 *Matriz experimental de la investigación*



Puede observarse a partir del análisis de la matriz que la aplicación de ensayos buscó establecer condiciones numéricas de las variaciones en las propiedades de los materiales, así como seguir el cumplimiento de las normativas impuestas por los estándares manejados para la elaboración de juntas soldadas, AWS D1.1:20 y AWS D1.6:17 (American Welding Society (AWS), 2017, 2020), obtención de probetas, ASTM E3:11, ASTM E407: y realización de ensayos ASTM E8/8M:20, ASTM E384:16, ASTM E606:12 (ASTM, 2004, 2016; ASTM Standard E8/E8M-13a, 2013; Materials, 2011). Los resultados numéricos de las propiedades mecánicas obtenidos de los ensayos fueron utilizados para comparar la influencia de los procesos de soldadura en el comportamiento de los materiales, correlacionar los niveles de afectación y establecer el

método de selección del proceso de soldadura por arco eléctrico adecuado. Se presenta en este apartado metodológico el conjunto general de técnicas, estándares y procedimientos seguidos para obtener las caracterizaciones que conducen al análisis de la hipótesis planteada. Se divide entonces este capítulo en materiales, procesos y ensayos.

3.1. Materiales

Los materiales considerados en esta investigación han sido seleccionados acorde al nivel de uso y su desempeño en servicio. Teniendo presente que existe un amplio rango de aceros, fueron seleccionados dos tipos de acero, los cuales poseen un comportamiento establecido en las características estáticas, dinámicas, y cotidianidad en la industria, que hacen parte del ejercicio habitual de selección de materiales y proceso de diseño de elementos o estructuras, y bajo el cual, los procesos de soldadura generan una variación de este comportamiento dependiente del proceso de soldadura aplicado. Esto permite generar un uso adicional a este estudio, de forma tal que el resultado de la investigación sirva de guía como proceso selector del método de soldadura a ejecutar. Se presentan las características generales con los nombres comercialmente aceptados para dichos materiales. Dentro del área experimental y para el desarrollo de las probetas de ensayo fueron seleccionadas láminas de espesor 4.5 mm en presentación comercial de 4'x8' pies (1.22 x2.44 metros). Es de acotar claramente que el estudio presenta un alcance como investigación, pero como objeto de estudio sus fronteras incluyen extender el análisis a mayor cantidad de materiales y procesos de soldadura.

3.1.1. Acero ASTM A36.

Este acero de bajo carbono es ampliamente utilizado en la industria manufacturera para construcción de estructuras industriales y civiles. Una inmensa variedad de perfiles se fabrica con este material que puede constituirse en parte de equipos motrices o bastidores inmóviles. En la

Tabla 5 se presenta la composición química de este material dada por el fabricante, en adición fue realizado ensayo de composición química por Optical Emission Spectrometry (OES, Espectrometría de emisión óptica o de arco y chispa) en el laboratorio GIMBA de la Universidad Industrial de Santander para ratificar los valores presentados. El reporte de este ensayo se adjunta en el anexo A.

Tabla 5

Composición química del acero ASTM A36

Fuente	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr
Especificación	0.26	--	0.04	0.05	0.4	0.30
Fabricante	0.15	0.30	0.14	0.07	0.14	0.35
Ensayo OES	0.143	0.369	0.033	0.0035	0.037	0.296

Nota: Datos de especificación adaptados de Standard Specification for Carbon Structural Steel ASTM A36/A36M -19.

La microestructura del ASTM A36 es una mezcla de perlita y ferrita que proporciona al acero una buena combinación de resistencia y ductilidad. La ferrita es una microestructura blanda y dúctil, mientras que la perlita es una microestructura más dura y resistente (Standard Specification for Carbon Structural Steel, 2005; Steels, 1990). Esta configuración microestructural también afecta su soldabilidad. La ferrita es más fácil de soldar que la perlita. Esto se debe a que la ferrita tiene un punto de fusión más bajo y es menos susceptible a la formación de carburos (H.M Cobb, 2012; Krauss, 2015).

3.1.2. Acero Inoxidable AISI 316L.

Es un acero inoxidable de la gama austenítica que exhibe excelentes condiciones de soldabilidad. El acero AISI 316L tiene amplia utilización en procesos de fabricación de elementos

estructurales y partes de máquina, extensamente empleado en la industria farmacéutica y de alimentos (G F Vander Voort et al., 2010). También su uso en aplicaciones de tuberías y elementos arquitectónicos, así como en dispositivos médicos y piezas de implante. Es un material que no admite transformación en los procesos de temple, y en procedimientos de soldadura (Reddy et al., 2010) disminuye su resistencia a la fatiga e incrementa la densidad de grietas. Posee como elementos aleantes principales el cromo, el níquel y el molibdeno (Woollin & Gooch, 1995; Wu et al., 2019). El cromo forma una capa superficial pasiva de óxido que inhibe la corrosión, siendo precursor de la ferrita en los procesos de soldadura, impidiendo la formación de carburos de hierro (Mathers, 2002; Ospina López et al., 2007). El níquel aporta en el material resistencia a la corrosión, a partir de la precursoión de la austenita en los procesos de soldadura, esto durante el enfriamiento rápido que se produce, ayudando en la estabilización de la fase austenítica (Iamboliev et al., 2003). Finalmente, el molibdeno mejora la calidad de la soldadura al aportar ductilidad, esto impidiendo las formaciones de fase martensítica por el enfriamiento acelerado de la soldadura (Suutala, 1983). Se presenta en la Tabla 6 la composición química con valores referenciales presentados en el estándar de fabricación (ASTM A240: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate , Sheet , and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, 2004), de igual forma los valores entregados en certificado de calidad del material y por último los datos reportados por ensayo de composición química por OES. Tanto el material base como el material de aporte se analizaron bajo la localización de modelos de cromo y níquel equivalentes para determinar su posición y posibles diluciones a partir del uso del diagrama de Schaeffler. Esto evitó la formación de fases indeseables por el uso de materiales de aporte que generarán desplazamiento del punto de dilución (Lippold & Kotecki, 2005; Singh, 2022).

Tabla 6

Composición química del acero AISI 316L

Fuente	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni
Especificación	<0.03	<2.0	<0.045	<0.03	<1.0	16.0-18.0	10.0-12.0
Fabricante	0.021	1.39	0.034	0.001	0.5	17.68	10.0
Ensayo OES	0.0020	1.45	0.0029	<0.0005	0.313	17.72	9.754

Nota. Datos de especificación adaptados de Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications ASTM A240/A240M -22a (ASTM A240: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate , Sheet , and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, 2004).

3.1.3. Materiales de aporte (electrodos)

Los materiales de aporte o relleno en el material de soldadura fueron seleccionados acorde a los procedimientos estipulados en los estándares adoptados para el proceso de soldadura. Esta selección fue realizada en coherencia con las composiciones químicas ofrecidas para juntas precalificadas de material similar al de base y por cuanto fueron emparejadas con el material de aporte disponible en el mercado comercial de material de aportes de soldadura, su composición química se presenta en el apéndice A con las fichas técnicas ofrecidas para cada producto, tanto en el rango del acero estructural de bajo carbono como para el acero inoxidable austenítico. El mecanismo de selección de estos materiales es presentado en el apartado de procesos bajo las condiciones que se siguieron para el cumplimiento normativo (American Welding Society (AWS), 2017, 2020). En la Tabla 7 se presentan los nombres comerciales para cada uno de los materiales de aporte y sus especificaciones.

Tabla 7

Materiales de aporte por proceso de soldadura por arco eléctrico y material base

Material base	Proceso de soldadura	Tipo de material	Denominación	Fabricante	Presentación
	SMAW	Electrodo de varilla	E7018	ESAB	Varilla 3.2 mm.
ASTM A36	GMAW	Alambre sólido	ER70S6	ESAB	Alambre 0.035 in.
	FCAW	Alambre con núcleo fundente	E71T-1C	ESAB	Alambre 0.045 in.
AISI 316L	SMAW	Electrodo de varilla	E316L-16	UTP Voestalpine	Varilla 3.2 mm.
	GMAW	Alambre sólido	ER316L	Böehler	Alambre 0.035 in.
	FCAW	Alambre con núcleo de fundente	E316LT1	Böehler	Alambre 0.045 in.

3.1.4. Consumibles utilizados en los procesos de soldadura

Al respecto de otros elementos de uso durante la aplicación de la soldadura se utilizaron piezas de consumo habituales de cada proceso, sin mayor cantidad de influencia. Entre estos elementos los líquidos denominados antispatter o anti-salpicadura para evitar la fijación de partículas de proyección sobre las superficies de metal base. También se usó el gel de refrigeración y lubricación de la antorcha para los procesos GMAW y FCAW durante todas las aplicaciones.

El gas de protección seleccionado presenta que para los rangos de aplicación no existe una influencia marcada sobre los resultados geométricos o de propiedades de los materiales de la soldadura. La mezcla fue seleccionada con 75% Ar y 25% de CO₂. La hoja técnica del gas utilizado se encuentra adjunta en el apéndice A. Adicionalmente los valores de flujo de gas oscilaron en rangos de 10 lpm a 20 lpm. Este rango basado en la literatura revisada que refiere una influencia

positiva en la penetración y geometría del cordón (Jonsson et al., 1995; Karadeniz et al., 2007; Mvola & Kah, 2017).

3.1.5. Procesos de soldadura por arco eléctrico

Los procesos de soldadura realizados corresponden a los planteados dentro del alcance del marco experimental. Con el propósito de obtener las probetas de los ensayos de pruebas mecánicas de carácter dinámico y estático, así como las evaluaciones microestructurales de las piezas. Estos procedimientos están basados en la exigencia de normativa para el tratamiento del material, para lo cual se tomó como fuente principal de información los estándares AWS D1.1-20 (American Welding Society (AWS), 2020) para el acero estructural ASTM A36 y el AWS D1.6-17 (American Welding Society (AWS), 2017) para el acero inoxidable AISI 316L. Fue desarrollado un algoritmo de ejecución para la consecución de los materiales de aporte, así como de los parámetros asociados al proceso y sugeridos por los estándares. Este algoritmo se anexa en el apéndice B. Este planteamiento de permitir la afectación sobre el material acorde a las condiciones estipuladas por la normativa genera que la investigación preserve su objetividad hacia el método de selección del proceso de soldadura. Descartando la búsqueda de los mejores parámetros de aplicación como objeto de estudio. Como consecuencia de esta acción, se escogieron juntas precalificadas acorde a los estándares mencionados de AWS, con materiales de aporte seleccionados bajo el procedimiento de la normativa y con parámetros de aplicación consecuentes al material a soldar y a los materiales de aporte escogidos. Estos parámetros son definidos en la Tabla 8, para los procesos en el material acero de bajo carbono ASTM A36 y en la Tabla 9 para los procesos aplicados en el acero inoxidable austenítico AISI 316L.

Tabla 8

Parámetros de proceso de soldadura por arco eléctrico para ASTM A36

Proceso de soldadura	Potencial [V]	Amperaje [A]	Polaridad	Flujo de gas [lpm]	Técnica de movimiento de la antorcha	Velocidad de avance [mm/min]
SMAW	62.50	95.00		No aplica		150.37
GMAW	24.40	185.00	DCEP	15.00	Arrastre	115.00
FCAW	22.90	219.00		10.00		150.00

Las condiciones del ambiente de aplicación fueron de un estándar de temperatura de 25 a 30 °C, una humedad relativa del 78% y una presión atmosférica de 1015 hPa que corresponden a los valores medios de las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bucaramanga en el laboratorio de manufactura de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander para el rango de fechas de 15 abril a 20 junio de 2021.

Tabla 9

Parámetros de proceso de soldadura por arco eléctrico para AISI 316L

Proceso de soldadura	Potencial [V]	Amperaje [A]	Polaridad	Flujo de gas [lpm]	Técnica de movimiento de la antorcha	Velocidad de avance [mm/min]
SMAW	63.00	99.00		No aplica		150
GMAW	22.50	130.00	DCEP	15.00	Arrastre	120.00
FCAW	23.60	220.00		10.00		150.00

La polaridad de los dos conjuntos de procesos se tomó como corriente directa y electrodo positivo DCEP, como sugieren varios autores para los procesos de soldadura por arco eléctrico de

este trabajo (Park et al., 2013; Phillips, 2016; Sailabaht et al., 2018). Esto debido a los modelos de deposición de material y al gradiente de temperatura generado, que influyen en forma positiva en la formación y tamaño de la microestructura de las zonas presentes. Asimismo con la polaridad DCEP se espera estabilidad del arco durante la aplicación y una mejora de la penetración, comparados con la aplicación de la polaridad DCEN. Los formularios de especificaciones del proceso de soldadura o WPS que se mencionan en la sección final del algoritmo planteado compilan la información general de la aplicación para cada proceso y material. En el apéndice B se anexan los WPS para cada material y cada proceso. La Figura 11 presenta parte de la aplicación de soldadura desarrollada para los procesos GMAW y FCAW con un sistema de arrastre mecanizado sobre las láminas. Para el cual se regularon las velocidades de avance y los arcos de oscilación de la antorcha. Esto permitió generar las láminas soldadas previo a la operación de corte para la consecución de las probetas de los diferentes ensayos.

Figura 11

Montaje de aplicación de soldadura mecanizada



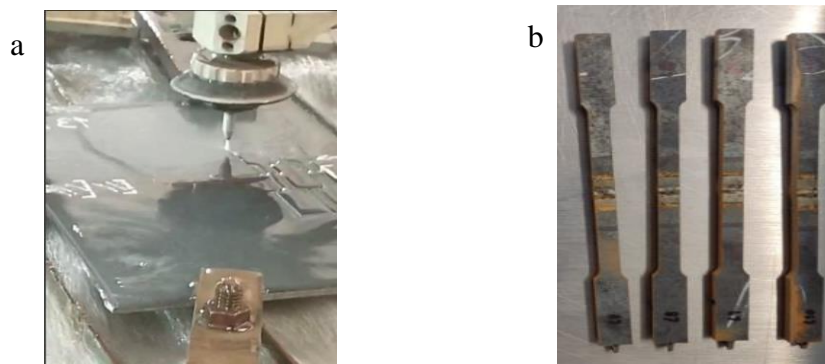
Nota: Equipo mecanizado de aplicación para procesos GMAW y FCAW.

3.2. Otros procesos

De forma complementaria fueron considerados todos los sistemas de corte. De tal manera que no generarán una afectación térmica sobre el material. Este fenómeno fue tenido en cuenta para la obtención geométrica de las probetas de ensayo. Se incluyó desde la preparación de láminas para la aplicación de cada proceso de soldadura, así como sobre las láminas soldadas desde donde fueron obtenidas las probetas para cada prueba mecánica o metalográfica. Sobre estas necesidades se aplicaron métodos como el cizallamiento mecánico con sistemas hidráulicos y corte por sistema de chorro de agua. Estos sistemas de corte evitan transformaciones o variaciones metalúrgicas que modifiquen lo generado por los procesos de soldadura aplicados (Bartels & Samuels, 1972). En la Figura 12 se aprecia una parte de la operación de corte por chorro de agua o waterjet cutting y las probetas para ensayos mecánicos extraídas de las láminas cortadas.

Figura 12

Obtención de probetas soldadas



Nota: Corte por chorro de agua a), probetas cortadas de tracción b).

A lo largo de la aplicación de los procesos de soldadura se revisó el cumplimiento de restricciones impuestas en los requisitos de calidad mencionados en los apartados 7.20 a 7.23 de la norma AWS D1.1-20 para el acero estructural y en los apartados 7.8, 7.9, 7.14 y 7.15 de AWS

D1.6-17 para el acero inoxidable. Estos requisitos mencionan las tolerancias y desalineamientos máximos permitidos en una junta. De igual forma, la defectología interna al respecto de los tamaños y concurrencia de porosidades. Una vez terminadas las aplicaciones, la morfología de las juntas soldadas fue verificada por modelos de inspección visual y medición de galgas aplicando el apartado 8.9 de las dos normas constructivas AWS D1.1-20 (American Welding Society (AWS), 2020) para el acero estructural ASTM A36 y el AWS D1.6-17 (American Welding Society (AWS), 2017) para el acero inoxidable AISI 316L, que mencionan modelos de aceptación sobre inspección visual.

3.3. Ensayos mecánicos y evaluación microestructural

Los ensayos desarrollados fueron aplicados en orden a establecer el nivel de afectación en los materiales generado por las soldaduras. La secuencia de aplicación se describió en la Figura 10. De tal manera que una evaluación microestructural de las probetas permitió establecer los cambios producidos por los procesos de soldadura por arco eléctrico en los materiales. En forma consecutiva los ensayos estáticos y dinámicos de los materiales fueron realizados. Finalmente, revisiones de fractografía se efectuaron para validar los modelos de falla, así como determinar los puntos de nucleación de grietas y zonas de fractura, en específico en los ensayos de fatiga. En los siguientes apartados se presenta la configuración de probetas, normativas y procedimientos seguidos para establecer los valores aplicados en los ensayos que permitieron su realización.

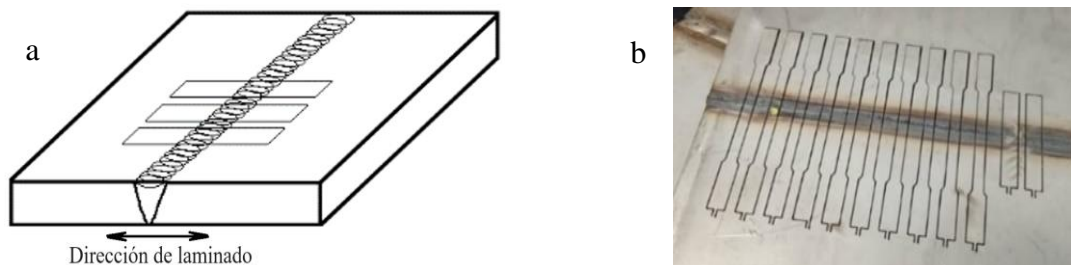
3.3.1. Caracterización microestructural de juntas soldadas

El desarrollo de esta caracterización se basó en la observación bajo diversos microscopios ópticos de la microestructura de las piezas, y la posterior comparación de estas con los patrones de fases presentados en la bibliografía. También se realizaron análisis selectivos de fractografía para las probetas de fatiga una vez fueron falladas. Los especímenes fueron preparados acorde a tres

estándares diferentes. La ASTM E3-11 como referencia para la preparación de superficie. La AWS B4.0-2007 que determina los procedimientos especificados de corte para obtención de las muestras sin generar cambios microestructurales. Por último, la norma ASTM E407-07 para aplicar el ataque químico y revelar las microestructuras obtenidas. Al respecto de la extracción de probetas la Figura 13 muestra la zona de extracción respetando lo indicado en el estándar AWS B4.0 (Standard Methods for Mechanical of Welds, 2000).

Figura 13

Zona de extracción de muestras para ensayos de las placas soldadas



Nota: Localización del corte a), Lamina cortada b).

Posteriormente se realizó la preparación de superficie por medio de desbaste con las diferentes granulometrías de papel abrasivo clasificados bajo norma ANSI/CAMI (Coated Abrasive Manufacturers Institute) y concluyendo con la pulida de superficie con disco de paño y abrasivo de alúmina Al_2O_3 de una micra. Finalmente, con el propósito de revelar la estructura de los materiales se aplicó un ataque químico, el cual consistió para el acero de bajo carbono ASTM A36 con el reactivo Nital, al 2%, y para el acero inoxidable austenítico AISI 316L con reactivo Pycral. Las composiciones químicas se presentan en la Tabla 10. A las piezas a las cuales se les realizó fractografía de los ensayos de fatiga, la superficie fue tratada con procesos de limpieza con acetona y ultrasonido, así como enjuague con etanol y secado con aire a presión.

Tabla 10

Composición química de líquidos de ataque para probetas metalográficas

Material	Reactivo según ASTM E407	Composición química	Procedimiento
		1-5 (2) ml de HNO ₃	Inmersión por 2 a 5 segundos
ASTM A36	#74	100 ml etanol al 95%	Lavado con etanol Secado con aire a presión
SAE AISI 316L	#80	5 ml HCl 1 g ácido pícrico 100 ml Etanol al 95%	Inmersión por 2 a 5 segundos Lavado con etanol Secado con aire a presión

Nota: Tomado de Standard Practice for Microetching Metals and Alloys ASTM E407-07, pág. 3 y 11.

Acerca de la determinación del tamaño de grano en la ZAC, a pesar de que se reconoce claramente a partir de las micrografías se adaptó lo descrito en la norma ASTM E112-13 para el procedimiento denominado método de intersección lineal o de Heyn (George F. Vander Voort, 1993). Fueron tomadas micrografías a 100x de la zona de interés y se trabajó con el software libre Image J (<https://imagej.net/>), permitiendo utilizar la Ecuación 8.

Ecuación 8: Determinación del diámetro promedio de grano a través del método de Heyn.

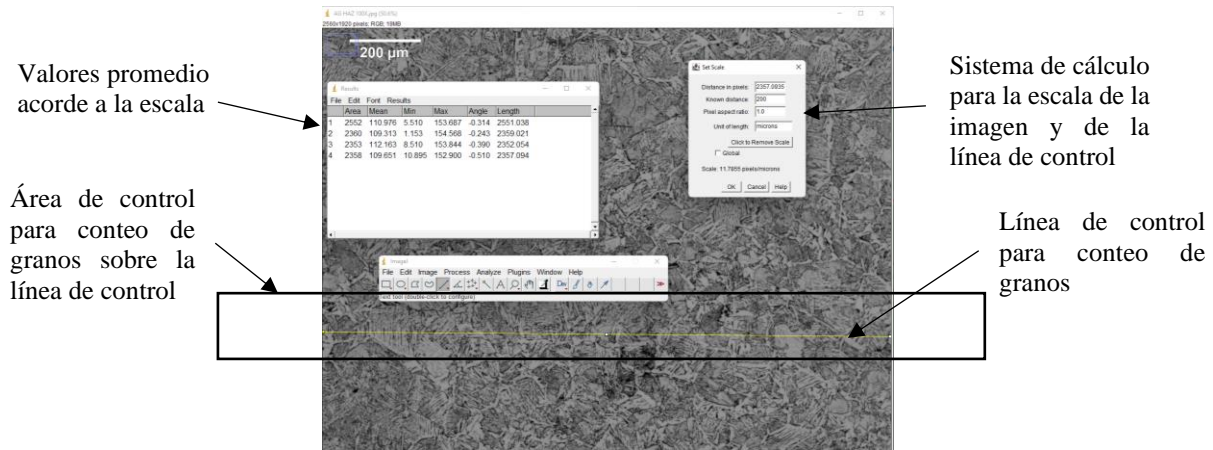
$$Diametro\ promedio\ de\ grano = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\# de\ granos\ interceptados}{longitud\ de\ la\ línea\ de\ intersección} \right)_i$$

Se aplicaron cuatro campos lineales por probeta a lo largo de toda la región de la ZAC para el conteo de granos y se calculó el diámetro promedio a través de la Ecuación 8, el cual permite clasificar el tamaño de grano bajo estándar ASTM acorde a la Tabla 4 de la norma ASTM E112-13. La Figura 14 presenta la micrografía trabajada para el material ASTM A36 bajo el proceso GMAW y bajo la cual fueron estimados los valores de tamaño de grano G de acuerdo con la

clasificación ASTM E112-13, los cuales se presentan en la sección de resultados y permiten establecer relación con el comportamiento de los materiales.

Figura 14

Medición de diámetro promedio de grano en micrografía a 100x



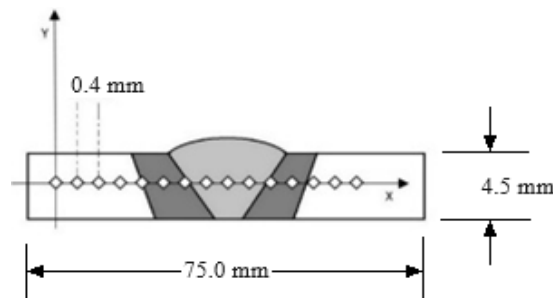
3.3.2. Ensayos mecánicos estáticos

Ensayo de microdureza

El desarrollo del ensayo se ejecutó en el equipo microdurómetro Bruker UMT Tribolab de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Para este ensayo, se trazó un modelo de perfil lineal sobre una línea central imaginaria de la probeta como se muestra en la Figura 15 cuyas medidas están en milímetros.

Figura 15

Probeta de microdureza y localización de indentaciones



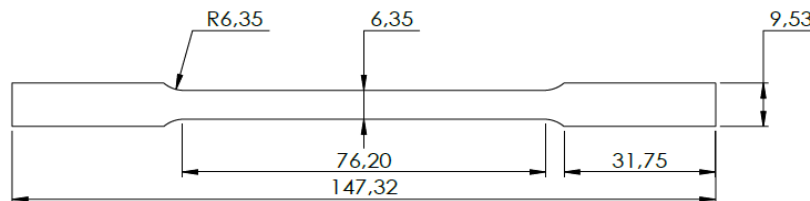
La probeta fue debidamente preparada bajo los estándares de las normas ASTM E3-11/17 y ASTM E384-17, llevando la superficie del material por procesos de lijado manual bajo el estándar ANSI de papel abrasivo desde numero 80 hasta 1200. Posteriormente puliendo en disco de paño con abrasivo de alúmina de una micra, como es sugerido en el apartado 11 de la norma. La microdureza en escala Vickers fue la tomada sobre las probetas. Sobre el espaciado de los puntos de evaluación se contempló el distanciamiento sugerido en el apartado 8.13 de la norma ASTM E384-17, considerando un valor de 0.4 mm de espaciado entre un punto y otro, superando el valor de 2.5 veces la diagonal obtenida. La carga aplicada fue de 500 gramos fuerza y el tiempo de sostenimiento fue de 10 segundos para cada punto, cumpliendo lo indicado en la norma (ASTM, 2016).

Ensayo de tracción

La aplicación de este ensayo se desarrolló en el equipo MTS Bionix modelo 307.02 axial de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Se prepararon las probetas acordes a la norma ASTM E8/E8M-13. La Figura 16 muestra el plano de la probeta usada.

Figura 16

Plano de probeta de tracción



Nota: Medidas en milímetros. Adaptado de Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (pág. 4 y 11), (ASTM Standard E8/E8M-13a, 2013).

La medición de los desplazamientos se realizó con el sistema de extensómetro laser MTS con los datos enlazados al software MTS Multipurpose®. La velocidad de trabajo para la prueba

se calculó a partir de la norma ASTM E8/E8M-13. Esto proveniente del rango de 0.05 a 0.5 mm/mm de la longitud de la sección paralela reducida. En este caso 76.20 mm, tomando como valor 4 mm/mm para la velocidad de deformación en todos los ensayos.

Los datos obtenidos de la prueba fueron revisados al amparo de la sección 7.7 de la norma ASTM E8/E8M-13, en la cual se estipula el método offset para los cálculos de esfuerzo de fluencia. La Figura 17 presenta el montaje realizado para la prueba.

Figura 17

Montaje de ensayo de tracción



Nota: Vista general del montaje del ensayo de tracción realizado con extensómetro láser de medición.

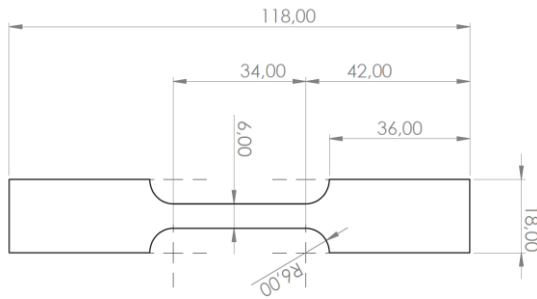
3.3.3. Ensayo dinámico de fatiga

Para la aplicación de este ensayo se siguió la normativa de la ASTM E606-21 que rige la ejecución bajo control de la deformación (Vietanti et al., 2021). En primera instancia los valores máximos de esfuerzo contemplados para determinar el comportamiento de los materiales afectados

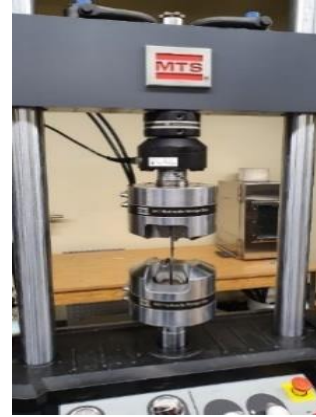
por los procesos de soldadura estuvieron seleccionados en rangos cercanos al esfuerzo de fluencia y con disminución de 5% para cuatro niveles, 95%, 90%, 85% y 80%. Esto con el objetivo de obtener puntos válidos para el trazado de las curvas de comportamiento. Se seleccionaron estos rangos por permanecer cercanos al valor del esfuerzo de fluencia, siendo este un valor crítico para los procesos de diseño. Para cada nivel de esfuerzo fueron ensayadas cinco probetas con el propósito de encontrar valores de ciclaje que dictaminen el comportamiento y reduzcan la dispersión de datos habitual en los ensayos de fatiga. La relación de carga fue establecida con un rango de $R = 0.1$, dando a los ensayos la connotación de aplicación de carga en esquema tracción - tracción. Este valor de carga es similar al que podría generarse en esquemas donde se considera el valor del peso del elemento al que se somete a carga con un 10% del valor total designado a este peso y el restante a la carga activa a la que es sometido. El tratamiento de datos se trabajó bajo la norma ASTM E739-23 que presenta un manejo de datos en escalas aritméticas a partir de tener como variables principales el valor de esfuerzo y el logaritmo de la cantidad de ciclos resistivos. La frecuencia de aplicación de carga fue programada en 30 Hz. El anclaje de las piezas fue realizado con valores de 700 psi a 1000 psi. La preservación de los datos fue realizada configurando de manera anticipada ensayos de afinación sobre los equipos para realizar los ajustes a las variables PID del controlador de máquina. La condición del ensayo presentó un modelo de ciclaje medio de promedio de rangos de 10^5 ciclos. Los ensayos fueron aplicados en los equipos MTS Bionix modelo 370.02 de la Universidad Industrial de Santander y MTS Landmark modelo 370.25 de la École de Technologie Supérieure de Montreal. En la Figura 18 se pueden apreciar el montaje realizado en los equipos y la probeta estándar de norma.

Figura 18

Ensayo dinámico de fatiga



a)



b)

Nota: Probeta estándar medidas en milímetros a), Montaje de ensayo de fatiga en máquina MTS de ÉTS Montreal b).

Para esta deformación se tuvo presente la consideración bajo la cual, cada material al que se le aplicó un proceso de soldadura diferente generó un valor de esfuerzo de fluencia, así como una deformación unitaria asociada, como se ratifica en la sección de resultados para los ensayos de tracción. Esto originó que el rango de deformación de cada material fuera específico y se programó el ensayo para obtener una oscilación del rango de deformación. Adicionalmente se procesaron los parámetros PID en el proceso de ajuste de las máquinas usadas, esto con el propósito de preservar la relación de carga de $R = 0.1$, propuesta para el ensayo.

4. Resultados y discusión

La presentación de resultados permitió realizar el comparativo de los resultados del comportamiento obtenido sobre los materiales en los diversos procesos de soldadura por arco eléctrico, así como la discusión de estos resultados a través de la descripción de los fenómenos ocurridos, justificando su desempeño. La secuencia de resultados se da en orden por cada material y en forma simultánea de los tres procesos de soldadura realizados, acorde a la matriz experimental.

4.1. Análisis metalográfico

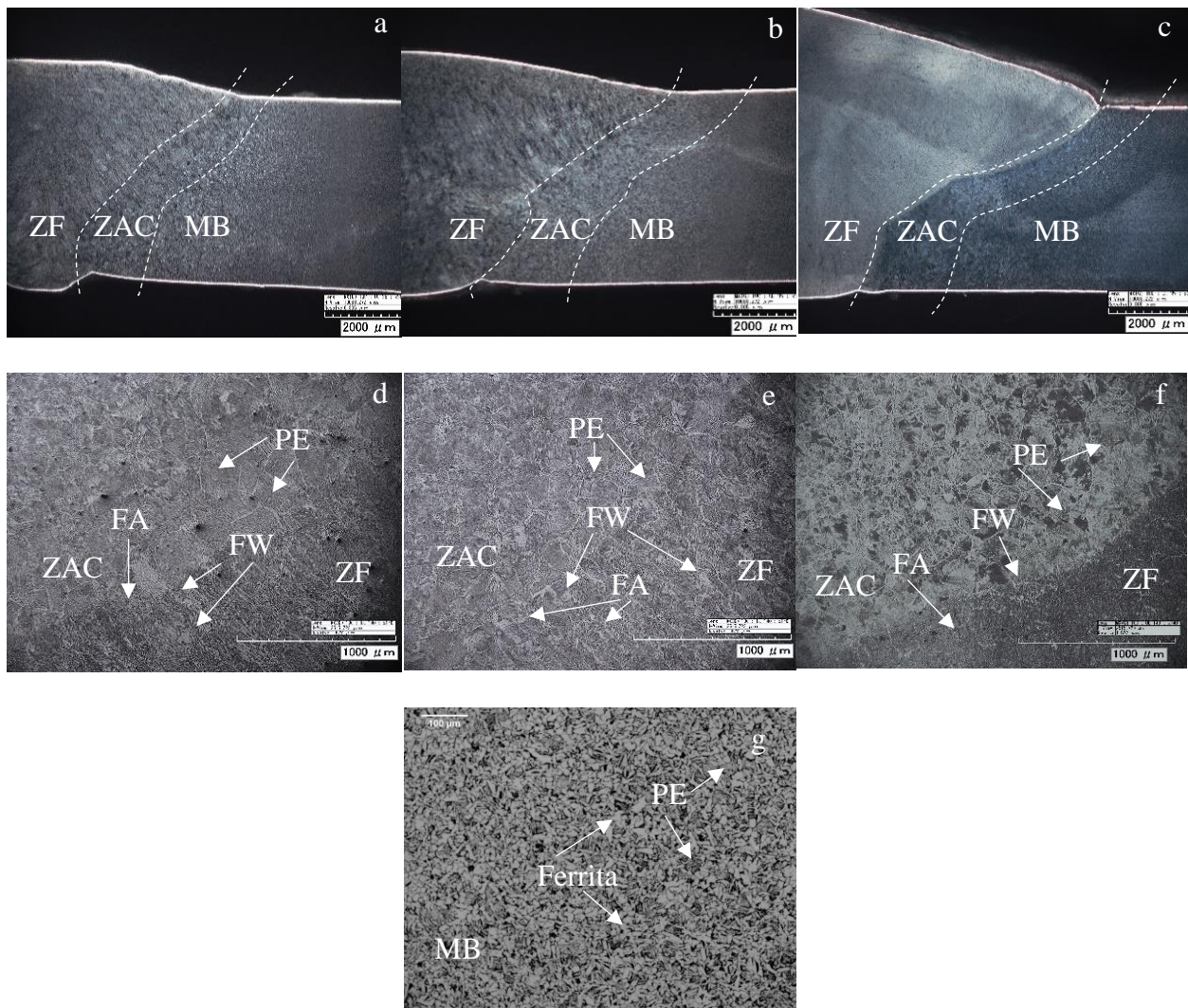
Los resultados presentados permiten visualizar las microestructuras generadas, así como la determinación del tamaño de grano a partir de la adaptación de la norma ASTM E112-13 (ASTM, 2010). Se exhiben micrografías del perfil general de cada probeta, tomadas con microscopio confocal del laboratorio del grupo de investigación GIMAT de la Universidad Industrial de Santander. Se distinguen en cada imagen las tres zonas demarcadas, el metal base MB, la zona afectada por calor ZAC y la zona de fusión ZF donde se depositó el material de aporte. Enseguida son presentadas la micrografías de la zona de interés conformada por la ZAC y la ZF. En la Figura 19 y la Figura 21 se encontraron algunas fases que predominan sobre la estructura formada. La fase ferrítica alotriomórfica o de crecimiento columnar denominada FA, la fase de ferrita Widmanstätten en crecimiento acicular FW, y formaciones de perlita identificadas como PE. En la revisión de la microestructura para el material AISI 316L se encontraron crecimientos de austenita dendrítica AD, formaciones de crecimiento epitaxial CE, así como maclas de orientación cristalográfica de granos MA ya existentes en el material base y la ZAC. Esta designación se ubicó en todas las micrografías mostradas en adelante. En las Figura 19.d), e), f), y g) y Figura 21.d), e), f), y g) se presentan micrografías tomadas a las áreas de interés, así como el resultado obtenido del tamaño de grano.

4.1.1. Análisis microestructural en ASTM A36

La Figura 19 muestra imágenes de las micrografías obtenidas del metal base y también para cada uno de los procesos de soldadura aplicados sobre este material.

Figura 19

Micrografías de procesos de soldadura en ASTM A36



Nota: Juntas soldadas de ASTM A36 con procesos de soldadura por arco eléctrico a 35x. SMAW a), GMAW b), FCAW c). Transiciones de zona de fusión a zona afectada por calor a 140x. SMAW d), GMAW e), FCAW f). Metal base A36 a 200x g).

En la Figura 19.a), b), y c) se presentan los perfiles generales obtenidos para el material ASTM A36 bajo los procesos de soldadura SMAW, GMAW y FCAW respectivamente, donde se pueden apreciar las zonas habituales de una junta soldada, demarcadas por líneas blancas e identificadas gracias al macroataque superficial ejecutado sobre las probetas. Se distingue la sobremonta de la soldadura con una pronunciación mayor en el proceso FCAW, esto debido a que las tres figuras poseen los mismos aumentos, sin embargo todas fueron verificadas bajo el cumplimiento geométrico establecido en los apartados de calidad 7.20 a 7.23 de la norma AWS D1.1:20. La medición del tamaño de grano que se describió en la sección metodológica arrojó los valores que se presentan en la Tabla 11, y bajo los cuales puede generarse el análisis y discusión presentados a continuación.

Tabla 11

Tamaños de grano G en la ZAC para juntas soldadas en ASTM A36

Proceso	Diámetro promedio [μ]	Rango de selección	Tamaño de grano N° G
SMAW	170.22	165.30 – 179.60	2.0
GMAW	112.96	116.9 – 127.0	3.0
FCAW	106.76	106.8 – 116.9	3.5

Las diferencias morfológicas encontradas se correlacionaron con el desempeño en las pruebas mecánicas. Como se comentó en la fase metodológica, fueron desarrolladas en dos de los tres procesos aplicaciones semiautomáticas que replicaron de manera coherente los valores establecidos para los avances de la fuente de calor, alturas del material de aporte y velocidad de alambre. El proceso SMAW fue aplicado por personal calificado tratando de preservar su homogeneidad y variando únicamente sus parámetros dentro de lo establecido en norma y por el

fabricante de materiales de aporte. Múltiples factores establecidos para cada uno de los procesos y determinados durante la sección de metodología pueden influir en la generación de esta morfología, diferente en cada proceso de soldadura. Diversos autores concuerdan en este hecho (Hrabê et al., 2009; Hwang et al., 2017; Joseph et al., 2005; Noor et al., 2014). Se analiza a partir de aquí las microestructuras detectadas por zonas del material.

Zona de fusión o ZF

Se observan en la parte inferior derecha de las Figura 19.d), e) y f) las micrografías para la zona de fusión del material ASTM A36 con los tres procesos de soldadura por arco eléctrico. Esta zona de fusión representa el material depositado que a partir del proceso de selección realizado para los materiales de aporte, permite establecer una composición química similar y propiedades mecánicas preferentemente superiores al material base. La morfología de crecimiento de grano dentro de las inspecciones realizadas difiere en cada proceso. La Figura 19.d) muestra la micrografía de la zona de fusión para el proceso SMAW, la cual exhibe evidencia de fase ferrítica en dos de sus morfologías: ferrita alotriomórfica en crecimiento columnar FA y ferrita Widmanstätten FW en crecimiento acicular, siendo esta predominante ante las colonias de perlita fina, presentes igualmente en la zona. Detalles con mayor aumento de esta zona y para cada material pueden visualizarse en el anexo C de este documento.

La Figura 19.e) presenta la zona de fusión del proceso GMAW. En esta imagen se evidencia una menor cantidad de ferrita alotriomórfica que la presente en el proceso SMAW, mientras que la ferrita Widmanstätten constituye esta zona en mayor cantidad.

En la Figura 19.f) se enseña la zona de fusión para el proceso FCAW, que posee presencia dominante de ferrita alotriomórfica en mayor cantidad que los procesos ya mencionados de SMAW y GMAW. Igualmente su tamaño de grano más fino es notable.

Este mismo grupo de figuras muestra la zona de transición de la zona de fusión ZF y la zona afectada por calor ZAC. La cual presenta un cambio en la morfología del crecimiento de grano, así como en el modo de transformación de la ferrita durante el enfriamiento.

Zona afectada por calor o ZAC

En la parte superior izquierda de las Figura 19.d), e) y f) se observa la zona afectada por calor para el material ASTM A36 por diversos procesos de soldadura a un valor de 140x.

El tamaño de grano es comparable a partir de los datos presentados en la Tabla 11, lo que permite establecer una morfología que en los ensayos mecánicos puede ser conducente a justificar su desempeño, como lo mencionan varios autores (Fitri et al., 2021; Irfan & Achwal, 2014; Mupoperi & Pita, 2022). Este aumento de tamaño de grano existe con mayor presencia en el área más cercana a la zona de fusión. A su vez, posee ferrita Widmanstätten FW en menor cantidad que la ZF y posee igualmente colonias de perlita. El tamaño de grano disminuye a medida que este es más cercano al material base. El tamaño de la ZAC fue medido en tres probetas para cada uno de los procesos de soldadura dando como resultado una medida superior promedio de 2.76 mm y su medida inferior se encontró aproximadamente en 1.56 mm para el proceso SMAW.

En el proceso GMAW el tamaño de grano fue menor que el correspondiente a la ZAC del proceso SMAW, constituida por las mismas fases ya mencionadas bajo esta técnica de soldadura. El tamaño máximo promedio de la ZAC medido sobre tres probetas en el proceso GMAW fue de 2.76 mm y su tamaño mínimo fue de 0.861 mm. La Figura 19.e) muestra esta zona más pequeña que la del proceso SMAW mostrada en la Figura 19.d) al mismo nivel de aumentos de 140x.

En la Figura 19.f) se presenta la zona afectada por calor para el material ASTM A36 bajo el proceso FCAW, esta área muestra aumento del tamaño de grano en el límite entre la ZF y la ZAC y disminución de este a medida que se aleja de la ZF, teniendo como longitud máxima

promedio afectada de 2.005 mm y longitud mínima promedio afectada de 1.341 mm. La medición se realizó sobre tres probetas.

Zona de metal base o MB

Correspondiente al acero ASTM A36 ya descrito en la sección 3.1.1 su morfología es representativa de los aceros de bajo carbono del tipo estructural. En la Figura 19.g) se exhibe una constitución de matriz ferrítica FF identificada por su tono claro, con presencia de colonias de perlita fina reconocible por su tonalidad oscura FP.

Las distancias que logran generarse de zona afectada por calor ZAC varían en cada proceso. Aun cuando esta situación puede atribuirse a condiciones como la composición química de los fundentes o los materiales de aporte o de gas de protección utilizados en cada proceso, como otros autores lo mencionan (Huang, 2010; Khamouli et al., 2016; Kil et al., 2017; Yuwono et al., 2022). Es influyente también la condición de entrada de energía, la cual es presentada en la Tabla 12. Los valores presentados fueron calculados a partir de los parámetros mencionados en la Tabla 8 y la Ecuación 1 de este documento.

La Figura 20 muestra los tamaños promedio medidos de la ZAC en cada proceso de soldadura aplicado a este material. De manera similar la morfología que presentó el tamaño de grano en comparativa con las zonas aledañas se modificó a pesar de presentar las mismas fases ferríticas y perlíticas.

Figura 20

Tamaños promedio de ZAC en ASTM A36 según el proceso de soldadura

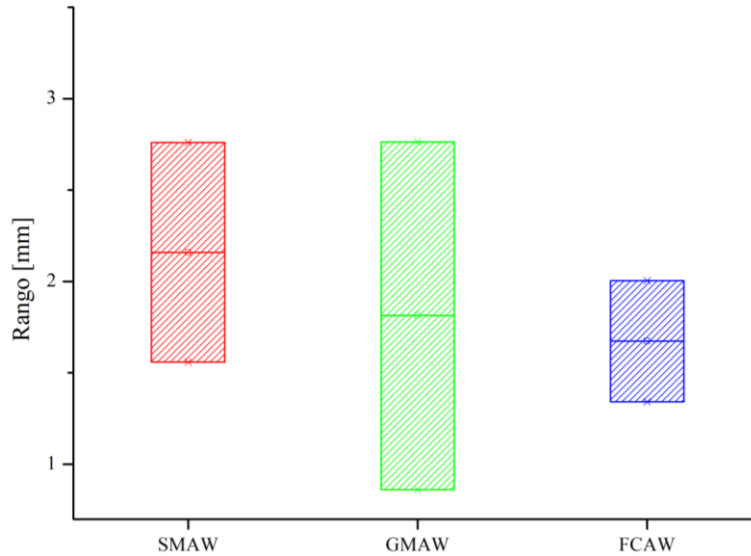


Tabla 12

Entrada de energía HI en procesos soldadura para ASTM A36

Proceso	Potencial [V]	Corriente [A]	Avance [mm/min]	Entrada de energía HI [J/mm]	Tasa de enfriamiento Te [°C/s]	Tiempo de solidificación Ts [s]
SMAW	62.5	95	150.37	2369.16	206.74	1.53
GMAW	24.4	185	115	2355.13	207.97	1.52
FCAW	22.9	219	150	2006.04	244.16	1.29

La entrada de energía generada muestra un valor más elevado en el proceso SMAW, seguido del proceso GMAW y finalmente, el proceso FCAW. Estos valores presentan una relación directa con el tiempo de solidificación así como con las transformaciones en estado sólido, al afectar la velocidad de enfriamiento, esto considerando que ofrece mayor cantidad de energía, es

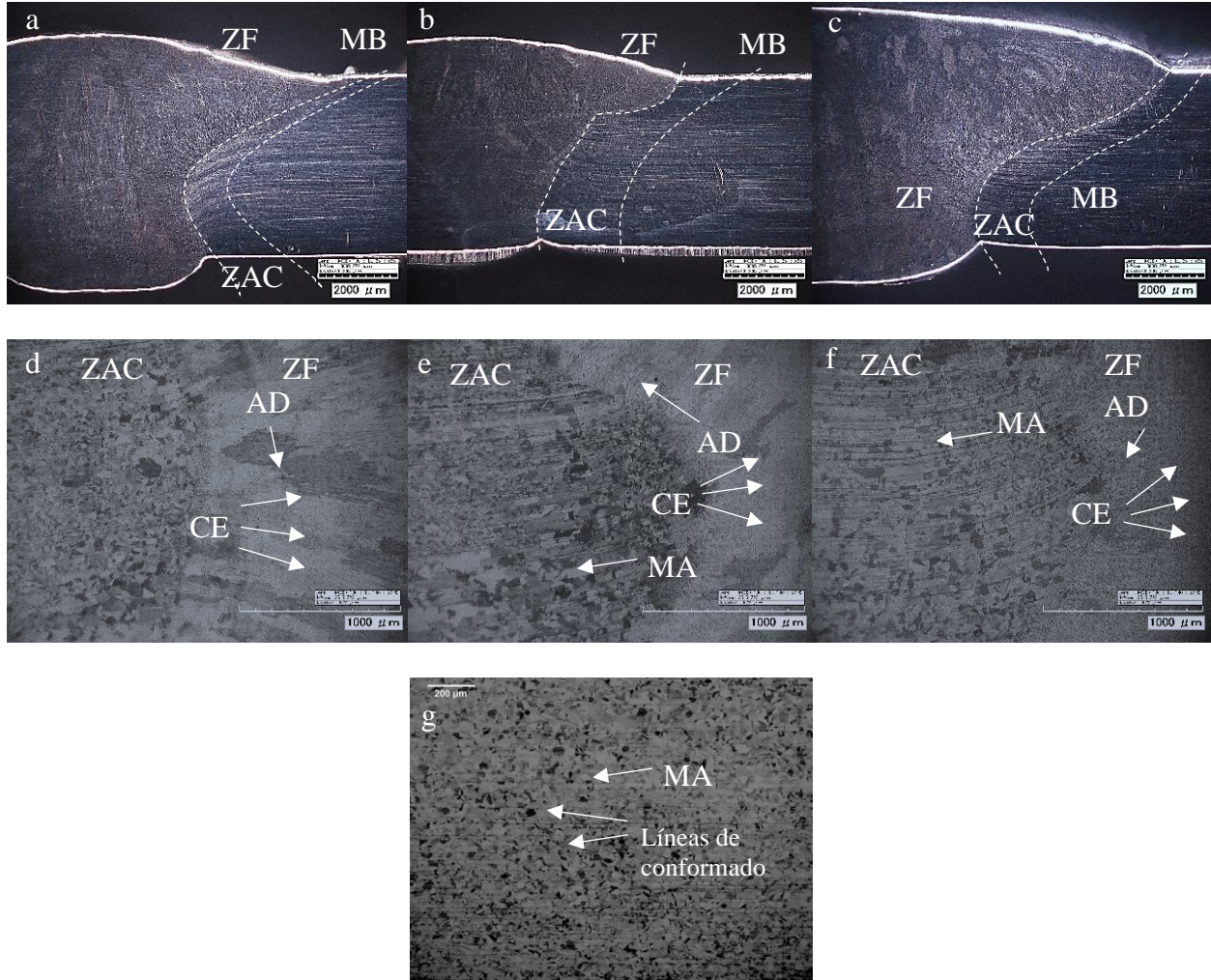
consecuente que el material tarde más tiempo en solidificar acorde a la Ecuación 4. De forma contraria, la tasa de enfriamiento es una función inversa de la entrada de energía según la Tabla 12, y al contemplar que es un valor transiente, su magnitud refleja un enfriamiento más acelerado en el proceso FCAW, posteriormente el GMAW y finalmente el SMAW, condiciones bajo las cuales la formación microestructural y el tamaño de grano son generados.

4.1.2. Análisis microestructural en AISI 316L

Igual tratamiento se realizó para el material acero inoxidable AISI 316L, del cual las micrografías se presentan en la Figura 21. Fue objetivo de este estudio preservar los parámetros y las condiciones de aplicación de soldadura estables a través del equipo semiautomático. Para este propósito se trabajó con la norma constructiva AWS D1.6-17 (American Welding Society (AWS), 2017). Siguiendo los lineamientos para la selección de materiales de aporte y valores de los parámetros de soldeo. La aplicación de soldadura SMAW se realizó de forma manual con personal calificado. Se verificaron los cumplimientos de los apartados de calidad 7.8 y 7.14 de la norma. Las micrografías presentadas en la Figura 21 muestran las siglas mencionadas en el inicio de este capítulo como descripción de las fases halladas, las cuales fueron predominantemente austeníticas y se pudo distinguir su modelo de crecimiento en la zona de fusión.

Figura 21

Micrografías de procesos de soldadura en AISI 316L



Nota: Juntas soldadas de AISI 316L con procesos de soldadura por arco eléctrico a 35x. SMAW a), GMAW b), FCAW c). Transiciones de zona de fusión a zona afectada por calor a 140x. SMAW d), GMAW e), FCAW f). Metal base AISI 316L a 100x g).

En la Tabla 13 se presentan para los procesos aplicados al material AISI 316L los tamaños de grano correspondientes, bajo el procedimiento estipulado en la sección de metodología.

Tabla 13

Tamaños de grano G en la ZAC para juntas soldadas en AISI 316L

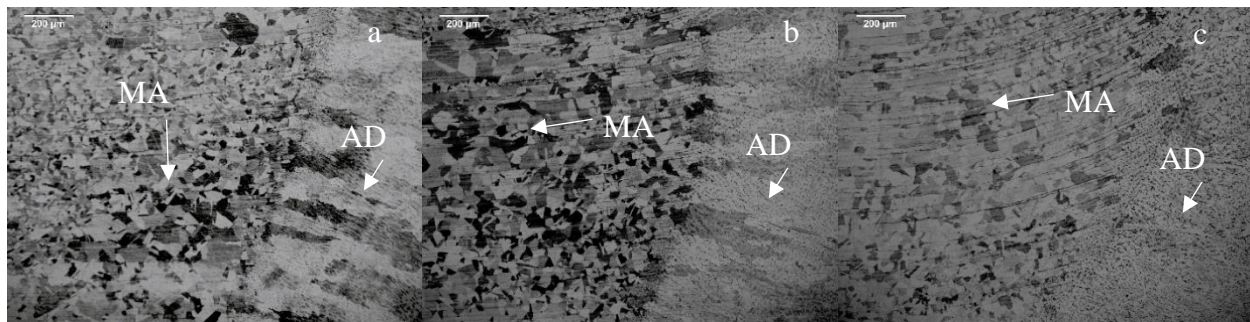
Proceso	Diámetro promedio [μ]	Rango de selección	Tamaño de grano N° G
SMAW	104.46	89.8 – 106.8	3.5
GMAW	80.59	75.5 – 89.8	4.5
FCAW	74.49	63.5 – 75.5	4.5

Zona de fusión o ZF

La Figura 22 muestra micrografías de la zona de fusión del material AISI 316L para los procesos de soldadura aplicados, y las cuales aparecen en el apéndice C con mayor aumento.

Figura 22

Zonas de fusión para AISI 316L a 100x



Nota: Zona de fusión en AISI 316L SMAW a), GMAW b) y FCAW c).

La morfología dendrítica columnar de la austenita presente en las Figura 22.a), b) y c) es típica de los aceros inoxidables austeníticos (Davis, 1998). La intensidad de las líneas dendríticas es atribuible en diversos autores a los elementos de aleación y a las condiciones de enfriamiento o sostenimiento de la temperatura crítica de austenización regulada entre 500 y 950 °C (Gregorutti et al., 2011; Iamboliev et al., 2003; Suutala, 1983). Esto fue verificado con los valores obtenidos

para tasa de enfriamiento y tiempo de solidificación, los cuales fueron calculados con los parámetros de cada proceso así como con propiedades térmicas del material obtenidas a través de la bibliografía disponible (Cengel, 2007), y se encuentran presentados en la Tabla 14, y finalmente, permitió la validación del crecimiento dendrítico más marcado en el proceso FCAW, influenciado fuertemente por la intensidad de corriente, en la cual FCAW posee un valor de 220 amperios, seguida por 130 amperios de GMAW y finalmente 99 amperios del proceso SMAW. Así el SMAW mostró un alto espaciado interdendrítico, y una baja definición de los brazos principales y secundarios de crecimiento dendrítico, esto a través de la comparación de imágenes realizadas, y que se adecua al valor de la tasa más baja de enfriamiento con 129.1 °C/s y el tiempo más alto de solidificación con 3.74 segundos.

Tabla 14

Entrada de energía HI en procesos soldadura para AISI 316L

Proceso	Potencial [V]	Corriente [A]	Avance [mm/min]	Entrada de energía HI [J/mm]	Tasa de enfriamiento Te [°C/s]	Tiempo de solidificación Ts [s]
SMAW	63	99	150	2494.80	129.09	3.74
GMAW	22.5	130	120	1462.50	220.20	2.19
FCAW	23.6	220	150	2076.80	155.07	3.11

De manera similar a lo revisado con el material ASTM A36, las variables presentadas en la Tabla 14 para la entrada de energía reflejan una influencia directa entre el valor de tiempo de solidificación y relación inversa con la tasa de enfriamiento. Como se mencionó anteriormente, las tasas de enfriamiento más altas no estimulan un crecimiento de grano mayor y tiempos de solidificación menores también incitan la formación de granos más pequeños (Kumar & Shahi,

2011; Mohammed et al., 2017). Estas dos premisas se reafirman con los resultados de la Tabla 13 donde se observan tamaños de grano G en los procesos FCAW y GMAW menores a los del proceso SMAW, reflejando así diámetros promedio de grano menores para los procesos FCAW y GMAW en comparación con los del proceso SMAW. Aun cuando el valor de tamaño de grano G para FCAW y GMAW se presenten con el mismo valor, también se pudo determinar de este análisis que el tamaño de diámetro medio es menor en FCAW que en el proceso GMAW, relacionando esto con los valores de intensidad de corriente más altos en el proceso FCAW. Esto tiene una significancia que se vuelve relevante en el comportamiento del material. Al atribuir condiciones de dureza más elevadas en FCAW que en los dos procesos restantes como se presenta en la sección siguiente en los ensayos de microdureza.

Zona afectada por calor o ZAC

Sobre la parte izquierda de las Figura 21.d), e) y f) se observa la zona afectada por calor o ZAC de los tres procesos de soldadura aplicados al material AISI SAE316L. En el mismo orden para SMAW, GMAW y FCAW. Puede concluirse que las medidas de la ZAC tomadas en tres probetas para cada proceso para el acero AISI 316L son menores que para el material ASTM A36, esto consecuente con el trabajo de varios autores (David et al., 2001; Shankar et al., 2003). Los tamaños para la ZAC del proceso SMAW oscilaron desde 1.24 mm y hasta 0.919 mm. Para el proceso GMAW la microestructura evidenciada en la ZAC presenta igualmente granos austeníticos equiaxiales de distribución medianamente uniforme más pequeños que en SMAW y con evidencia de maclas que disminuyen su tamaño a medida que se alejan de la ZF. El tamaño de esta zona ZAC fue de 2.45 mm como promedio de medida superior y 0.791 mm como promedio de medida inferior. Finalmente, para el proceso FCAW se obtuvo una morfología similar compuesta por el mismo tipo de granos, siendo más finos que los de GMAW acorde a la

clasificación realizada y con presencia de maclas desde la zona inferior hacia la superior del cordón. El tamaño de ZAC en FCAW fue de 1.55 mm como promedio de medida superior y 0.726 mm como promedio de medida inferior.

Zona de metal base o MB

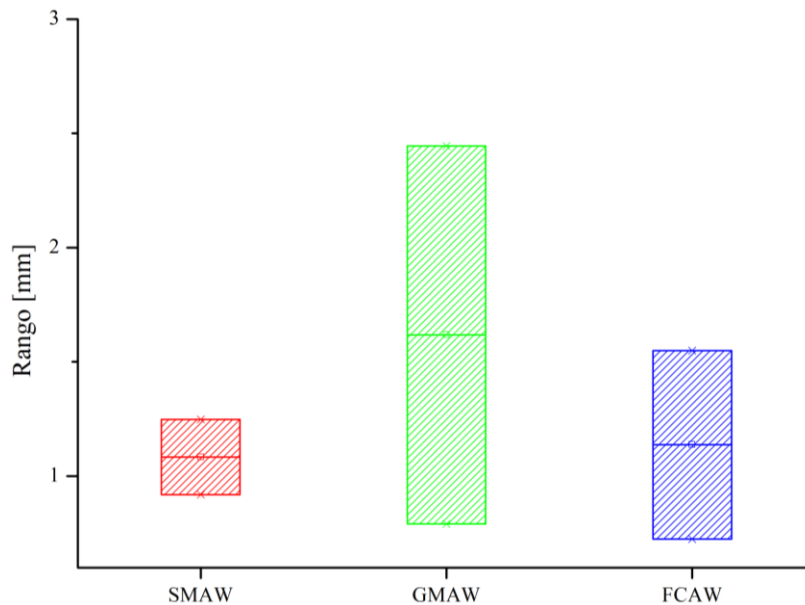
En la Figura 21.g) se observa una micrografía a 100x del material base correspondiente al AISI 316L descrito en la sección 3.1.2 de este documento. Del cual puede identificarse que el material base está constituido por granos equiaxiales de austenita con presencia de maclas. La micrografía permite inferir el conformado en frío para la obtención de superficie, debido a la orientación preferencial que se observó de los granos (G F Vander Voort et al., 2010).

La diferencia general presentada en las distancias de la zona afectada por calor o ZAC así como los diferentes tipos de tamaño de grano presentes tienen igual diversidad de factores a los que se les atribuye esta situación. Uno de los factores predominantes mencionados en la literatura es la relación G_0/R , el cual tiene influencia en el tipo de morfología y de crecimiento que se genera en la estructura. En esta relación G_0 corresponde al gradiente de temperatura y R a la tasa de crecimiento del frente de solidificación en la zona de fusión (David et al., 2003). Como se mencionó anteriormente dicho cociente influye directamente en los tipos de crecimiento que pudieran generarse, como puede ser el caso de estructuras dendríticas o celulares para la zona de fusión. Por otro lado, La relación G_0/R tiene correspondencia con los parámetros expuestos en la Tabla 14, si se tiene en consideración que el gradiente de temperatura posee una relación proporcional directa con el tiempo de enfriamiento, y asimismo, la tasa de crecimiento posee relación proporcional inversa con el tiempo de solidificación (Bohnart & Sacks, 2012; Sindo Kou, 2003). Algunos autores resaltan la complejidad revestida en el parámetro R , que proviene del subenfriamiento total ΔT , el cual hace referencia a su vez a la diferencia entre la temperatura de

líquidos de equilibrio de la aleación de composición nominal y la temperatura real. Este es un parámetro crítico que controla la estructura de solidificación y la segregación en los procesos de soldadura. (Liang et al., 2023). La atribución en los materiales incluye cambios en la resistencia, la ductilidad y la tenacidad debido al espaciamiento de los granos (Davis, 1998). También es atribuible la morfología como consecuencia de la entrada de energía para cada proceso. Estos valores son presentados en la Tabla 14. Finalmente, un análisis de los valores promediados máximos y mínimos tomados a las muestras de cada proceso de soldadura para este material se muestra en la Figura 23.

Figura 23

Tamaños promedio de ZAC en AISI 316L según el proceso de soldadura



El tamaño de la ZAC puede relacionarse en forma directa con la entrada de energía, si se comparan los valores de la Tabla 14, puede establecerse que la condición de valores de entrada de energía, así como de tiempo de solidificación son inversamente proporcionales al tamaño ZAC para este material. En consecuencia el valor de 2494.8 J/mm del proceso SMAW representa el

menor tamaño de ZAC, el valor intermedio de 2076.8 J/mm del proceso FCAW representa el tamaño ZAC medio que muestra la Figura 23. Por último, el valor más bajo de entrada de energía de 1462.5 J/mm del proceso GMAW represento el mayor tamaño de ZAC. Para otros valores como se observó con el tamaño de grano, es posible que hayan factores más directos como la intensidad de corriente que pueden determinar cambios en esta proporcionalidad (Lancaster, 1984; Messler, 1999). Esta entrada de energía demuestra que el material recibe una gran cantidad de calor y que los medios de liberación de este calor vinculados a través de los medios de transferencia de calor del material pueden disipar esta energía de forma diversa (McKelliget & Szekely, 1986; Tekriwal & Mazumder, 1988). La determinación de estos valores representa un reto desde el enfoque investigativo para establecer condiciones de radiación, convección natural o forzada o conducción de este calor sobre el material soldado (Kahveci et al., 2005; Pamuk et al., 2018).

4.2. Ensayos de microdureza

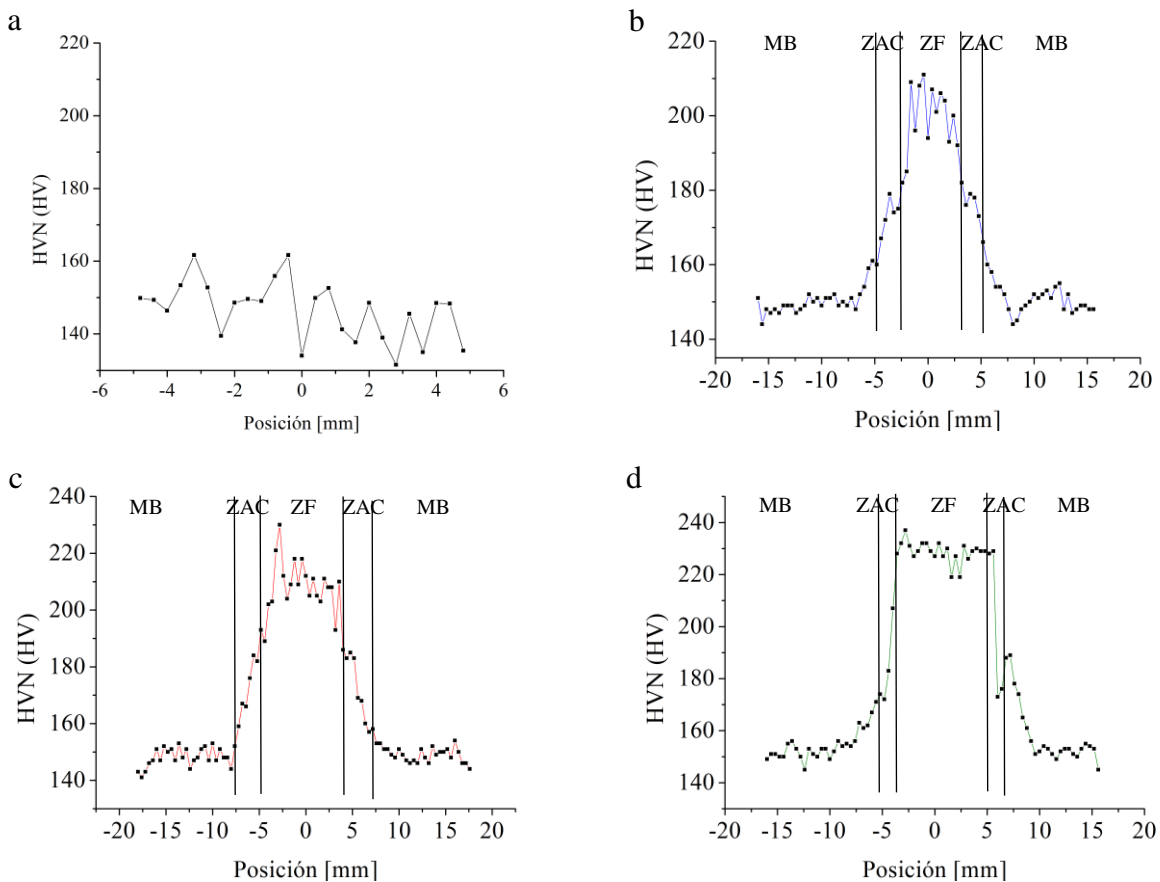
Se realizaron los ensayos de microdureza sobre los procesos de soldadura aplicados a cada material. En cada segmento se presentan los resultados por material y sus tres procesos para luego abordar el análisis de lo obtenido.

4.2.1. Ensayos de microdureza en ASTM A36

Se presentan los resultados para las microdurezas tomadas a través de los tres procesos de soldadura aplicados con las gráficas de dureza mostradas en la Figura 24. Se escogió como punto central de referencia o cero de la gráfica la línea central de la zona de fusión y de forma equidistante se tomaron a derecha e izquierda los datos, para observar el comportamiento de la dureza sobre el material base y los procesos aplicados.

Figura 24

Perfiles de dureza versus posición para ASTM A36



Nota: Dureza Vickers en ASTM A36 material base a), SMAW b), GMAW c), FCAW d).

Dentro de los perfiles de dureza presentados pueden distinguirse las zonas de interés. El vínculo que puede establecerse es la perturbación generada por el proceso. Donde la zona de menor dureza corresponde a la del material base, dictaminada por estar en el rango de dureza del material base que no sufrió influencia proveniente de ningún proceso de soldadura. El material base que ha alcanzado su temperatura de transformación, con inclusive algunas fluctuaciones provenientes de los gradientes de temperatura desde la fuente de calor, o los modelos de enfriamiento del material una vez la aplicación de soldadura ha terminado (David et al., 2001). Puede distinguirse un ascenso

de los valores de dureza en esta zona ubicada en la zona afectada por calor o ZAC. Esto ocurre debido a la formación de fases originadas por el enfriamiento heterogéneo de la aplicación de los procesos de soldadura. De igual forma en la zona de fusión, las tasas de enfriamiento más altas y tiempos de solidificación más cortos presentados en la Tabla 12 reflejan la formación de fases con mayor nivel de dureza (David et al., 2003). También en esta zona de fusión se encuentra parte del material de aporte que ha alcanzado su punto de fusión y por cualquier modo de transferencia que haya sido aplicado, la deposición lo aloja en esta área realizando la dilución de los dos materiales. Por definición normativa el material de aporte debe preservar propiedades superiores a las del material base. Esto implica que la dureza en esta zona será el resultado de un conjunto de valores entre la durezas del metal base y la dureza del material de aporte. Predominando hacia la zona de fusión el valor del material de aporte por ser la zona donde se deposita. Por último, la zona de fusión muestra los valores más elevados de dureza debido a un material de aporte que presenta un modelo de deposición y solidificación dependiente de la cantidad de corriente aplicada en cada proceso, de acuerdo con varios autores (Asibeluo IS & Emifoniye E, 2015; Rahangmetan et al., 2020; Vietanti et al., 2021). También puede encontrarse coherencia en las pendientes de ascenso de dureza en esta zona afectada por calor, atribuyendo en este caso de la dureza un cambio más abrupto que está siendo inversamente proporcional a la entrada de energía. De esta manera, en el proceso FCAW se tiene menor valor de entrada de energía y su cambio en la dureza es más repentino. En la Tabla 15 se presentan los datos estadísticos para el análisis de los valores obtenidos en la zona de fusión y su cercanía para cada proceso de soldadura en el material ASTM A36. Consecuentemente, la distribución del análisis estadístico se muestra en la Figura 25, donde se visualiza la influencia de los procesos de soldadura en la dureza respecto al material base.

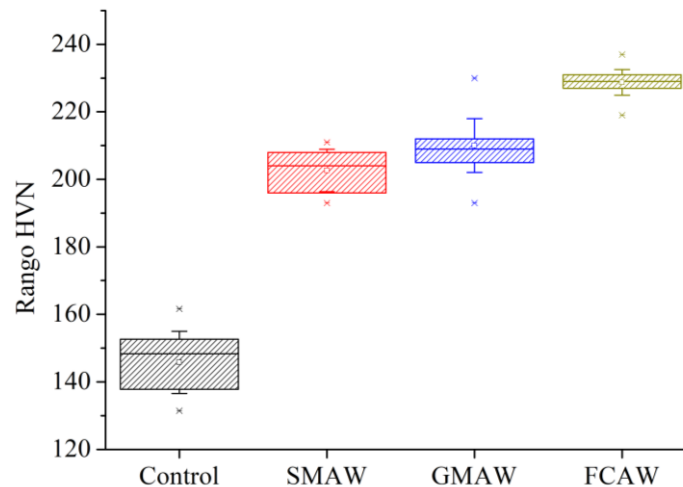
Tabla 15

Datos estadísticos de dureza en ASTM A36

Variables	Control	SMAW	GMAW	FCAW
Número de datos	21	15	20	22
Dureza promedio (de la unión soldada)	146.57	199.82	210.00	228.73
Desviación estándar	9.38	9.81	7.96	3.99
Máximo	161.6	211	230	237
Mínimo	131.5	182	193	219

Figura 25

Valores de dureza promedio para ASTM A36



Los valores de dureza de la Tabla 15 muestran correspondencia con los tamaños de grano presentados en la Tabla 11, el tamaño de un grano promedio para el proceso SMAW de diámetro promedio de 170.22 micras, es mayor respecto de los valores de 112.96 micras y 106.76 micras para GMAW y FCAW respectivamente. Estos valores son coherentes debido a que un material con granos más finos tiende a poseer una dureza mayor que un material con granos más gruesos. En consecuencia de que los límites de grano actúan como barreras para la deformación plástica, y

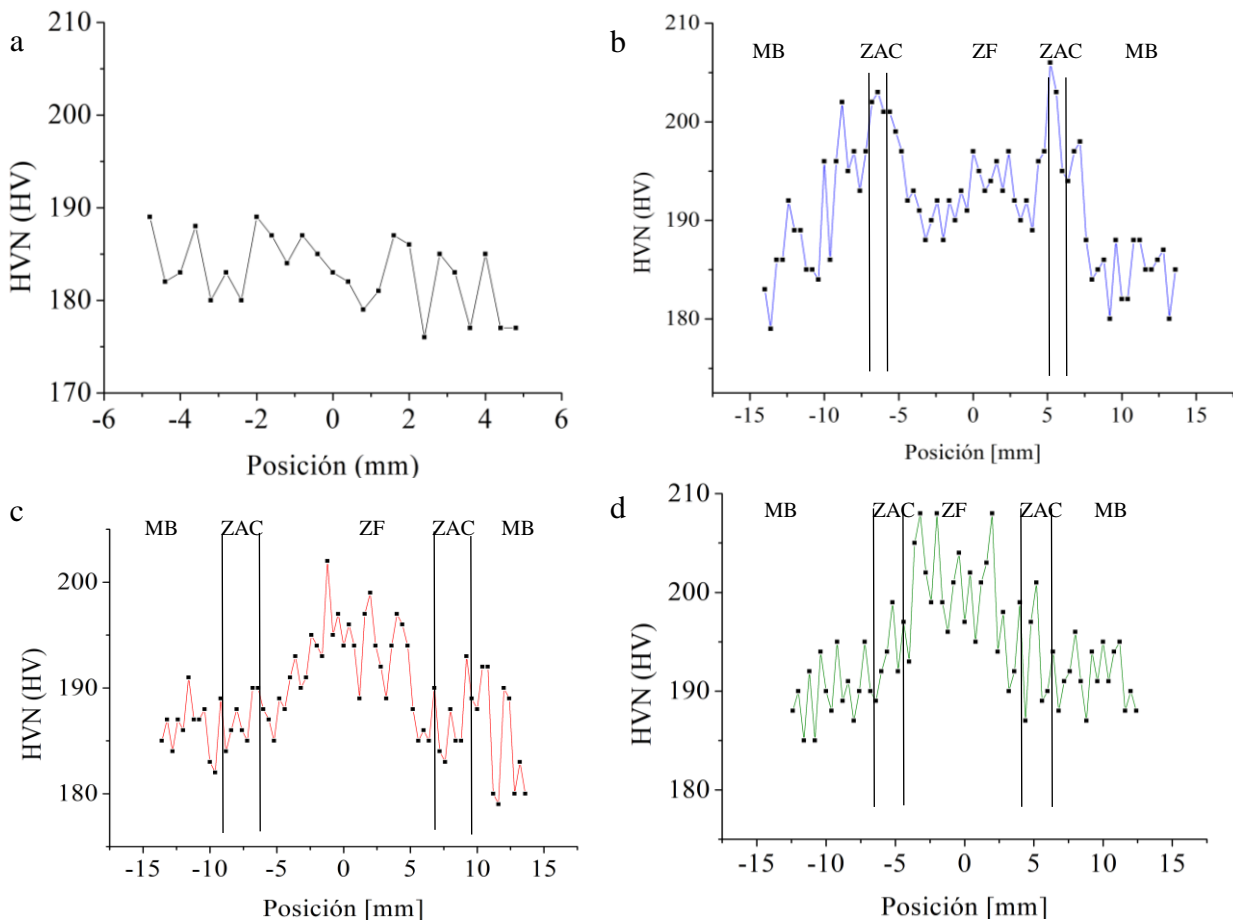
granos más finos generan más límites de grano, aumentando la resistencia al deslizamiento de las dislocaciones (Abbaschian & Reed-Hill, 2009; Sindo Kou, 2003).

4.2.2. Ensayos de dureza en AISI 316L

Para el material de acero inoxidable se desarrolló de igual forma el conjunto de ensayos, cuyos resultados se presentan en la Figura 26.

Figura 26

Perfiles de dureza versus posición para AISI 316L



Nota: Dureza Vickers de AISI 316L material base a), SMAW b), GMAW c), FCAW d).

La dureza del proceso SMAW presentada en la Figura 26 muestra pendientes de ascenso en la ZAC de una forma más definida frente a los procesos GMAW y FCAW, los cuales a pesar

de poseer zonas ZAC de tamaño mayor de acuerdo con la Figura 23 tienen una mayor desviación estándar de los datos sobre el rango de medición. Al respecto es posible considerar que la diferencia en la afectación del proceso SMAW el cual no utiliza un gas como medio protector durante la aplicación y los posibles efectos del uso de gas en la solidificación que podrían asemejarse a modelos de transferencia por convección natural y aislamiento. En el caso del proceso SMAW el aislamiento se produce por la protección de la capa de escoria superficial que se genera. De igual forma, se menciona lo que diversos autores proponen (Gadallah et al., 2012; Kah & Martikainen, 2013; Mvola & Kah, 2017; Purwaningrum et al., 2016; Suban & Tušek, 2001), mencionando que el proceso SMAW al poseer una capa de escoria sin afectación directa de gas, pueda generar una tasa de enfriamiento más lenta y un tiempo de solidificación mayor que contribuyan a la formación y crecimiento de grano, como lo respalda la Tabla 13 y la Tabla 14. Considerando así, que el proceso GMAW y el proceso FCAW pueden ser influenciados por el gas que se suministra durante la aplicación, y que esto puede revestir una condición de tasa de enfriamiento más alta y un tiempo de solidificación más corto que el del proceso SMAW (Lippold & Kotecki, 2005; Puchi-Cabrera et al., 2009). Adicionalmente, al inspeccionar correlaciones de la dureza que pudieran suscitarse con los datos recopilados, se evidencia una relación directa con la cantidad de corriente e inversa con la tensión de energía, En consecuencia, la dureza presentada con el proceso FCAW, que fue la más elevada, corresponde a la mayor corriente y la menor tensión de energía y de manera complementaria el proceso SMAW con la menor dureza posee la menor corriente y la mayor tensión de energía. También podría mencionarse que la fluctuación del perfil de dureza en la zona afectada por calor o ZAC es bastante irregular para el material AISI 316L. Esto también podría atribuirse a que el acero inoxidable AISI 316L siendo de bajo carbono presenta una baja afectación por los ciclos térmicos de soldadura y en general los aceros

inoxidables austeníticos se considera que no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, debido a los elementos estabilizadores de austenita (American Institute of Iron and Steel, 1988; Wendler et al., 2017). Adicionalmente, es necesario mencionar situaciones propias de los procesos de soldadura como la influencia de esfuerzos residuales en la fluctuación de la dureza del material soldado como lo expresan diversos autores (Ragavendran et al., 2022; Topolska, 2016; Vasantharaja et al., 2012). Aun así, es difícil establecer una correlación matemática sólida debido a la cantidad de datos compilados del proceso. En la Tabla 16 se presentan los datos estadísticos de dureza en este material, en la cual han sido considerados los valores más altos que se ubican en la zona de fusión y la cercanía de las zonas afectada por calor y metal base. Consecuentemente, en la zona de metal base los valores son similares a los valores de la probeta de material base que no sufrió variaciones por procesos de soldadura

Tabla 16

Datos estadísticos de dureza en AISI 316L

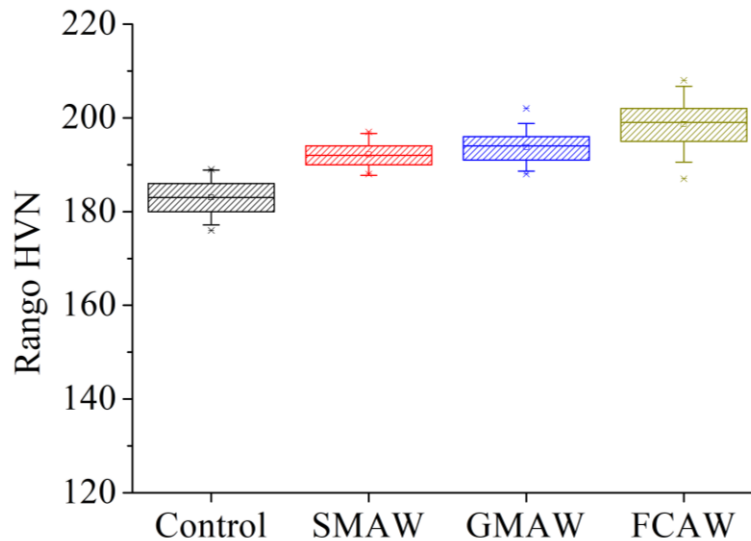
Variables	Control	SMAW	GMAW	FCAW
Número de datos	25	21	25	27
Dureza promedio (de la unión soldada)	183.00	192.19	193.72	198.78
Desviación estándar	3.89	2.98	3.39	5.44
Máximo	189.0	197.0	202.0	208.0
Mínimo	176.0	188.0	188.0	187.0

La Figura 27 representa gráficamente los valores estadísticos para el análisis de dureza de este material AISI 316L afectado por los tres procesos de soldadura por arco eléctrico. En esta

figura se observan los valores más elevados para el proceso FCAW, respecto de los procesos GMAW y SMAW respectivamente.

Figura 27

Valores de dureza promedio para AISI 316L



Los valores de GMAW y FCAW muestran la presencia de valores atípicos que contrastan con lo mencionado sobre los escenarios de solidificación y con la presencia de posibles esfuerzos residuales, los cuales en los procesos de soldadura no exhiben distribuciones homogéneas y se soportan en su distancia de la fuente de calor (Cho et al., 2024; S. Li et al., 2023). Diferenciales del valor de dureza son atribuibles al cambio en los contenidos de carbono entre el material base y el material de aporte (Moslemi et al., 2015). La Tabla 14 muestra una tasa de enfriamiento más elevada, un tiempo de solidificación más corto y una entrada de energía inferior para el material FCAW, posterior el GMAW y finalmente el SMAW.

4.3. Ensayos de tracción

La revisión de los resultados de tracción permitió indagar sobre el comportamiento mecánico de los materiales sometidos a procesos de soldadura por arco eléctrico bajo el modelo

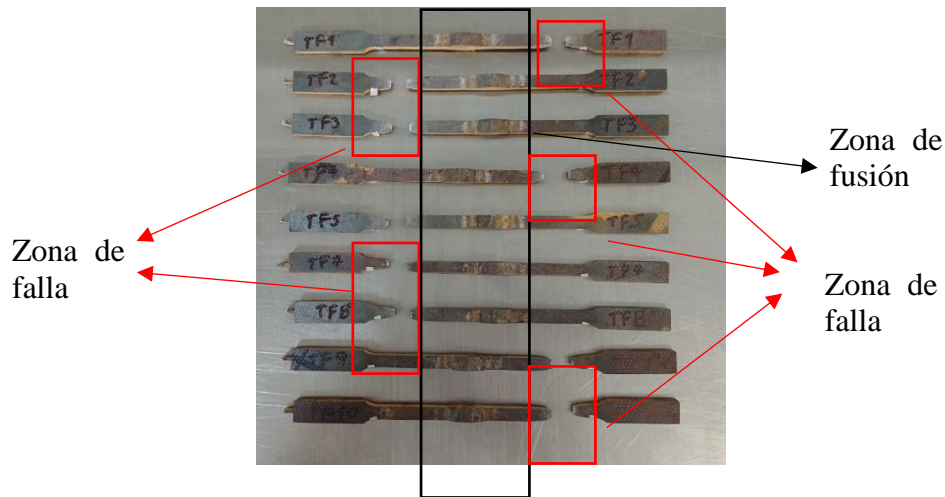
de carga monotónica. Siendo esta prueba una condición de hallazgo para algunos parámetros preliminares de diseño de elementos estáticos.

4.3.1. Ensayos de tracción para ASTM A36

Fueron realizados los ensayos para probetas de material base sin afectación de procesos de soldadura, igualmente para cada uno de los tres procesos de soldadura por arco eléctrico presentados en la metodología. En la Figura 28 se observa un conjunto de probetas falladas.

Figura 28

Probetas de ensayo de tracción ASTM A36 bajo proceso FCAW



Cada prueba fue realizada en un conjunto de diez probetas. Esto para preservar la condición de fluctuación estipulada en la normativa ASTM E8/E8M-13 que establece datos de estabilidad con variaciones inferiores al 10%. El tratamiento de datos permitió agrupar la información procesada para cada probeta y generar un comportamiento promedio para cada proceso de soldadura que se aplicó al ASTM A36, los demás conjuntos de probetas falladas se adjuntan en el apéndice C de este documento.

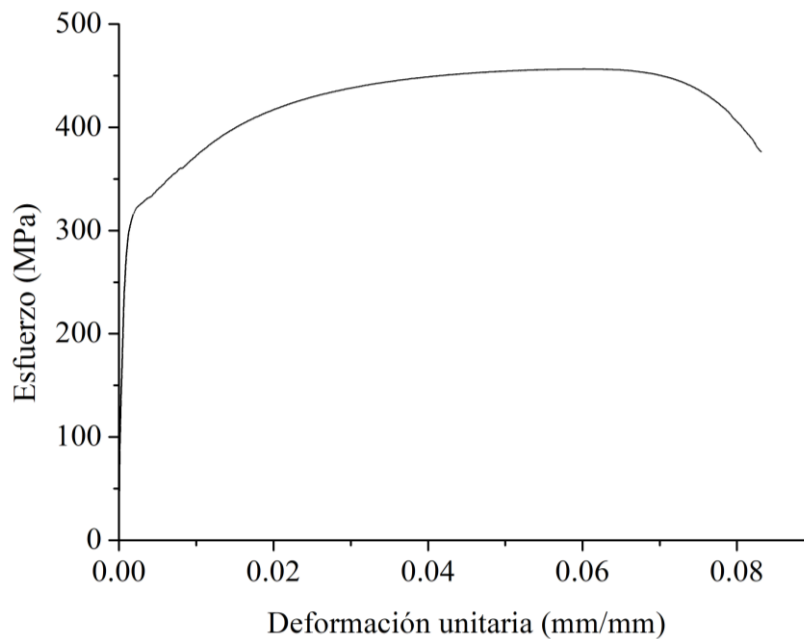
Acerca de los modelos de falla suscitados en la prueba pueden inferirse varias situaciones. Dentro de lo que cabe destacar la sección de falla estuvo más alejada de la zona de fusión como se

observa en la Figura 28. Esto es consecuente con lo mencionado al respecto de la selección del material de aporte. Este material posee propiedades superiores a las del material base. La falla tampoco estuvo localizada en la zona afectada por calor o ZAC. Esto reafirma los datos presentados en el ensayo de dureza, que mostraron un ascenso del valor para las zonas ZAC y ZF y que corresponde a valores más resistentes al esfuerzo de tracción. De tal manera que se puede percibir que la condición de falla se presentó en la zona de metal base, donde las estructuras presentaron valores de dureza más bajos, y su morfología no exhibe modificaciones afectadas por la temperatura del proceso.

La Figura 29 presenta la curva promedio de esfuerzo contra deformación unitaria promedio para el material ASTM A36 sometido al proceso FCAW.

Figura 29

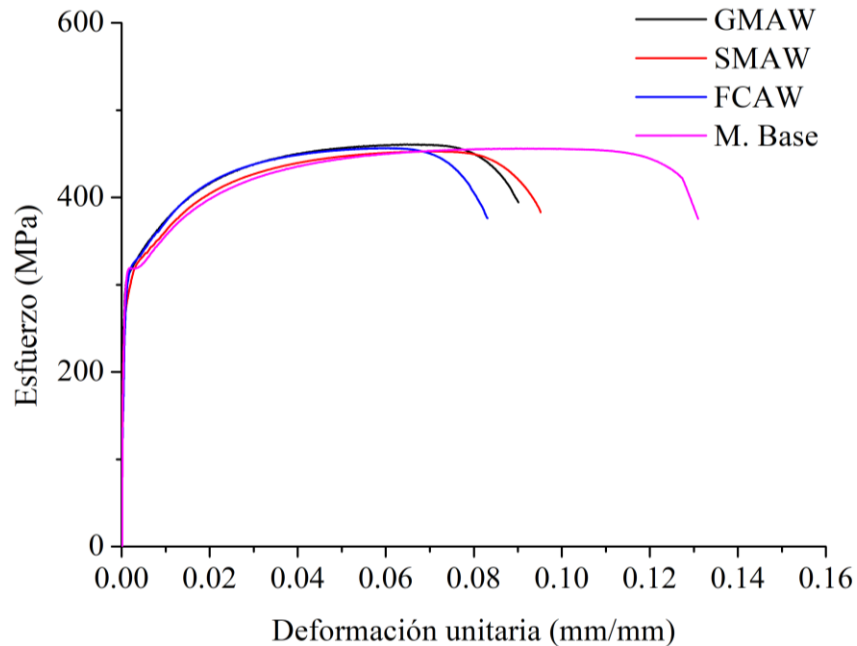
Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para ASTM A36 bajo proceso FCAW



La Figura 30 presenta el conjunto de curvas esfuerzo contra deformación unitaria para los materiales ASTM A36 afectados por los tres procesos de soldadura y para el material base.

Figura 30

Curvas promedio esfuerzo contra deformación unitaria para ASTM A36 sometido a procesos de soldadura y material base



Para cada una de estas curvas fueron extraídas las variables más relevantes del ensayo, que son utilizadas habitualmente para procesos de diseño. A través del método offset se obtuvo el valor de límite elástico y por regresión lineal sobre este análisis se estimó la pendiente correspondiente al módulo de elasticidad, también por seguimiento sobre los datos de la curva pudieron determinarse valores como el esfuerzo último de tracción y el porcentaje de alargamiento. El cálculo de tenacidad se realizó por integración gráfica sobre el área bajo la curva promedio con el manejo del software Origin (<https://www.originlab.com/>). La obtención de estos valores se realizó con el propósito de comparar los valores acordes a cada uno de los procesos de soldadura por arco eléctrico aplicado, así como revisar su afectación respecto el material base que no fue soldado.

También se revisaron estos datos en la literatura especializada para contrastar la influencia, así como los resultados obtenidos (Maraki et al., 2022; Pratikno et al., 2022; Yuwono et al., 2022).

En la Tabla 17 se presenta el resumen de valores para cada uno de los parámetros extraídos de los procesos de soldadura por arco eléctrico que se aplicaron al material ASTM A36.

Tabla 17

Parámetros obtenidos del ensayo de tracción en ASTM A36

Proceso	E [GPa]	Sy [MPa]	Sut [MPa]	%Al. [%]	Tenacidad [MJ/m³]
Control	199.2±7.82	315.4±23.34	456.14 ±18.09	14.46±0.98	53.42±2.43
SMAW	201.3±4.65	314.3±12.41	452.78±10.49	9.52±0.89	40.01±2.88
GMAW	198.5±10.02	308.8±17.19	460.87±6.77	9.01±0.4	38.66±3.02
FCAW	203.3±3.65	318.4±13.57	456.39 ±10.25	8.3±0.66	35.15±1.86

De los datos de la Tabla 17 puede decirse que el desvío padrón sugiere que no hay diferencia entre los valores de las variables E , Sy , y Sut para las diferentes muestras, y puede atribuirse a variaciones provenientes de las tolerancias geométricas, las condiciones de montaje, el ruido electrónico de los equipos de control y la incertidumbre inherente al modelo experimental. Estas variaciones no superan un 2% en desviación del valor obtenido en cada proceso y el material base. La condición de variación si se presentó en el porcentaje de alargamiento, revisando esta variable, se percibe afectada en medida directa proporcional a la entrada de energía establecida en la Tabla 12. Esto representa que a mayor entrada de energía el porcentaje de alargamiento será mayor en la junta soldada. Este valor de porcentaje de alargamiento se afecta claramente con la constitución de la unión soldada, la cual está conformada por tres diferentes materiales, si así pudiera denominarse la configuración de las fases de cada zona. El primero de estos materiales es el metal base que debe preservar sus condiciones y propiedades iniciales, al no ser afectado por el

proceso de soldadura. El segundo es el metal base influenciado por el gradiente de temperatura desde la zona de fusión, el cual genera transformaciones, cambios de fase y otros fenómenos asociados al alcanzar temperaturas cercanas a la de fusión. Finalmente, el metal de aporte depositado sobre el área de la junta. Este último material de aporte es menos dúctil, por la morfología generada durante el proceso de fusión y aporte, y por tener mayor resistencia desde su elección para el proceso de soldadura (David et al., 2003). Esto resta ductilidad a la junta, reduciendo su porcentaje de alargamiento.

Con el número de ensayos realizado es difícil establecer correlaciones matemáticas entre los parámetros extraídos del ensayo de tracción y variables de la aplicación de los procesos de soldadura. Aun cuando diversos autores resaltan estas influencias y los resultados aquí presentados son coherentes con estas (Bodude & Momohjimoh, 2015; Gery et al., 2005; Purwaningrum et al., 2016; Talabi et al., 2014). Sin embargo, su comportamiento es coherente con valores estables para el material y los procesos aplicados.

Otro aspecto importante para resaltar en el comportamiento del material ASTM A36 que ha sido afectado por los procesos de soldadura a partir de este ensayo de tracción, es la pérdida de ductilidad del material. Esto podría deberse a la restricción del movimiento de las dislocaciones que se presenta al someter a carga al material que ha presentado una transformación por soldadura (Janardhan et al., 2020) como fue comentado de forma previa en la sección de dureza, mencionando el hecho por el cual la entrada de energía dentro del material causa transformaciones a los tamaños de grano, que presentan un afinamiento menor y disminuye el movimiento de las dislocaciones, por cuanto la dureza del material aumenta y se reduce la ductilidad mencionada (Abbaschian & Reed-Hill, 2009; Sindo Kou, 2003). Esta condición se percibe en la reducción de

área bajo la curva que presenta un descenso de su plasticidad y que se verá duplicado en el comportamiento de resistencia dinámica o de carga cíclica en fatiga del material.

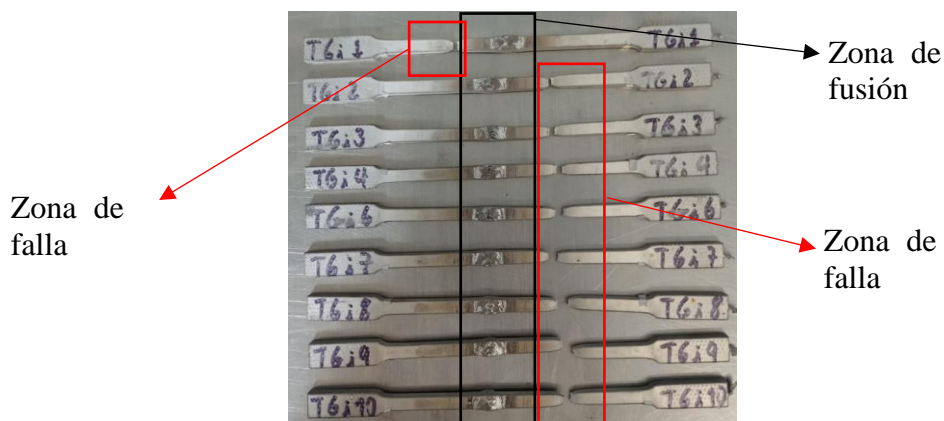
Consideraciones adicionales respecto del comportamiento del material podrían ser atribuidas a las microestructuras halladas. Sin embargo, no generan un cambio característico o demostrativo de los parámetros extraídos del ensayo de tracción para este material. La revisión de los parámetros adicionales influye sin modificaciones significativas y como se mencionó anteriormente pueden considerarse con poca afectación respecto del material base.

4.3.2. Ensayos de tracción para AISI 316L

En la Figura 31 se presenta un conjunto de probetas falladas para el material AISI 316L bajo proceso de soldadura GMAW. De igual forma se desarrollaron las pruebas para este material bajo la afectación de los dos procesos restantes de soldadura y adicionalmente, para muestras de material base sin influencia térmica. Las imágenes de las demás probetas falladas para cada uno de los procesos de soldadura aplicados a este material y para las muestras de material base se encuentran en el apéndice C.

Figura 31

Probetas de ensayo de tracción AISI 316L bajo proceso GMAW

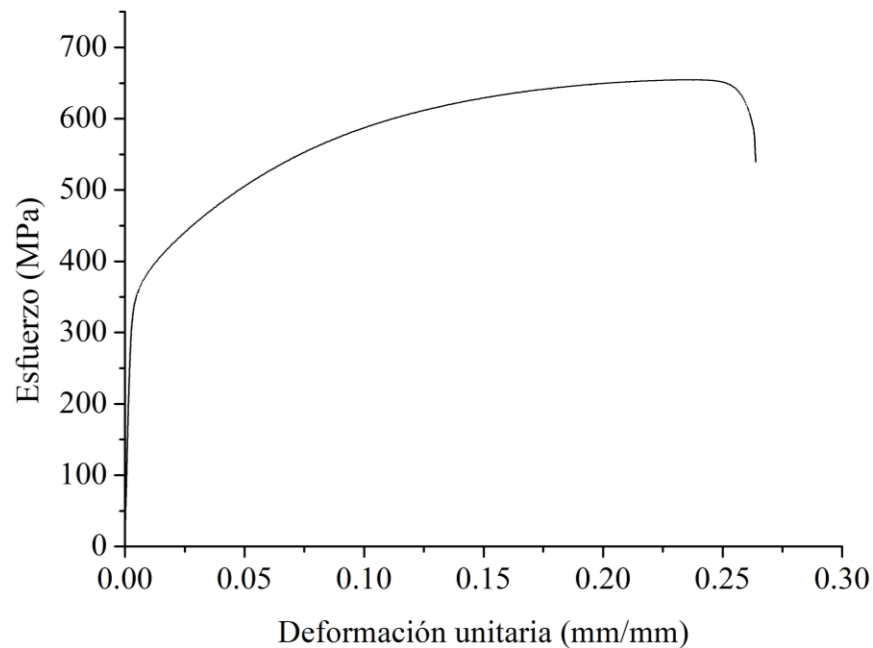


Se observa en la Figura 31 la zona de falla del ensayo de tracción que pudo ubicarse más allá de la zona de fusión, debido a que en la zona de fusión es donde el material acorde al estándar de selección AWS D1.6/D16M-2017 (American Welding Society (AWS), 2017) posee propiedades superiores al material base. También se percibe que la pieza logró su falla en el área del material base y con cierta cercanía hacia la transición con la ZAC, esto a través de la geometría de las probetas.

Para cada uno de los conjuntos de muestras fallados se procesaron y estimaron las curvas de esfuerzo contra deformación unitaria. La curva promedio esfuerzo versus deformación de este proceso se presenta en la Figura 32.

Figura 32

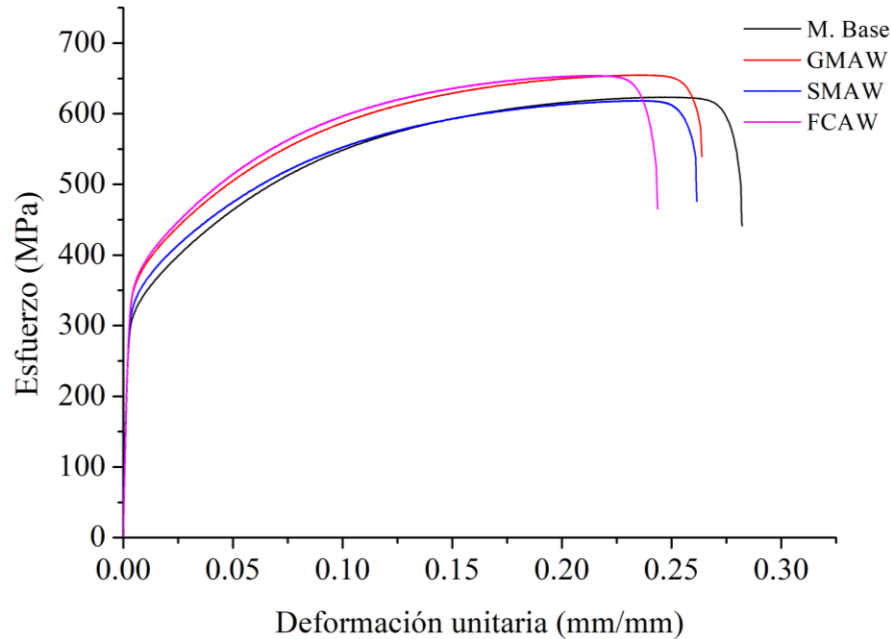
Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L bajo proceso GMAW



También fueron procesados los valores promedio para cada una de las curvas en cada uno de los procesos de soldadura aplicados. La Figura 33 presenta todas las curvas promedio para el material AISI 316L con procesos de soldadura y material base.

Figura 33

Curvas promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L sometido a procesos de soldadura y material base



Nota: Curvas promedio en AISI 316L para cada proceso SMAW, GMAW y FCAW, así como material base sin afectación de procesos de soldadura.

La Tabla 18 presenta los valores obtenidos del ensayo para la realización de comparativos con los parámetros de proceso y coherencia con la bibliografía similar y existente. Se presentan con igual nomenclatura y modelo de obtención de los parámetros que en el material A36. En el apéndice C se adjuntan las curvas esfuerzo contra deformación unitaria para los demás procesos de soldadura por arco eléctrico aplicados a este material.

Tabla 18

Parámetros obtenidos del ensayo de tracción en AISI 316L

Proceso	E [GPa]	Sy [MPa]	Sut [MPa]	%Al. [%]	Tenacidad [MJ/m3]
Control	202.4±12.81	303.25±22.14	626.5±25.63	28.77±1.32	154.2±8.33
SMAW	199.2±8.77	306.77±8.99	617±17.58	27.4±1.44	142.4±6.37
GMAW	204±11.95	326.74±17.52	655.62±19.88	27.21±2.21	152.6±7.74
FCAW	204.7±6.55	331.56±10.05	658.61±12.24	25.24±0.98	140.6±5.65

Al respecto del comportamiento del material bajo la afectación de los procesos de soldadura aplicados se presenta relativamente estable. Esto sin dejar de percibir cambios específicos que muestran una resistencia más elevada en los materiales resultantes del proceso GMAW y el proceso FCAW sobre el proceso SMAW y sobre el mismo material base. Esta fluctuación, aunque podría obviarse por ser de bajo valor, es de notar que sigue un orden estricto con una de las variables específicas del proceso que es la intensidad de corriente mostrada en la Tabla 14. Esto concuerda con lo mencionado por Cioroagă y Mohd (Cioroagă & Linul, 2023; Mohd-Lair et al., 2021) quienes hallaron relación directa entre la intensidad de corriente y la resistencia última de tracción o *Sut* del material AISI 316L. Otros autores (Lippold & Kotecki, 2005) relacionan unas mejores propiedades de los procesos GMAW y FCAW debido a la influencia del gas de protección que reduce la formación de óxidos en los depósitos generados desde el material de aporte respecto de lo que ocurre en el proceso SMAW. Al respecto del cambio en el porcentaje de alargamiento el autor Yilmaz (Yilmaz et al., 2002) lo relaciona de forma inversa con la cantidad de intensidad de corriente presentada en la Tabla 14 donde se muestra el nivel de

corriente más elevado para el proceso FCAW, lo cual relaciona un menor porcentaje de alargamiento y valores más bajos de corriente para SMAW y GMAW que permitieron tener mayor elongación de las probetas durante el ensayo.

Acorde a los resultados presentados en los ensayos mecánicos puede concluirse que existen ciertas influencias desde el área de parámetros de procesos sobre el comportamiento mecánico estático de ambos materiales ASTM A36 y AISI 316L. Mientras que en la medición de los perfiles de dureza se pudo establecer relaciones y cambios en cada una de las zonas presentadas en las uniones soldadas, la influencia en la variación de los parámetros extraídos del ensayo de tracción no fue determinante, exceptuando el porcentaje de alargamiento para el material ASTM A36. Así puede percibirse que la afectación por soldadura no genera una influencia marcada para las características estáticas de los materiales evaluados.

4.4. Ensayos de fatiga

El análisis realizado para el ensayo de fatiga da cuenta de la afectación a la resistencia dinámica que se generó sobre las juntas soldadas para cada material. Se constató al respecto la zona de falla y los datos obtenidos en ciclos resistivos para cada uno de los niveles de esfuerzo establecidos. Teniendo presente que se generó un espectro de niveles de esfuerzo relacionado al límite elástico de cada material desde el 95% hasta el 80% con gradiente de 5% entre cada uno a una frecuencia constante de 30 Hz.

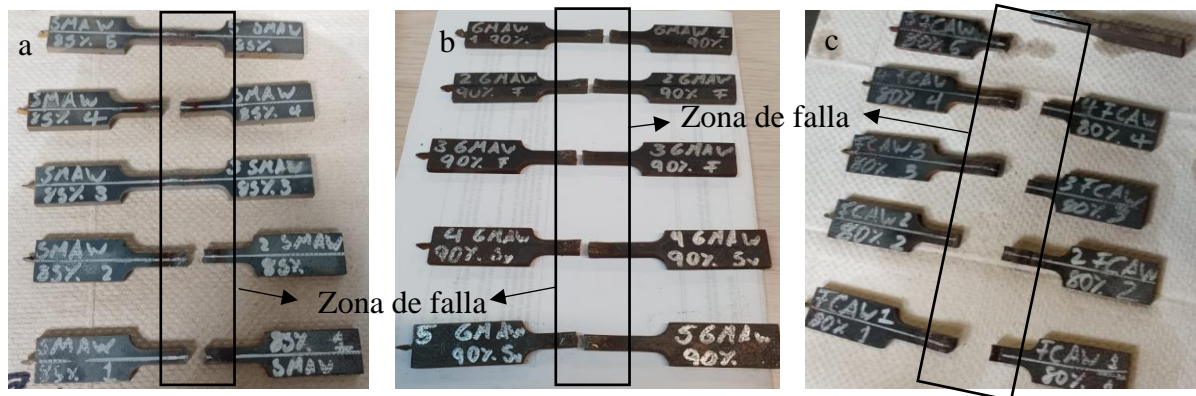
4.4.1. Ensayos de fatiga para ASTM A36

El ensayo de fatiga fue planteado para realizar cuatro niveles de esfuerzo dependientes del valor de límite elástico obtenido para cada material. Cada nivel con un valor decreciente del 5% respecto del anterior, iniciando desde el 95% del S_y . Estos valores de límite elástico fueron

presentados en la Tabla 17. Para cada nivel se usaron cinco probetas estableciendo los valores de ciclaje resistivo que fueron finalmente tratados bajo la corrección de la distribución de Weibull y se realizó la gráfica característica bajo el modelo de Basquin para estimar el comportamiento y la tendencia hacia el límite de fatiga del material (Barraza-Contreras et al., 2020; Basquin, 1910; Wirsching & Yao, 1970). En la Figura 34 se presentan un conjunto de imágenes de probetas falladas del material ASTM A36 sometido a procesos de soldadura.

Figura 34

Probetas de ensayo de fatiga en ASTM A36



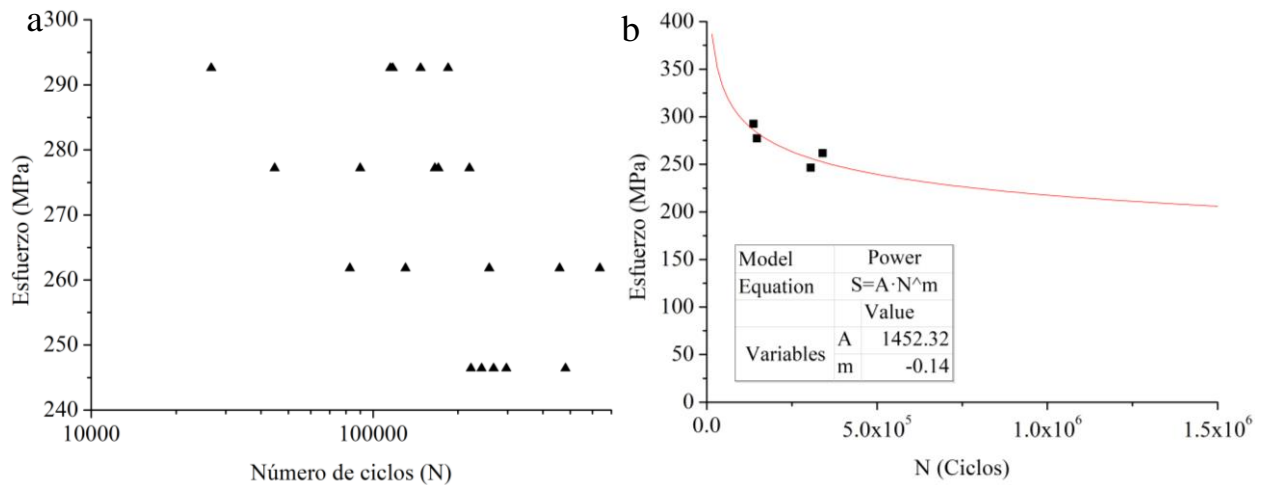
Nota: Probetas de ASTM A36 con diversos procesos de soldadura falladas después de ensayo de fatiga, SMAW al 85% S_y a), GMAW al 90% S_y b), FCAW al 80% S_y c).

Como se observa en la Figura 34 el conjunto de probetas localizó la zona de falla sobre la junta soldada. El análisis pertinente de la zona de nucleación de grieta y la zona de propagación se presentan en la sección de fractografía. Para cada uno de los procesos fue desarrollada la curva S-N o esfuerzo contra número de ciclos que representa la durabilidad de un conjunto de probetas bajo un nivel de esfuerzo. Esta durabilidad medida en los ciclos resistivos de la probeta sometida a esfuerzo alternante antes de la fractura. De igual forma se procedió para cada uno de los conjuntos de probetas, obteniendo el comportamiento del material influenciado por cada proceso de

soldadura dentro del rango de niveles de esfuerzo estipulado. En la Figura 35 se presenta el conjunto de gráficas generadas para uno de los procesos de soldadura por arco eléctrico con el total de probetas del ensayo para el ASTM A36.

Figura 35

Curvas S-N generadas del conjunto de probetas ASTM A36 bajo proceso de soldadura GMAW



Nota: Distribución de puntos de especímenes fallados a), Curva S-N del comportamiento del material b).

La curva de Basquin presenta el modelo característico $S = A(N)^m$ donde A representa el valor de la intersección con el eje de esfuerzo y m el coeficiente de endurecimiento por deformación dinámico, que representa la capacidad de deformación plástica o movimiento de dislocaciones y que en la percepción gráfica representa la razón de cambio de esfuerzo necesario para generar la deformación dentro de la cantidad de ciclos resistivos (Klesnil & Lukás, 1993). En la Tabla 19 se presentan estos datos. El valor de intersección presentado en la Tabla 19 representa de acuerdo con diversos autores la variable de esfuerzo último de tracción corregido. Esto significa el valor del esfuerzo último de tracción calculado con el área real del elemento sometido a carga (Klesnil & Lukás, 1993).

Tabla 19

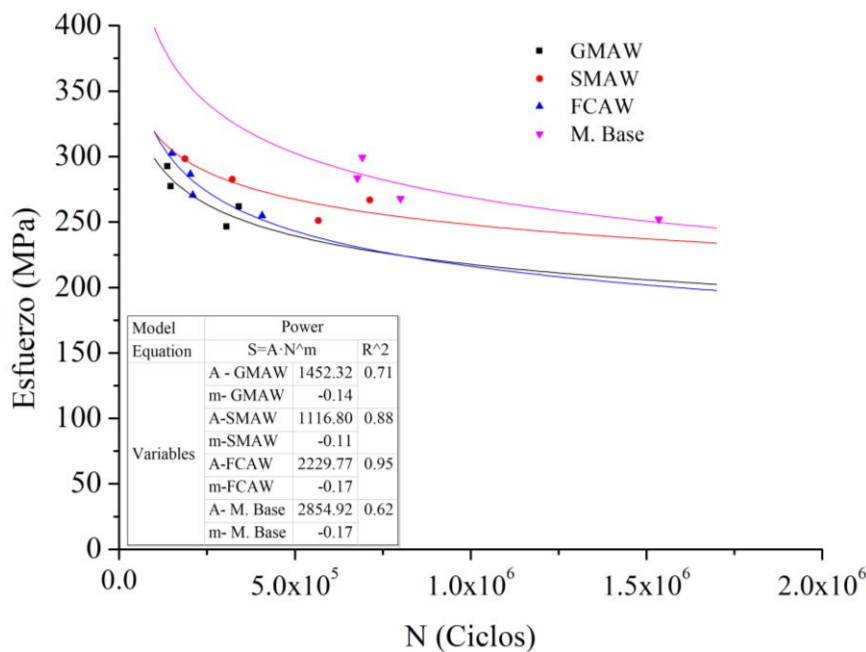
Ecuación de la curva S-N para ASTM A36 bajo procesos de soldadura

Proceso	Ecuación de la recta S-N	Coefficiente <i>m</i>	Variable <i>A</i>
SMAW	$S = 1116.80(N)^{-0.11}$	-0.11	1116.80
GMAW	$S = 1452.32(N)^{-0.14}$	-0.14	1452.32
FCAW	$S = 2229.77(N)^{-0.17}$	-0.17	2229.77

Algunos autores corrigen la Variable *A* con el valor del esfuerzo último de tracción (Niesłony et al., 2008). Sin embargo, el planteamiento de Basquin obvia estas percepciones y lo refleja como una constante propia del material ensayado (Murakami et al., 2021). La Figura 36 presenta las curvas S-N para el ASTM A36 bajo el tratamiento de datos mencionado que permite la comparación del comportamiento de los procesos de soldadura por arco eléctrico aplicados.

Figura 36

Curvas S-N para ASTM A36 sometido a procesos de soldadura y material base



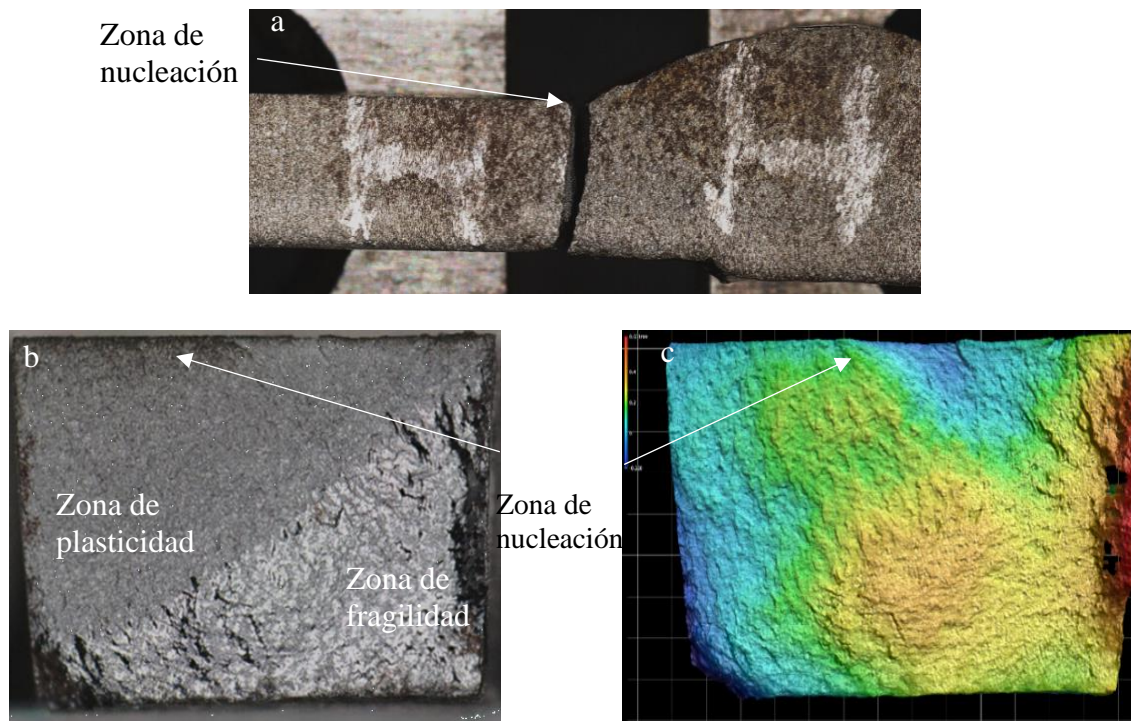
La Figura 36 muestra una mayor durabilidad en ciclos o resistencia a la fatiga del material base ASTM A36, el cual no sufrió influencia de ningún proceso de soldadura. Posterior a este se encuentra el ASTM A36 sometido a proceso de soldadura SMAW y finalmente, los procesos GMAW y FCAW. Esta situación podría asociarse con el coeficiente m de más bajo valor correspondiente a -0.17 en el proceso FCAW presentado en la Tabla 19 frente a los valores de GMAW en -0.14 y -0.11 de SMAW. Este conjunto de valores inferiores denota una propagación más acelerada de la grieta con valores de esfuerzo similares, en específico los procesos FCAW y GMAW muestran un acercamiento en su comportamiento, sin embargo, los parámetros de la Tabla 19 manifiestan que este valor para FCAW es inferior. Las condiciones de esta propagación podrían estar relacionadas al tamaño de la ZAC, siendo una microestructura que presenta variaciones en su dureza y tamaño de grano, ofrece al mecanismo de propagación de grieta un conjunto de probabilidad de crecimiento de la grieta dependiente del tamaño de la zona. La medición del tamaño de la ZAC fue presentada en la Figura 20 de la sección del análisis metalográfico, y exhibió valores de rango para SMAW de 2.76 a 1.56 mm para GMAW de 2.76 a 0.86 mm y para FCAW de 2.00 a 1.34 mm. Este comportamiento podría presentar una similitud con el orden descendente de los valores de estas pendientes. Algunos autores (Gurney, 1970; Macdonald, 2011; Pollard & Cover, 1972) han desestimado la influencia de propagación a través de la ZAC. Esto es verificable a través de la trayectoria de grieta, que como se muestra en la sección posterior de fractografía no se desplazó a través de la ZAC, sino de la zona de fusión o ZF. Por cuanto el análisis debería relacionarse con otras condiciones. Puede mencionarse adicionalmente, que dentro de la microestructura de la zona afectada por calor para el material SMAW, se distinguieron regiones ferríticas alotriomórficas que aportan plasticidad al material, así como se advirtió de la presencia de ferrita Widmanstätten que facilita los movimientos interplanares, lo que posiblemente también

mejora el comportamiento de este material sometido a este proceso (Eroğlu et al., 1999; X. F. Zhang et al., 2012). Esta observación para SMAW respecto de las formaciones vistas en los dos procesos GMAW y FCAW. En oposición en el proceso FCAW se advierte un tamaño de grano más pequeño que para los dos procesos anteriores, facilitando el apilamiento de las dislocaciones en el borde de grano, dando como consecuencia un número de ciclos de resistividad más bajos, considerando en este escenario la nucleación de grieta y la propagación de esta. Para los procesos FCAW y GMAW el tamaño de grano presente en la zona ZAC al ser más fino y la dureza analizada en las zonas de fusión de estos materiales demuestran restricción de la plasticidad necesaria para resistir la carga cíclica, originando fracturas más aceleradas que el SMAW. Analizando un criterio adicional de influencia, el autor Asibeluo (Asibeluo IS & Emifoniye E, 2015) relaciona el incremento en la corriente eléctrica de la soldadura con la reducción de tenacidad del material, que estrechamente se relaciona con la durabilidad en el ensayo de fatiga. El autor Magudeeswaran (Magudeeswaran et al., 2008) menciona la influencia en este caso del incremento de la corriente y la reducción de tensión como influencia directa sobre la resistencia a la fatiga del material. Esta última variable de relación preserva el orden para cada uno de los procesos de soldadura sobre la durabilidad en ciclos de forma inversa con la cantidad de corriente aplicada y directa con la cantidad de tensión. Esto es, que de acuerdo con los valores observados y sin contemplar el término A de la intersección presentado en la Tabla 19 el proceso FCAW con una corriente más alta y un voltaje más bajo sería el de comportamiento más bajo en ciclos, seguido del proceso GMAW y finalmente, el proceso SMAW con la corriente más baja y la tensión más alta tendría la mayor cantidad de ciclos. Esto podría generar variaciones en los modelos de solidificación, las tasas de enfriamiento y el tiempo de solidificación. Generando tamaños de grano más pequeños como los observados en la ZAC, que impiden la oscilación de las dislocaciones y la propagación de las

grietas existentes, ocasionando el apilamiento de las dislocaciones y culminando con la fractura de forma rápida. Aun así, los tres procesos presentaron un descenso en el número de ciclos resistivos bajo carga cíclica respecto del nivel de resistencia del material base. La Figura 37 presenta un estudio fractográfico realizado al material que permite observar la trayectoria de grieta en una de las muestras. Se realizó observación por microscopio óptico electrónico para identificar la trayectoria de propagación y el análisis tridimensional permitió identificar las alturas de la superficie fracturada para evidenciar las zonas de crecimiento de la grieta, así como las regiones plásticas y frágiles de la superficie de falla.

Figura 37

Localización de falla en probetas de fatiga de ASTM A36



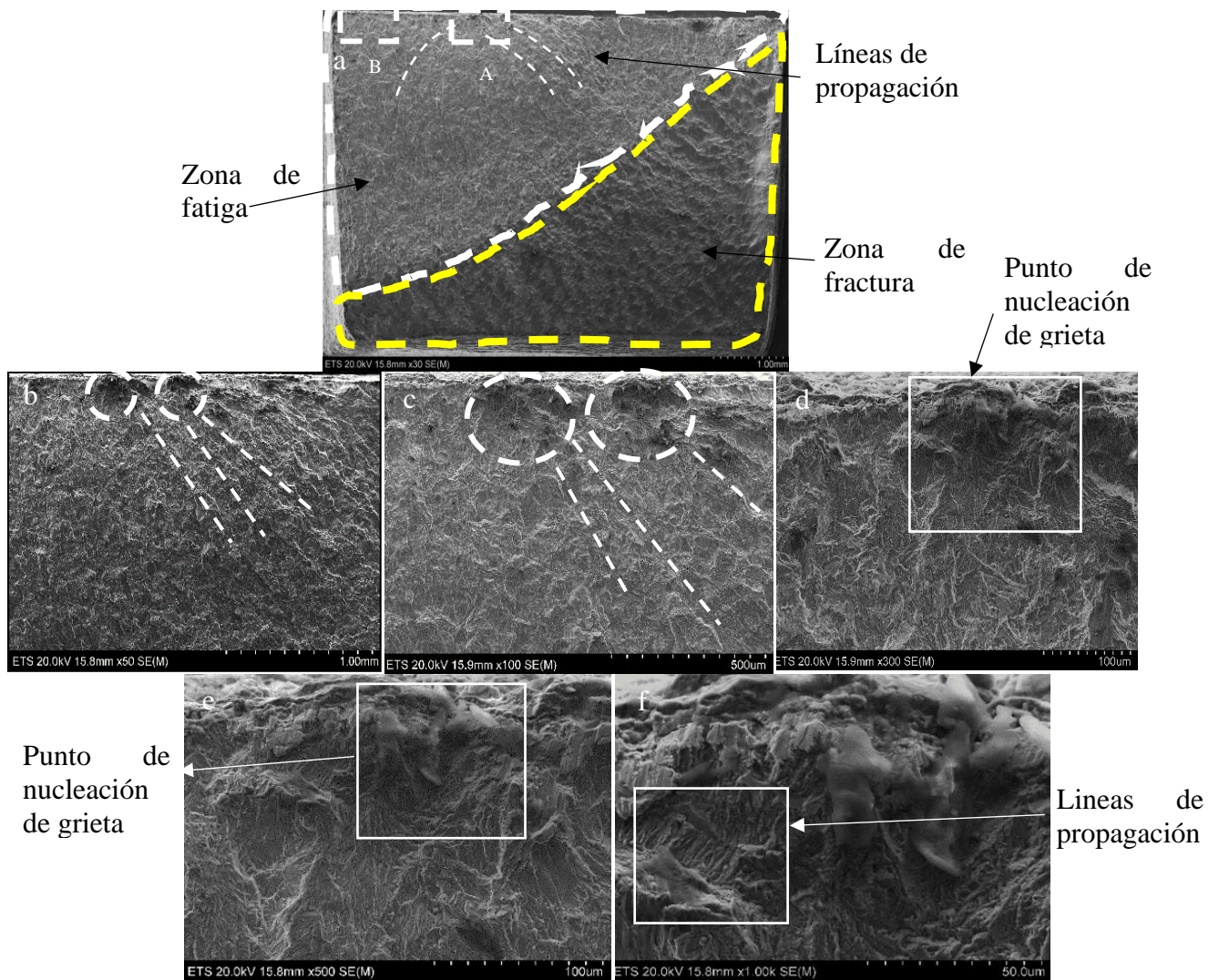
Nota: Probeta FCAW con perfil de localización de falla en el pie de soldadura a), perfil óptico de la superficie de falla b), análisis de alturas en superficie fallada c).

Esta revisión fractográfica exhibe la localización del inicio de grieta y la trayectoria de propagación hasta la fractura. El estudio fractográfico desarrollado para las muestras límite de cada nivel de esfuerzo confirman algunas de las afirmaciones realizadas en cuanto a la localización del inicio de grieta y la calidad de la soldadura. La Figura 37.a presenta el perfil longitudinal de una probeta de ASTM A36 bajo proceso de soldadura FCAW con alto número de ciclos de durabilidad. Mostrando un inicio de grieta en el pie de la soldadura y realizando propagación dentro de la zona de fusión del material, consecuentemente con el análisis de dureza presentado que demuestra más fragilidad en la zona de fusión que en la ZAC, como se revisa posteriormente en el análisis fractográfico realizado con microscopia electrónica de barrido. Las Figura 37.b y c muestran las zonas de plasticidad y de arranque de material a través de la vista de la cara transversal, exhibiendo en la gráfica de colores los perfiles que conducen a considerar el inicio de grieta en la parte superior izquierda de la pieza fallada. Al respecto de los modelos de falla, el estudio fractográfico indica en todos los casos que la iniciación de grieta ocurrió en la superficie de la soldadura. Esto refleja una calidad al interior de la aplicación de los procesos desarrollados. El inicio de grieta en cargas cíclicas de fatiga en esta zona de superficie sugiere la ausencia de defectos como poros e inclusiones al interior del material depositado (Higashida et al., 1978; Lawrence et al., 1977). Esta premisa de nucleación superficial ha sido ampliamente estudiada (Ewing, JA. Humfrey, 1903; Fine & Kwon, 1986; Lin & Ito, 1969) y las teorías de iniciación de grieta respaldan la afirmación de la nucleación en las zonas del pie y la raíz de la soldadura. Esto debido a deslizamientos de planos no congruentes, los cuales se generan en el caso específico de la soldadura por el proceso de solidificación (Coniglio & Cross, 2013), el cual presenta morfologías diferentes de grano en la microestructura y ocasionando el fenómeno de concentración de esfuerzos en estos puntos del pie y la raíz de la soldadura, es decir en el límite de la zona afectada por calor o ZAC con la zona de

fusión (Riemelmoser et al., 2001; Tanaka & Mura, 1981). La propagación dentro del material se genera a partir de las dislocaciones que ocurren en la zona de fusión y con mayor o menor facilidad acorde a las durezas mostradas en el análisis previo que permiten el deslizamiento de planos y el crecimiento de la grieta, como lo mencionan diversos autores (Costa et al., 2010; Lardner, 1968). La Figura 38 presenta el análisis fractográfico de la pieza mostrada en la Figura 37.

Figura 38

Análisis fractográfico de probeta fallada de ensayo de fatiga para ASTM A36



Nota: Análisis fractográfico a 30x a), 50x b), 100x c), 300x d), 500x e), 1000x f).

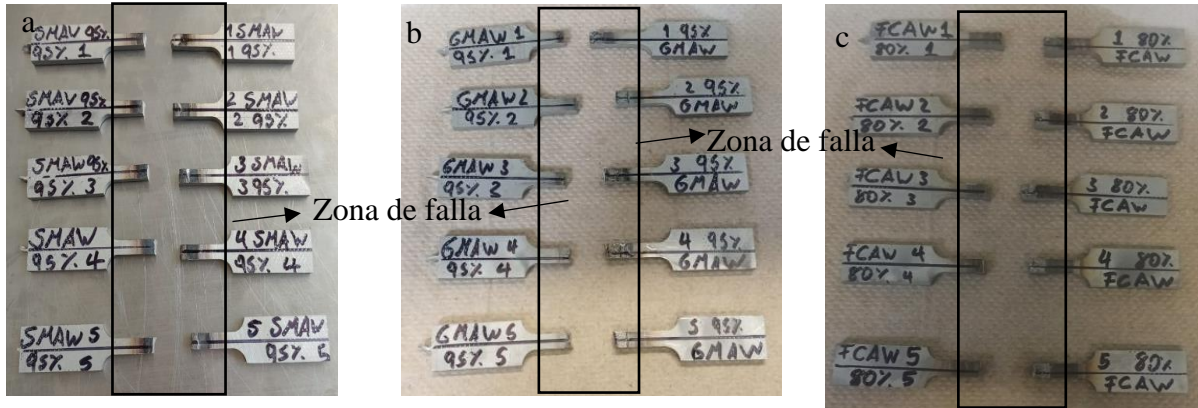
El análisis fractográfico validó el inicio de la grieta en la parte superior de las probetas. En los puntos señalados con A y B en la Figura 38.a). La grieta primaria determinada por ser la grieta que crece hasta generar la fractura se observa en el punto A, mientras que el punto B denota una grieta secundaria que no alcanza energéticamente a crecer y termina generando fisuras que no alcanzan la fractura. La sección inferior de la Figura 38.a). refleja la zona de fractura donde el área se hace insuficiente para resistir el esfuerzo aplicado. Esto genera arranques de material y la fractura. La propagación se realizó de forma plástica por la trayectoria marcada sobre las líneas trazadas a lo largo de los ciclos de carga. En la Figura 38.b), se presentan las líneas de propagación para la grieta primaria que denotan la trayectoria seguida por el crecimiento de esta grieta que inicia en el punto A. Las Figura 38.c), d), e) y f) se observa el análisis de la zona de iniciación de grieta señalada como A, presentando en específico las marcas de playa que denotan el crecimiento y propagación debido a la carga cíclica sobre el material. También permiten descartar defectos que pudieran indicar que la nucleación ocurrió en el interior del material, o que alguna discontinuidad o contaminación interior pudieran generar un daño adicional como concentradores de esfuerzo.

4.4.2. Ensayos de fatiga para AISI 316L

Para cada uno de los niveles de esfuerzo fueron ensayadas cinco probetas que permitieron establecer el comportamiento del material afectado por la soldadura. En la Figura 39 se presenta el conjunto de probetas falladas para este ensayo. Los puntos de fractura estuvieron siempre localizados en la zona de soldadura y como se presenta en el análisis a continuación se percibe la iniciación de grieta en la zona superficial, sobre el pie o la raíz de las soldaduras, y la propagación en la zona de fusión.

Figura 39

Probetas de ensayo de fatiga en AISI 316L

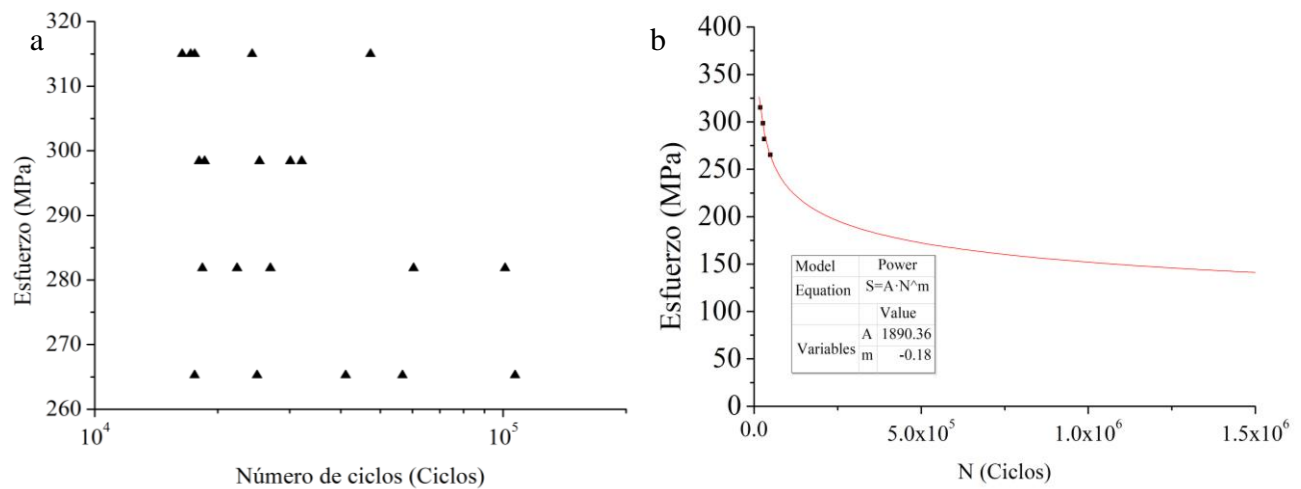


Nota: Probetas de AISI 316L con diversos procesos de soldadura falladas después de ensayo de fatiga, SMAW 95% Sy a), GMAW 95% Sy b), FCAW 80% Sy c).

La Figura 40 muestra la distribución de los puntos para el proceso FCAW y la curva S-N de Basquin acorde al tratamiento de datos realizado. Se encontraron los valores de durabilidad a través de Weibull para cada nivel de esfuerzo por cada proceso de soldadura.

Figura 40

Curva S-N generada del conjunto de probetas AISI 316L bajo proceso de soldadura FCAW



Nota Ciclos de muestras falladas a), Curva S-N del comportamiento del material b).

Fueron calculadas las curvas de esfuerzo versus número de ciclos con el propósito de obtener los parámetros de la ecuación característica de Basquin. La Tabla 20 presenta estos datos.

Tabla 20

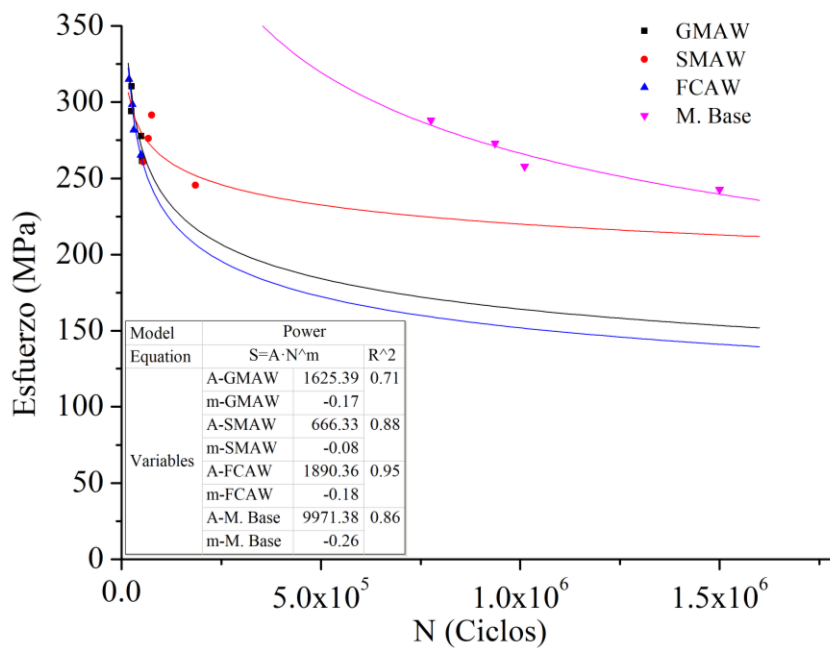
Ecuación de la curva S-N para AISI 316L bajo procesos de soldadura

Proceso	Ecuación de la recta S-N	Coefficiente m	Variable A
SMAW	$S = 666.33(N)^{-0.08}$	-0.08	666.33
GMAW	$S = 1625.39(N)^{-0.17}$	-0.17	1625.39
FCAW	$S = 1890.36(N)^{-0.18}$	-0.18	1890.36

La Figura 41 muestra el conjunto de curvas de resistencia a la fatiga en el intervalo de esfuerzos planteado para el material AISI 316L con el propósito de realizar el comparativo y establecer las relaciones presentes.

Figura 41

Curvas S-N para AISI 316L sometido a procesos de soldadura y material base



Se observa una disminución de la durabilidad de ciclos en las muestras soldadas respecto del material base que no posee afectación por soldadura en la zona de bajos ciclos, en casi un orden de valor respecto al proceso de soldadura más durable que corresponde al SMAW. Esta disminución es un comportamiento típico en los procesos de soldadura acorde a Pollard, indistintamente del proceso aplicado (Pollard & Cover, 1972), DuPont menciona procesos de suavizado o reblandecimiento producto de la afectación térmica (DuPont N. et al., 2013), este mecanismo es conocido como sensibilización del acero, el cual ocurre debido a la formación de carburos de cromo en los límites de grano del material, originando corrosión intergranular (Arora et al., 2021). Sin embargo es más común en los aceros inoxidable austeníticos de alto contenido de carbono, como el AISI SAE 304, AISI SAE 316, AISI SAE 347 y AISI SAE 321 (Kumar Singh & Arora, 2015). Asimismo, el niobio como estabilizador de la sensibilización o procesos de baja entrada de energía reducen la probabilidad de presencia de este defecto (American Welding Society (AWS), 2017). El fenómeno de sensibilización genera esta reducción notoria de la resistencia a fatiga respecto del material base. Lippold enfatiza en la disminución de esta resistencia a la fatiga debido a una homogenización del crecimiento de grano, debido a las temperaturas elevadas de la soldadura, las dislocaciones en la estructura cristalina del acero inoxidable austenítico pueden reordenarse, formando nuevos granos, más grandes y menos deformados que los originales, lo que reduce la dureza y la resistencia del material en la ZAC. Esto lo contrasta la medición de los perfiles de dureza en la zona de aporte presentada en la Figura 26. Esto producto de la tasa de enfriamiento en el material la cual fue presentada en la Tabla 14 (Lippold & Kotecki, 2005).

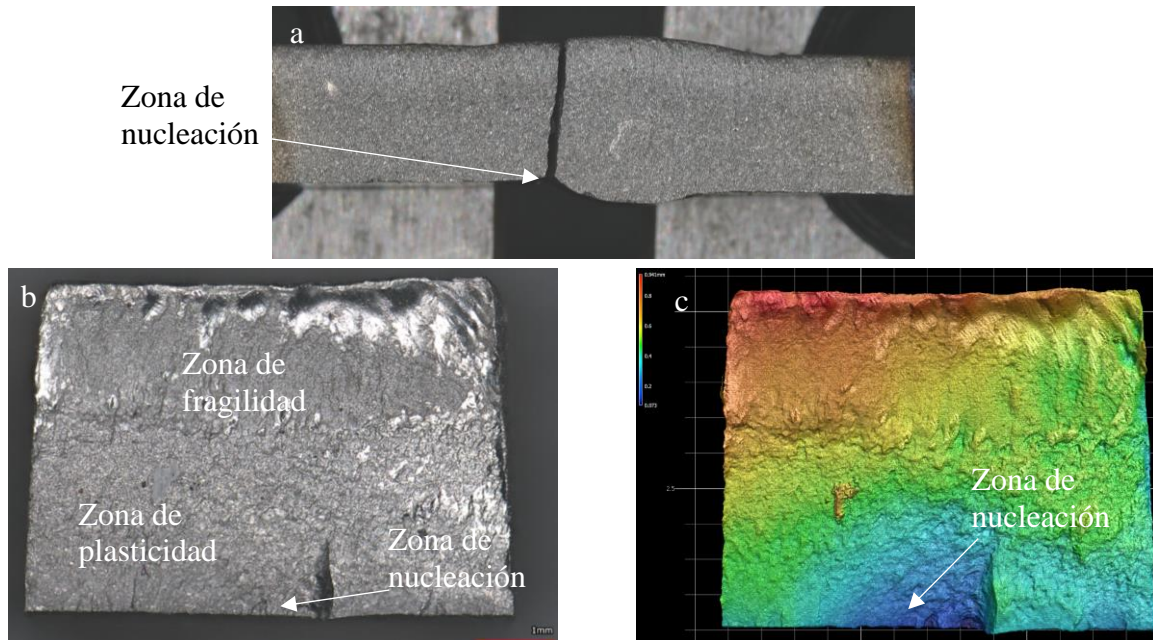
Encontrar una relación entre el modelo microestructural y el comportamiento a fatiga es necesario. Debido a que diversos autores (Hernández-Trujillo et al., 2021; Peng et al., 2020;

Unnikrishnan et al., 2014) han encontrado particularidades que conllevan a concluir que el tamaño de grano obtenido en la zona afectada por calor, y su límite hacia la zona de fusión, en la cual se encuentran dos microestructuras diferentes como el metal base afectado y el material de aporte, resulta coherente con el comportamiento a fatiga. De esto puede inferirse que la diferenciación morfológica del grano en la ZAC y el crecimiento dendrítico en la zona de fusión, ambos promovidos por la afectación de calor, generan la nucleación de grieta. Con la adición energética del ensayo dinámico se genera incongruencia entre los planos de deslizamiento de una estructura dendrítica de la zona de fusión sobre una estructura de grano heterogénea presente en la ZAC . Esto ubica la nucleación siempre en la misma zona superficial de pie o raíz de la soldadura. Aunado a esta condición la fase de propagación se da de forma más precipitada en los procesos GMAW y FCAW que ofrecieron menor homogenización de la zona ZAC según la Figura 23.

Si se procura establecer una correlación entre los parámetros asociados a los procesos, diversos autores reflejan la influencia de la entrada de energía (Flores et al., 2016; Reddy et al., 2010). La durabilidad en ciclos antes de la fractura refleja el mismo orden descendente acorde al nivel de entrada de energía de cada proceso, esta relación numérica y de ordenamiento a este comportamiento puede constatarse desde la Tabla 14. Esto se representa en que el proceso SMAW reporta 2494 J/mm y tiene la más alta resistividad en ciclos, el proceso FCAW reporta 2076.8 J/mm y finalmente el proceso GMAW con 1462.5 J/mm, ambos con valores inferiores en resistividad respecto del proceso SMAW. La Figura 42 presenta una probeta analizada bajo esquemas fractográficos y corresponde a una de las probetas de comportamiento extremo dentro del ensayo de fatiga para el proceso SMAW.

Figura 42

Localización de falla en probetas de fatiga de AISI 316L

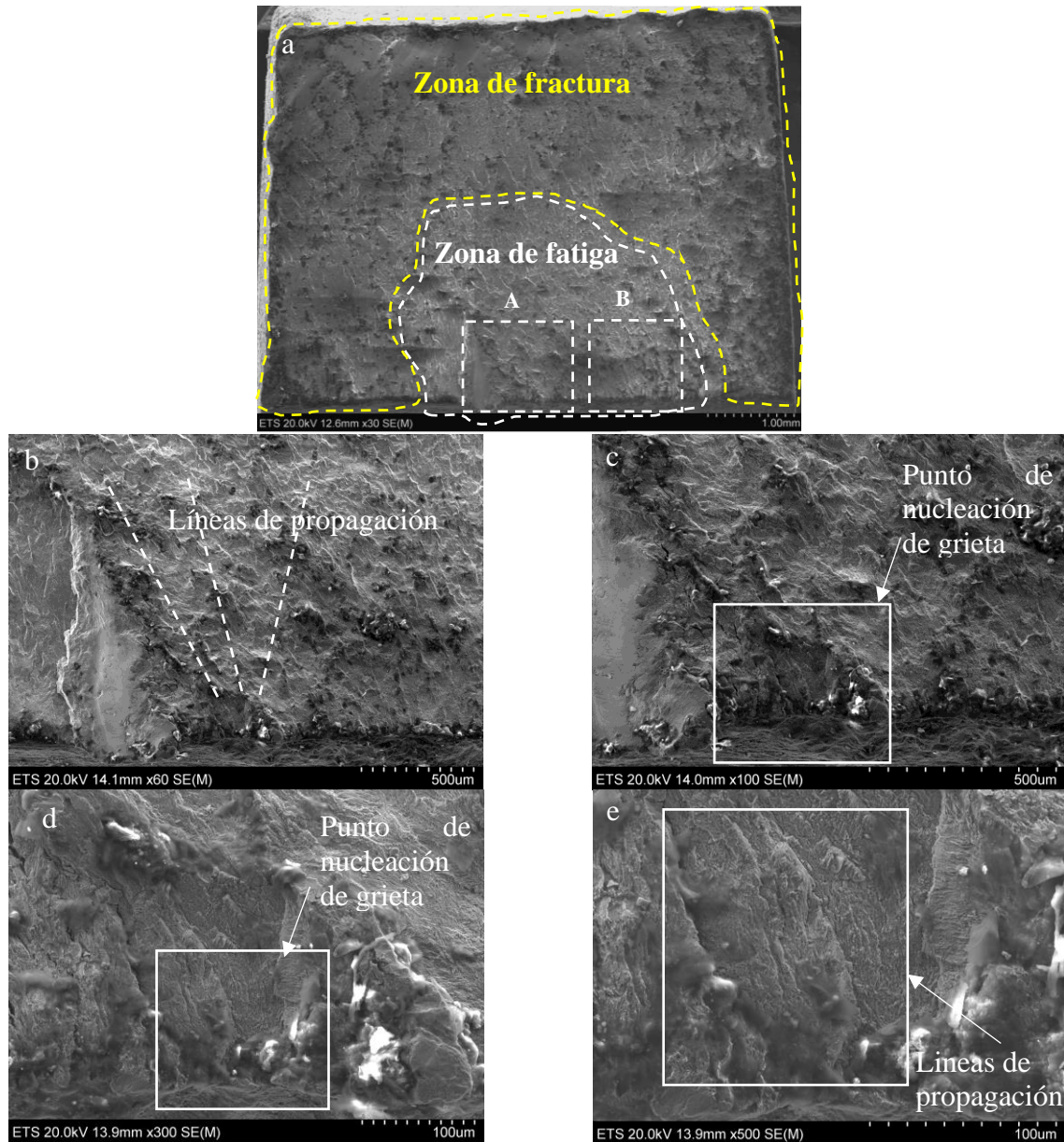


Nota: Probeta SMAW SS4- SS905 con falla por nucleación de grieta en raíz de soldadura a), Perfil óptico de la superficie de falla b), Análisis de alturas en superficie fallada c).

La Figura 42.a) presenta la sección longitudinal de la probeta de AISI 316L bajo proceso SMAW a un nivel de esfuerzo de 90% del límite elástico S_y . Sobre la imagen se puede percibir que el proceso de nucleación surge desde la raíz de la soldadura, en la parte inferior y genera la trayectoria de propagación sobre la zona de fusión. Las Figura 42.b) y c). muestran a partir de un análisis de alturas el inicio de grieta en sección transversal, surgiendo desde la parte inferior a la izquierda de donde se observa un corte que corresponde al encuentro de la grieta primaria que crece hasta la fractura y una grieta secundaria que no obtuvo la energía suficiente para crecer. Se realizó también un análisis de nucleación para cada una de las piezas revisadas, en la Figura 43 se presentan las imágenes SEM para la pieza referida en la Figura 42.

Figura 43

Análisis fractográfico de probeta fallada de ensayo de fatiga para AISI 316L



Nota: Análisis fractográfico a 30x a), 60x b), 100x c), 300x d), 500x e).

Es posible desde la Figura 43 asociar la situación mostrada en la Figura 39. Donde se constata nuevamente el comportamiento homogéneo de la trayectoria de falla, indistintamente del proceso de soldadura aplicado, dado que todas las fallas surgieron desde la superficie y las

fractografías no permiten percibir presencia ni conexión con defectos internos del material. Esta condición redundante en manifestar la calidad de la soldadura aplicada que refleja inicios de grieta en la zona de pie o raíz de las soldaduras, dando paso a que la zona de iniciación siempre surgió en la superficie para las probetas procesadas. Lo cual, también permite descartar inicios de grieta al interior del material soldado, producto de poros, discontinuidades, faltas de fusión, o defectos asociados a la fabricación.

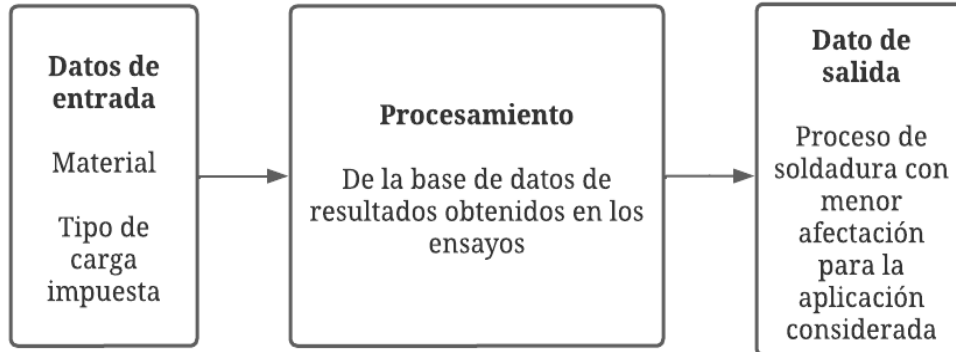
El análisis presentado en la Figura 43.a) permitió la ubicación de la nucleación de grieta en la raíz de la soldadura. Diversos autores plantean la generación de carburos de cromo y de ferrita al interior de la ZAC en la microestructura del material (Eroğlu et al., 1999; Lawrence et al., 1977; Macdonald, 2011; X. F. Zhang et al., 2012). Esta condición incrementa la probabilidad de formación de los defectos mencionados, poros, discontinuidades, faltas de fusión, o defectos asociados a la fabricación, que generan la nucleación al interior del material. De manera metodológica se planteó reducir esta clase de formaciones con la selección de los materiales de aporte. Esta premisa condicionó la formación preferente en austenita de la microestructura que fue tratada en la sección 4.1.2 de este documento. Relacionando esta decisión metodológica, los análisis fractográficos reflejaron que la totalidad de las probetas tuvieron su nucleación en la superficie, presentándose esta en la raíz o en el pie de las soldaduras realizadas. Las Figuras 43.b y c. permiten identificar las líneas de propagación provenientes de la grieta primaria y que exhiben la trayectoria seguida por el crecimiento de grieta ocurrido. Asimismo, las Figuras 43.d) y e) presentan el punto de iniciación de grieta y pueden distinguirse las líneas de playa características de la carga cíclica.

5. Desarrollo del modelo matemático

Con los resultados obtenidos en la sección previa se planteó el desarrollo de un sistema que generando interacción entre los valores conseguidos, permita la selección de un proceso de soldadura que favorezca el desempeño del material a trabajar acorde al tipo de carga en servicio que le sea impuesto. Lo cual ofrece beneficios para los escenarios de diseño estructural, así como de elementos de máquina. De igual forma representa un aporte científico para el uso en modelos de reparación y mantenimiento de equipos y estructuras que incluya los procesos de soldadura como parte de la intervención. La Figura 44 plantea esquemáticamente la operación del modelo generado.

Figura 44

Funcionamiento del modelo matemático planteado

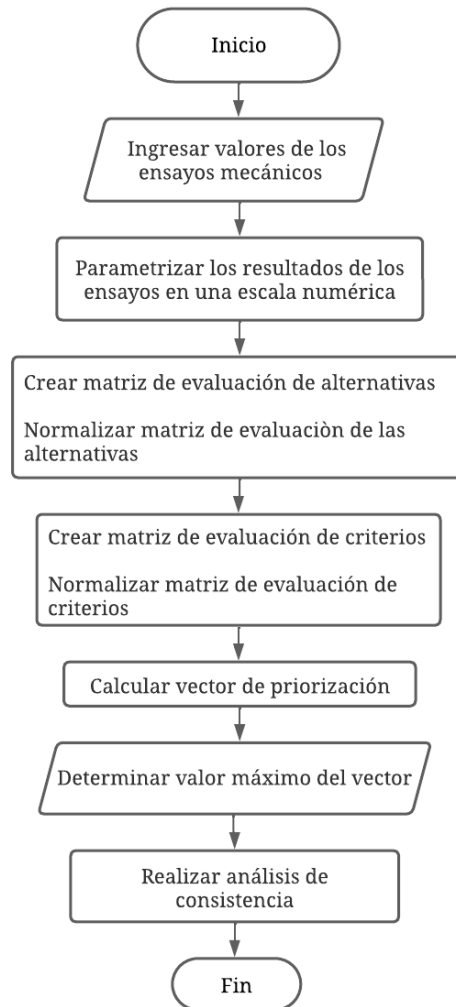


De acuerdo a las variables y su interacción el modelo matemático de selección propuesto para este sistema de ejecución es el Análisis Jerárquico de Proceso o AHP formulado por Thomas Saaty (Saaty, 1987). Sobre este modelo ampliamente estudiado se planteó el desarrollo para el proceso de selección basado en un algoritmo que permite obtener un esquema del modelo matemático empleando el funcionamiento presentado y la utilización de las variables conseguidas

en los ensayos mecánicos aplicados a los materiales dentro del marco experimental ejecutado. La Figura 45 presenta este algoritmo que de forma sistémica fue utilizado.

Figura 45

Algoritmo de aplicación de AHP para selección de procesos de soldadura



De esta forma puede referirse que el desarrollo matemático del AHP se basa en la descomposición del problema en una jerarquía, la comparación de juicios para determinar la importancia relativa de los elementos y la síntesis de prioridades utilizando evaluaciones matemáticas.

La fragmentación de un problema como la selección del proceso de soldadura basada en tantos criterios es compleja. Por esto la propuesta del AHP desarrolla en varios niveles la ejecución, la cual consiste en dividir el juicio de selección en partes más pequeñas para poder compararlas más fácilmente. Este proceso consta de tres pasos, identificar los atributos que son importantes para el problema y asignarles un peso relativo. Posteriormente evaluar cada alternativa con respecto a cada atributo y asignarle un peso relativo, el cual es determinado a través de la influencia que cada atributo pueda generar sobre el parámetro final de decisión que se busca. Y finalmente combinar los pesos relativos de los atributos y las alternativas para determinar la mejor opción. A juicio de esta consideración, fueron tomados los resultados de los ensayos mecánicos. Dado que estos valores son variables determinantes en el proceso de diseño y que tienen incidencia directa en el desempeño del material trabajado. En la Tabla 21 se presentan los datos utilizados para el proceso AHP.

Tabla 21

Resultados de ensayos mecánicos en ASTM A36 utilizados en el proceso AHP

Proceso	Límite elástico Sy [MPa]	Dureza [HV]	Esfuerzo a 10⁶ ciclos	Coefficiente de endurecimiento dinámico
SMAW	314.31	199.82	247.80	-0.11
GMAW	308.80	210.00	217.65	-0.14
FCAW	318.44	228.71	216.33	-0.17

También, se compilaron los datos para procesar el AHP con el material AISI 316L. Estos datos se presentan en la Tabla 22. El valor de límite para el número de ciclos en el ensayo de fatiga fue seleccionado acorde a dos premisas. La primera es que el valor debía estar disponible

transversalmente para todos los procesos y la segunda es que este valor debe localizarse donde represente el valor más cercano al límite de fatiga del material base, es decir, el valor más bajo común a todos los procesos aplicados.

Tabla 22

Resultados de ensayos mecánicos en AISI 316L utilizados en el proceso AHP

Proceso	Límite elástico Sy [MPa]	Dureza [HV]	Esfuerzo a 10 ⁶ ciclos	Coefficiente de endurecimiento dinámico
SMAW	306.77	192.19	219.86	-0.08
GMAW	326.74	193.72	164.55	-0.17
FCAW	331.56	198.78	151.73	-0.18

En lo sucesivo se plantea el modelo con los valores obtenidos gestando el paso a paso.

5.1. Paso 1 Normalización de criterios

El establecimiento de los criterios estáticos o dinámicos que se implementan para el proceso de selección permite el desarrollo de la cuantificación de valores obtenidos desde los ensayos mecánicos. La normalización se desarrolló a dos pasos. Desde el valor numérico se aplicó una normalización de escala de cero a uno y enseguida la normalización de 1 a 9 aplicando el modelo de la Ecuación 9.

Ecuación 9: Normalización de escala cero a uno y uno a nueve.

$$Normalización\ de\ 0 - 1 = \frac{X_i - X_{menor}}{X_{mayor} - X_{menor}}$$

$$Normalización\ de\ 1 - 9 = X_{i_{0-1}} * (9 - 1) + 1$$

Donde el valor X_i corresponde al valor evaluado dentro del primer ensamble de matriz de criterios provenientes del resultado de ensayos mecánicos. Las Tabla 23 y Tabla 24 presentan las matrices de criterios normalizada para el material ASTM A36. Nótese que los valores han sido ordenados de menor a mayor valor para dar coherencia en la operación de normalización.

Tabla 23

Matriz normalizada de criterio límite elástico para carga estática en ASTM A36

Límite elástico			
Alternativa	Valor	Valor de 0 a 1	Valor de 1 a 9
A36 GMAW	308.80	0	1.00
A36 SMAW	314.30	0.57	5.58
A36 FCAW	318.40	1.00	9.00

Tabla 24

Matriz normalizada de criterio dureza para carga estática en ASTM A36

Dureza			
Alternativa	Valor	Valor de 0 a 1	Valor de 1 a 9
A36 SMAW	199.82	0	1
A36 GMAW	210	0.35	3.82
A36 FCAW	228.71	1	9

Puede observarse que dichos valores empleados a pesar de poseer unidades, en este caso Megapascales [MPa] o Vickers [HV], son utilizados sin estas unidades. Debido a que son manejados como referencia para determinar una posición o relevancia del proceso y no como un

estricto valor de propiedad del material. Entonces las unidades bajo las que son regidos carecen de relevancia y la interpretación fundamental será establecer si la escala es favorable o desfavorable en términos de reconocer si su mayor o menor valor mejora la condición del criterio. Esto es si un valor al ser más alto o bajo representa que el material posee mejor comportamiento. La interpretación de los datos de las columnas normalizadas bajo la misma óptica de Saaty se plantea en la Tabla 25. Presentando una escala de influencia desde muy leve o casi nula hasta un modelo de extrema influencia en relación de un proceso, un criterio o una alternativa dentro del mismo proceso de selección.

Tabla 25

Parámetros de influencia de Saaty para calificación del AHP

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igualmente preferida.	Dos alternativas contribuyen en igual medida.
3	Moderadamente preferida.	Una alternativa es preferida levemente sobre la otra.
5	Fuertemente preferida.	Una alternativa es preferida fuertemente sobre la otra.
7	Muy fuertemente preferida.	Una alternativa ha sido demostrada mejor que la otra.
9	Extremadamente preferida.	Una alternativa es preferida absolutamente sobre la otra.

Los valores pares de esta escala representan valores intermedios de la escala verbal, esto es que no cumplen estrictamente uno de los dos criterios y se encuentran entre los dos extremos.

5.2. Paso 2 Establecimiento de la matriz de ponderación de criterios

En esta sección se establece a partir de la escala mostrada en la Tabla 25, el nivel de preferencia de un criterio sobre otro. Para la aplicación desarrollada en el modelo estático se

plantearon dos criterios, el límite elástico y la dureza, debido a su relevancia en el proceso de diseño y selección de materiales. Posteriormente se realizó con el número de ciclos resistivos a la fatiga y el coeficiente de endurecimiento por deformación dinámico, como valores de referencia obtenidos del ensayo dinámico. La selección del valor de influencia puede establecerse si se consideran los parámetros empleados en el proceso de diseño para los componentes estáticos para los cuales no se les ha considerado la fluencia. En la Tabla 26 se presenta el desarrollo de esta matriz. El razonamiento de esta calificación de un criterio contra el otro se aplica a juicio de la influencia que se tenga sobre este criterio en los procesos de diseño a pesar de existir entre estos dos criterios relaciones matemáticas de amplio conocimiento (Tabor, 1951). Al desarrollar la matriz, se establece que la posición inversa de la evaluación del criterio posea el valor del recíproco asignado.

Tabla 26

Matriz de criterios para carga estática en ASTM A36

Evaluación entre criterios		
Criterio	Límite elástico S_y	Dureza
Límite elástico	1.00	9.00
Dureza	1.00/9.00	1.00
Suma	1.11	10.00

El valor de 9.00 es la asignación del valor de un criterio respecto a otro, aquí representa la influencia del límite elástico como parámetro empleado en un proceso de diseño frente a lo que podría emplearse el valor de dureza como referencia para el mismo diseño. El recíproco de este valor se posiciona entonces en la casilla de relación entre la dureza y el límite elástico.

5.3. Paso 3 Matriz de criterios y obtención del vector promedio

Obtenida la matriz de criterios se normaliza usando la Ecuación 10. Lo cual permite obtener un valor numérico en escala de cero a uno para los valores asignados en la Tabla 26.

Ecuación 10: Normalización de matriz de ponderación de criterios

$$Valor\ normalizado = \frac{X_i}{\sum_{i=1}^m X_i}$$

Donde *i* representa el valor de posición de cada elemento de la matriz y el término inferior la sumatoria de la columna a la que pertenece el valor *X_i* evaluado. En la Tabla 27 se presenta la matriz normalizada y el vector promedio que corresponde al valor promedio de cada fila dentro de dicha matriz.

Tabla 27

Matriz normalizada de criterios y vector promedio para carga estática en ASTM A36

Matriz normalizada de criterios			
Criterio	Límite elástico	Dureza	Vector promedio
Límite elástico	1.00/1.11	9.00/10.00	0.90
Dureza	(1.00/9.00)/1.11	1.00/10.00	0.10

5.4. Paso 4 Matriz de alternativas y obtención del vector promedio

Se realiza el ensamble de la matriz de alternativas que para el caso considerado corresponde al conjunto de procesos de soldadura sobre los que se ha realizado el trabajo experimental. Los valores de interacción serán desarrollados para cada una de las matrices de criterios desarrolladas anteriormente. Esto es una matriz de alternativas donde se contemplan los procesos de soldadura con relación a los valores obtenidos en las matrices normalizadas para los criterios de carga

estática. Se considera el valor obtenido en la normalización de 1 a 9 y su inverso será el valor recíproco. Esto permite evaluar las alternativas frente a cada criterio. Al finalizar el montaje, sobre cada columna de matriz también se realiza la sumatoria de valores de dicha columna para inmediatamente generar la normalización de la matriz planteada. De forma similar a lo presentado en la Tabla 27 y aplicando la Ecuación 10. En la Tabla 28 y la Tabla 29 se presentan las matrices de alternativas para el límite elástico y la dureza respectivamente.

Tabla 28

Matriz de alternativas del criterio de límite elástico para carga estática en ASTM A36

Matriz de alternativas para límite elástico en ASTM A36			
	A36 SMAW	A36 GMAW	A36 FCAW
A36 SMAW	1.00	5.58	0.62
A36 GMAW	0.18	1.00	0.11
A36 FCAW	1.61	9.00	1.00
Suma	2.79	15.58	1.73

Tabla 29

Matriz de alternativas del criterio de dureza para carga estática en ASTM A36

Matriz de alternativas para dureza en ASTM A36			
	A36 SMAW	A36 GMAW	A36 FCAW
A36 SMAW	1.00	0.26	0.11
A36 GMAW	3.82	1.00	0.42
A36 FCAW	9.00	2.357	1.00
Suma	13.82	3.62	1.54

Como puede constatarse, sus valores vienen de la Tabla 23. Se considera también que los operadores aplicados a la Tabla 28 y la Tabla 29 preservan la coherencia de valores que requiere la relación. Esto es que a pesar de presentar un orden específico de menor a mayor las tablas normalizadas presentadas en la Tabla 23, para el punto de matriz de alternativas y obtención del vector promedio se opera con los valores correspondientes a cada proceso de soldadura.

Se presentan de forma consecutiva las matrices normalizadas para ambos procesos en Tabla 30 y la Tabla 31 Para su obtención fue utilizada la Ecuación 10 presentada anteriormente y desarrollado nuevamente el vector promedio para la matriz de alternativas bajo cada criterio.

Es de resaltar que, bajo este esquema de preparación de la información, el paso 4 será repetido tantas veces como criterios se tengan para recalcular vectores promedio de alternativas. Lo cual permite concluir que el modelo puede ser permanentemente alimentado con nuevos datos que enriquezcan el proceso de decisión, y entre los cuales pueden plantearse nuevos materiales, nuevos procesos o nuevas caracterizaciones de comportamiento frente a otros esquemas de trabajo.

Tabla 30

Matriz normalizada de alternativas del límite elástico para carga estática en ASTM A36

Matriz normalizada de alternativas para límite elástico en ASTM A36				
	A36 SMAW	A36 GMAW	A36 FCAW	Vector promedio
A36 SMAW	0.36	0.36	0.36	0.36
A36 GMAW	0.06	0.06	0.06	0.06
A36 FCAW	0.58	0.58	0.58	0.58

Tabla 31

Matriz normalizada de alternativas de dureza para carga estática en ASTM A36

Matriz normalizada de alternativas para dureza en ASTM A36				
	A36 SMAW	A36 GMAW	A36 FCAW	Vector promedio
A36 SMAW	0.07	0.07	0.07	0.07
A36 GMAW	0.28	0.28	0.28	0.28
A36 FCAW	0.65	0.65	0.65	0.65

5.5. Paso 5 Matriz de vectores promedio

Se realiza el ensamble de la matriz de vectores promedio con los resultados del paso anterior. En la Tabla 32 se presenta la matriz de vectores promedio ensamblada con los valores provenientes de la última columna de la Tabla 30 y la Tabla 31.

Tabla 32

Matriz ensamblada de vectores promedio de alternativas para carga estática en ASTM A36

Matriz de vectores promedio de matrices de alternativas		
Alternativa/Criterio	Límite elástico	Dureza
A36 SMAW	0.36	0.07
A36 GMAW	0.06	0.28
A36 FCAW	0.58	0.65

5.6. Paso 6 Generación del vector final de jerarquización

Para obtener el vector final de jerarquización se realiza el producto punto expresado en la Ecuación 11.

Ecuación 11: Vector de jerarquización de alternativas

$$V_j = \begin{bmatrix} \overline{m}_{11} & \cdots & \overline{m}_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{n}_{p1} & \cdots & \overline{n}_{pq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{s} \\ \overline{t} \end{bmatrix}$$

Donde se ha declarado que el primer término corresponde a la matriz inicial proveniente del ensamble de los vectores promedio de la matriz de alternativas evaluadas bajo cada criterio presentada en la Tabla 32. Y el segundo término al vector promedio de la matriz de criterios generado en la Tabla 27. La Tabla 33 presenta este resultado final que culmina el proceso de jerarquización de este segmento. Para cada segmento de carga debe realizarse el conjunto de seis pasos hasta aquí descrito. Esto permite obtener el conjunto de procesos de soldadura por arco eléctrico jerarquizados para los materiales de estudio y facilitando su selección a partir de sus características estáticas y dinámicas.

Tabla 33

Vector final de jerarquización estática para ASTM A36

Vector ponderado de jerarquización estática ASTM A36		
A36 SMAW	0.33	32.97 %
A36 GMAW	0.08	8.54 %
A36 FCAW	0.58	58.49 %

El resultado de este vector de jerarquización puede interpretarse como un valor porcentual. Por cuanto en la columna de la derecha ha sido multiplicado por un factor porcentual para que sea interpretado como el valor más representativo frente a una escala de cien por ciento que se asigna al proceso recomendado, el cual será el que obtenga el valor más elevado, para el caso específico del segmento estático para el material ASTM A36. De igual manera que se trabajó el modelo AHP

para la jerarquización del proceso de soldadura por arco eléctrico para juntas que tendrán cargas estáticas en el material ASTM A36, se procesaron las tablas correspondientes de jerarquización para el modelo dinámico de ASTM A36 y los dos modelos de carga estática y dinámica para el material AISI 316L. Este modelo permite procesar de forma individual el conjunto de datos de jerarquización, debido a que un modelo estático excluye a un modelo dinámico dentro del marco operativo que tendrá un elemento soldado y por tanto no pueden acoplarse en un único proceso de jerarquización. En la Tabla 34, la Tabla 35 y la Tabla 36 se presentan los vectores finales de jerarquización para cada modelo de carga y cada material evaluado en el alcance experimental de esta investigación.

Tabla 34

Vector final de jerarquización dinámica para ASTM A36

Vector ponderado de jerarquización dinámica ASTM A36		
A36 SMAW	0.76	76.16 %
A36 GMAW	0.15	15.37 %
A36 FCAW	0.08	8.46 %

Tabla 35

Vector final de jerarquización estática para AISI 316L

Vector ponderado de jerarquización estática AISI 316L		
316-L SMAW	0.06	5.94 %
316-L GMAW	0.41	40.63 %
316-L FCAW	0.53	53.43 %

Tabla 36

Vector final de jerarquización dinámica para AISI 316L

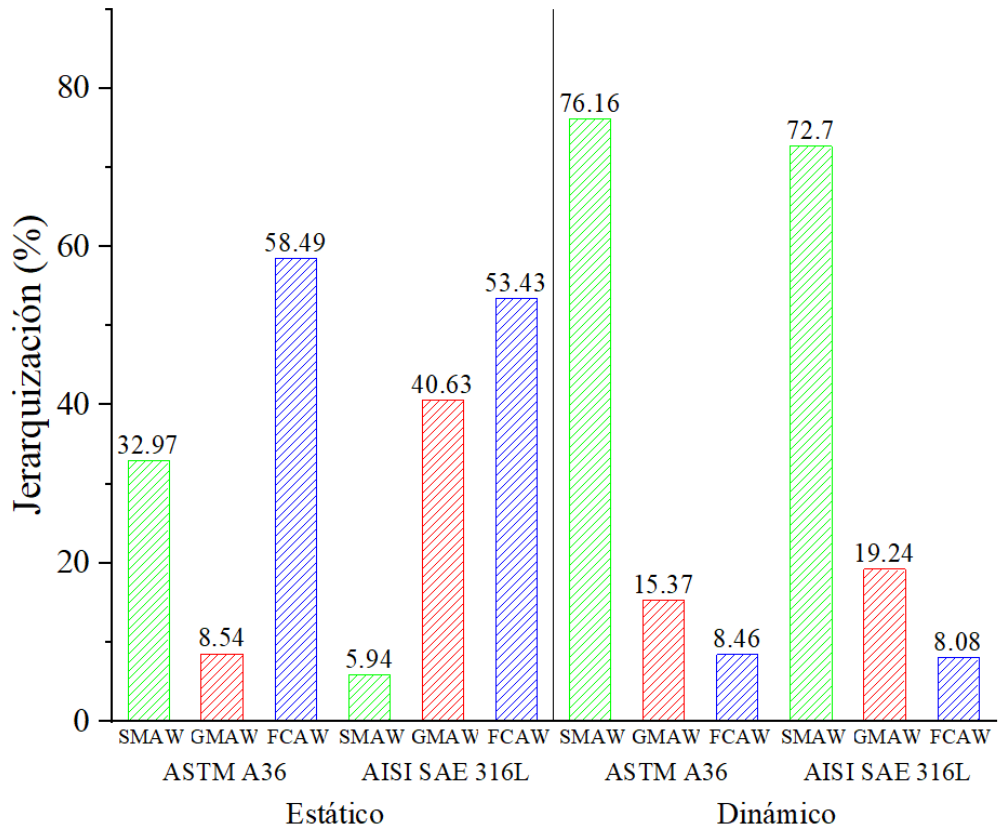
Vector ponderado de jerarquización dinámica AISI 316L		
316-L SMAW	0.72	72.69 %
316-L GMAW	0.19	19.24 %
316-L FCAW	0.08	8.08 %

Como nota de validación puede observarse que los resultados del modelo concuerdan con los análisis presentados en la etapa experimental y la sumatoria de cada vector de jerarquización preserva el valor de unidad. Esto redundará en el cumplimiento de consistencia del modelo.

Los vectores jerarquizados representan entonces la solución al planteamiento de decisión desde el enfoque planteado de argumentar la selección en el desempeño de características estáticas y dinámicas de desempeño del material soldado. Como compendio general de los resultados de esta jerarquización y ratificación de los resultados experimentales, la Figura 46 presenta un gráfico de barras agrupadas con los resultados.

Figura 46

Resultados de jerarquización de procesos de soldadura bajo AHP



La Figura 46 presenta un resumen sobre el proceso de jerarquización desarrollado que concuerda con el trazado experimental realizado. En este gráfico de barras agrupadas se percibe la conveniencia del proceso de soldadura por arco eléctrico FCAW para los modelos estáticos en los dos materiales ASTM A36 y AISI 316L y la prioridad del proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW para esquemas de aplicación de carga dinámica o fatiga para ambos procesos también.

6. Conclusiones

Tomando en consideración los objetivos planteados y a través de la ejecución de las actividades realizadas desde el planteamiento experimental y los resultados y discusiones generadas, así como el desarrollo del modelo matemático se formulan las siguientes conclusiones.

La localización de las secciones de falla para las condiciones de carga estática y dinámica en las juntas soldadas fueron diferentes, lo que permite percibir que los comportamientos asociados a cada condición requieren un análisis independiente, basados en los valores encontrados. Este análisis influencia la implementación del modelo matemático como elemento de decisión para la selección del proceso de soldadura por arco eléctrico adecuado. La diferenciación del desempeño de los materiales sometidos a soldadura bajo esquemas de carga fue segmentada de forma adecuada por el modelo matemático propuesto, el cual a través de su aplicación permitió cuantificar el nivel de preferencia de un proceso sobre otros a través de la ponderación de su comportamiento.

Las fases predominantes de ferrita alotriomórfica y ferrita Widmanstätten presentes en la zona de fusión de la revisión microestructural del material ASTM A36 permitieron asociar el comportamiento mecánico de las muestras. En el material ASTM A36 al cual se le aplicó el proceso de soldadura FCAW mostró un modelo de crecimiento más ordenado en la dirección epitaxial en la zona de fusión, así como un mejor ordenamiento de las fases respecto a la reducción de presencia de ferrita Widmanstätten, lo que refleja su preferencia para modelos estáticos. La afectación negativa más alta se generó en los dos procesos restantes, el SMAW y el GMAW, donde la ferrita Widmanstätten predominó. Sin embargo, estas fases no formaron parte de la zona de falla en el ensayo estático de tracción. Por cuanto la ubicación de la zona de falla generada en el metal base concede la atribución al valor de dureza en esta zona específica.

El crecimiento dendrítico constituido por austenita en la zona de fusión para el material AISI 316L identificado en el análisis microestructural presente en los tres procesos de soldadura permite relacionar a partir de las observaciones que existe una diferenciación en el tamaño y la demarcación de las dendritas atribuible, acorde a referencias bibliográficas, a las temperaturas alcanzadas y a los modelos de enfriamiento del material, aun cuando la intensidad de corriente del proceso es la que marca la diferencia para cada caso, beneficiando el tamaño y definición dendríticos al proceso FCAW, posteriormente al GMAW y finalmente al proceso SMAW. Esto en comportamiento estático no representa efectos, dado que la localización de falla se genera en la zona del metal base.

Los cambios súbitos que fueron evidenciados en las pendientes de los perfiles de dureza en el material ASTM A36 se vieron relacionados de manera inversa por la intensidad de corriente del proceso. En el comportamiento estático esto no representó repercusión debido a la ubicación de la rotura del ensayo. Sin embargo, en el ensayo dinámico pudo verse reflejado en la baja durabilidad del proceso FCAW que fue el que presentó el mayor ascenso de dureza. En este material se obtuvieron incrementos de dureza de hasta 82 HV respecto del material base. Para el proceso GMAW se encontraron variaciones de hasta 64 HV y para el proceso SMAW de 34 HV.

Las fluctuaciones del perfil de dureza en el material AISI 316L tuvieron cambios representativos de hasta 30 HV, esto sin presentar ascensos abruptos como las pendientes de ascenso del perfil de dureza mostrado para el ASTM A36. La condición de imposibilidad de endurecimiento debido a tratamientos térmicos del material AISI 316L pudo influir en este comportamiento. El tamaño de la zona afectada por calor en este material aun siendo más pequeño respecto a los tamaños de la misma zona en ASTM A36 denota que los cambios en dureza son generados por la dilución del material de aporte y las transformaciones ocurridas en el material

base producto de la influencia térmica en la ZAC y no ocasionados por fenómenos de endurecimiento debido a tratamientos térmicos atribuibles a la afectación térmica de la soldadura.

Producto de la unión por soldadura se generan cambios sustanciales en el porcentaje de alargamiento del material ASTM A36 bajo esfuerzo axial. Se presenta hasta 42.6% de reducción del comportamiento habitual, este valor en el proceso FCAW, 37.7% de reducción para el proceso GMAW y un 34.16% de disminución del porcentaje de alargamiento para el proceso SMAW. La adición del material de aporte con propiedades mecánicas más altas que las del material base es uno de los motivos que origina esta condición. La dilución del material de aporte y el metal base en la zona afectada por calor también contribuyó a esta alteración.

La intensidad de corriente refleja una influencia en los cambios de las propiedades mecánicas del material AISI 316L durante los ensayos estáticos. Se genera la relación directa con estas variaciones, el proceso FCAW que tuvo la mayor cantidad de intensidad de corriente mostró un incremento del 9.3% en el valor del límite elástico respecto del material base, el proceso GMAW tuvo un aumento del 7.7% y el proceso SMAW de solo 1.1%. Los cambios microestructurales y la dureza ratificaron este comportamiento a través de la determinación del tamaño de grano del material afectado por los procesos de soldadura, que conservando el mismo orden descendente de valores presentó al proceso FCAW como el de mayor beneficio para el comportamiento de carga estática.

La localización de la nucleación de grieta en el ensayo dinámico tuvo similar comportamiento para los dos materiales y todos los procesos de soldadura aplicados, arrojando como consecuencia del análisis que la incongruencia entre la microestructura de la ZAC y de la zona de fusión originó planos dislocados. La ubicación de la nucleación también validó la ausencia de discontinuidades internas y permitió enfocar la resistencia en ciclos del material al escenario de

la propagación, donde la disminución de la plasticidad presentó coherencia con los datos encontrados en la revisión microestructural. El proceso FCAW para ambos materiales favoreció la formación de granos más pequeños en comparación con los otros procesos de soldadura aplicados. Esto tuvo como consecuencia su desfavorabilidad en el ensayo de fatiga, con descensos de 65% de su durabilidad en ASTM A36 y de 95.32% en AISI 316L respecto del material base. De igual forma para el proceso GMAW con una reducción de 75% en ASTM A36 y de 96% en AISI 316L de su durabilidad comparado con las muestras de material base sin soldadura. Finalmente, para el proceso SMAW una disminución de durabilidad de 29% en ASTM A36 y de 93% en AISI 316L respecto del material base y en los puntos más bajos de esfuerzo en los que el dato pudo ser verificado para cada proceso.

La propuesta de adaptación del modelo matemático de jerarquización cumplió con la expectativa de selección del proceso de soldadura por arco eléctrico adecuado, siendo que reflejó la preferencia sobre los procesos que generan menor afectación en el desempeño del material bajo las condiciones de carga planteadas. Asimismo presentó un concepto innovador frente al uso de los resultados de los experimentos como factor argumentativo para ejecutar la selección, este enfoque permitió respaldar la utilización del modelo con pertinencia de los datos obtenidos a través de la experimentación. De igual manera traza un escenario de selección que puede enriquecerse con trabajos posteriores que permitirán incrementar las bases de datos para combinar criterios y alternativas dentro del esquema de la aplicación de soldaduras, considerando cambios en materiales, geometrías, procesos de soldadura y parámetros de proceso, así como diversas propiedades que sean de interés en el método evaluativo de selección.

7. Recomendaciones

La investigación desarrollada plantea un nuevo escenario de abordaje al esquema de selección de procesos de soldadura. Sin embargo, como se planteó al inicio de este trabajo, el alcance permite enfocar nuevos horizontes que enriquezcan el análisis científico hasta aquí ejecutado. Para esto se proponen las investigaciones mencionadas a continuación.

Ensayos complementarios que puedan enriquecer aún más los modelos de operación y desempeño de los materiales sometidos a procesos de soldadura permitirán ampliar las opciones de selección y la ponderación asignada con desarrollos específicos, entre los que se cuentan, ensayos de esfuerzos residuales, ensayos de velocidades de corrosión, ensayos de gradientes de dureza, ensayos de determinación de temperaturas de transición y ensayos de caracterización cuantitativa en las zonas de interés de las uniones soldadas pueden fortalecer los modelos de selección, favoreciendo las aplicaciones específicas que tengan en uso los materiales empleados.

La amplificación de las variables experimentales como materiales y procesos de soldadura adicionales también pueden incrementar el espectro de selección que pudiera facilitar la planificación de diseños y procesos de fabricación con aplicaciones específicas. Esto incluiría el desarrollo de pruebas experimentales con materiales no ferrosos, y de aceros de última generación, donde es factible desarrollar la soldadura como método de unión de materiales.

El desarrollo de pruebas con fluctuación de los parámetros aquí establecidos como estándar permitirían establecer correlaciones matemáticas que puedan plantear analíticamente la resistencia a diversos esquemas de carga de los materiales. Siendo esta información valiosa para consideraciones de confiabilidad operacional e integridad de equipos, así como promotora del aprovechamiento de recursos y de la eficiencia de procesos de fabricación.

Referencias Bibliográficas

- Abbaschian, R., & Reed-Hill, R. E. (2009). *Physical Metallurgy Principles - SI Version*. Cengage Learning. <https://books.google.com/books?id=zRgHAAAAQBAJ&pgis=1>
- Abebe, D. G., & Bogale, T. M. (2023). Optimization of TIG welding process parameters on 304 austenitic stainless steel sheet metal using fuzzy logic based Taguchi method. *Engineering Research Express*, 5(4). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acffa5>
- Ahyar Sholihuddin, A., Lutvi Azizah, N., Findawati, Y., & Intan Mauliana, M. (2024). The Implementation of Android-Based Expert System Using Forward Chaining Method for Diagnosing Cat Diseases. *Journal.Pubmedia.Id*, 29(1), 29–42. <https://doi.org/10.47134/jtsi.v1i1.2144>
- Ajmi, C., Zapata, J., Elferchichi, S., & Laabidi, K. (2024). Advanced Faster-RCNN Model for Automated Recognition and Detection of Weld Defects on Limited X-Ray Image Dataset. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 43(1). <https://doi.org/10.1007/S10921-023-01032-X>
- Al-Mendwi, K. A. K., & Doos, Q. M. (2023). Selection of welding process to large scale project on site by QFD and multi criteria methods. *AIP Conference Proceedings*, 2651. <https://doi.org/10.1063/5.0131380>
- Aloraier, A., Ibrahim, R., & Thomson, P. (2006). FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83(5), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.02.028>
- Aloraier, Abdulkareem, Al-fadhalah, K., Paradowska, A. M., & Alfaraj, E. (2014). Effect of welding polarity on bead geometry, microstructure, microhardness, and residual stresses of 1020 steel. *Journal of Engineering Research*, 2(4), 137–160. <https://doi.org/10.7603/s40632-014-0029-5>

- American Institute of Iron and Steel. (1988). *Welding of Stainless Steels and Other Joining Methods - A Designers' Handbook Series*. www.nidi.org
- Standard Methods for Mechanical of Welds, 2000 Aws B4.0 1 (2000).
- American Welding Society (AWS). (2001). Standard Welding Terms and Definitions, AWS A3.0:2001. *American Welding Society (AWS)*, 147.
- American Welding Society (AWS). (2017). *Structural Welding Code-Stainless Steel D1.6/D1.6M*. www.copyright.com
- American Welding Society (AWS). (2020). AWS D1. 1/D1. 1M:2020, Structural Welding Code - Steel An American National Standard. *American Welding Society*, 72–664.
www.copyright.com
- Araque de los Ríos, O. J., & Arzola de la Peña, N. (2013). Estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras. *Ingeniare*, 21(2), 279–292. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052013000200011>
- Arora, H., Kumar, V., Prakash, C., Pimenov, D., Singh, M., Vasudev, H., & Singh, V. (2021). Analysis of sensitization in austenitic stainless steel-welded joint. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 13–23. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5151-2_2
- Asibeluo IS, & Emifoniye E. (2015). Effect of Arc Welding Current on the Mechanical Properties of A36 Carbon Steel Weld Joints. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 2(9). www.internationaljournalsrsg.org
- Askeland, D., & Wright, W. (2015). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (R. Javier (ed.); 7th ed.). CENGAGE Learning.
https://www.academia.edu/download/64704554/Ciencia_e_Ingenieria_de_Materiales.pdf

- ASTM A240: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate , Sheet , and Strip for Pressure Vessels and for General Applications, I ASTM International 12 (2004). https://doi.org/10.1520/A0240_A0240M-22A
- ASTM. (2004). Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. *E606/E606M-12*, 96(2004), 1–16. https://www.astm.org/e0606_e0606m-21.html
- ASTM. (2010). Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. In *Astm E112-10*. <https://www.astm.org/e0112-13r21.html>
- ASTM. (2016). ASTM E384: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. *Annual Book of ASTM Standards*, 1–42. <https://doi.org/10.1520/E0384-10.2>
- Standard Specification for Carbon Structural Steel, 14 Standards 1 (2005). https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-08
- ASTM Standard E8/E8M-13a. (2013). “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.” In *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-13A
- Balasubramanian, V., Guha, B., Swamidas, A. S. J., & Seshadri, R. (2000). Science and Technology of Welding and Joining Selection of welding process to fabricate cruciform joints using analytic hierarchic process based on qualitative factors Selection of welding process to fabricate cruciform joints using analytic hierarchic process based on qualitative factors. *Taylor & Francis*, 5(4), 203–207. <https://doi.org/10.1179/136217100101538218>
- Balasubramanian, V., Varahamoorthy, R., Ramachandran, C. S., & Muralidharan, C. (2009). Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(9–10), 887–897. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1406-8>
- Barraza-Contreras, J. M., Piña-Monarez, M. R., & Molina, A. (2020). Fatigue-life prediction of

mechanical element by using the Weibull distribution. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(18), 6384. <https://doi.org/10.3390/APP10186384>

Bartels, P. H., & Samuels, L. E. (1972). Metallographic Polishing by Mechanical Methods. *Transactions of the American Microscopical Society*, 91(2), 248. <https://doi.org/10.2307/3225424>

Baskoro, A. S., Kabutomori, M., & Suga, Y. (2008). Automatic Welding System of Aluminum Pipe by Monitoring Backside Image of Molten Pool Using Vision Sensor. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2(5), 582–592. <https://doi.org/10.1299/jmmp.2.582>

Basquin, O. H. (1910). The exponential law of endurance tests. In *Proceedings of the American Society for Testing and Materials* (Vol. 10). <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570854175181886720>

Bender, E. A. (2012). *An Introduction to Mathematical Modeling*. Dover Publications. <https://books.google.com.co/books?id=FvHDAgAAQBAJ>

Bindhushree, B. S., Shanmuganatan, S. P., Saravanabavan, D., & Madhusudan, M. (2023). An investigation of process parameter influences on dissimilar friction stir welding of cast aluminum alloy joints. *Materials and Manufacturing Processes*, 39(2), 188–206. <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2260459>

Bodude, M. A., & Momohjimoh, I. (2015). Studies on Effects of Welding Parameters on the Mechanical Properties of Welded Low-Carbon Steel. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 03(03), 142–153. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2015.33017>

Bohnart, E. R., & Sacks, R. J. (2012). Welding : principles and practices. In *cir.nii.ac.jp*. McGraw-Hill Education. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000795359571712>

Bohórquez, O., Pertuz, A., & Rincón-Ortíz, M. (2021). An overview framework of welding

process selection, current state and expectatives. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1), 012076. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012076>

Brown, N. J., Swift, K. G., & Booker, J. D. (2002). Joining process selection in support of a proactive design for assembly. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 216(10), 1311–1324.

<https://doi.org/10.1243/095440502320405412>

Bui, H. A., & Nguyen, X. T. (2023). A novel multicriteria decision-making process for selecting spot welding robot with removal effects of criteria techniques. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/S12008-023-01650-9>

Campbell, S. W., Galloway, A. M., & McPherson, N. A. (2012). Techno-economic evaluation of reducing shielding gas consumption in GMAW whilst maintaining weld quality.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 63(9–12), 975–985.

<https://doi.org/10.1007/s00170-012-3961-2>

Capraz, O., Meran, C., Wörner, W., & Gungor, A. (2015). Using ahp and topsis to evaluate welding processes for manufacturing plain carbon stainless steel storage tank. *Archives of Materials Science and Engineering*, 76(2), 157–162.

Carlson, N., Johnson, J. and Kunerth, D. (1992). Control of GMAW: detection of discontinuities in the weld pool. *NDT & E International*, 25(1), 44. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(92\)90088-x](https://doi.org/10.1016/0963-8695(92)90088-x).

Carmen, O. M. Del, & Carolina, O. V. (2010). *Estudio del efecto que produce el recubrimiento de un electrodo en la generación de esfuerzos mecánicos en soldaduras*.

Castellanos-González, O. M., Moreno-Urbe, 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), 2021. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021003>

Cavazos Hernández, E. A., Chiñas Sánchez, P., Navarro González, J. L., & López Juárez, I. (2023). Geometries and quality assesment of weld beads in 5052-H32 aluminum alloys joined by semiautomated GMAW through a double fuzzy system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(5–6), 2011–2030.

<https://doi.org/10.1007/s00170-023-12337-6>

Cengel, Y. A. (2007). Heat and mass transfer. In *Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill, Inc.

<https://doi.org/10.1007/978-981-15-3988-6>

Cerjak, H., & Bhadeshia, H. (1997). Mathematical Modelling of Weld Phenomena III, eds Models for the Elementary Mechanical Properties of Steel Welds. In *Mechanical Properties of Steel Welds* (pp. 229–284). www.msm.cam.ac.uk/phase-trans

Cho, C. B., Lee, J.-H., & Lee, C.-H. (2024). Distribution and Characteristics of Residual Stresses in Super Duplex Stainless Steel Pipe Weld. *Metals 2024*, Vol. 14, Page 136, 14(2), 136.

<https://doi.org/10.3390/MET14020136>

Choudhury, B., & Chandrasekaran, M. (2023). Electron Beam Welding Investigation of Inconel 825 and Optimize Energy Consumption Using Integrated Fuzzy Logic-Particle Swarm Optimization Approach. *International Journal of Fuzzy Systems*, 25(4), 1377–1399.

<https://doi.org/10.1007/s40815-022-01431-8>

Chu, W. H., & Tung, P. C. (2005). Development of an automatic arc welding system using a sliding mode control. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(7–8), 933–939. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.10.012>

Cioroagă, B., & Linul, E. (2023). Effect Of Welding Current Intensity On Tensile Strength Of Pressure Vessel Steel Submerged Welded Joints. *Acta Technica Corviniensis-International*

Journal of Engineering ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara, XXI(1), 4.

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=20673809&AN=163818031&h=dLYPPnF3sbEDwpjo4SD1iLEO8zWothzCg%2F6vLaruJAZ%2FtXLIqVjtah8DG4QvHc6lhKOUYV5oqfppC8tGfcqOSw%3D%3D&cr l=c>

Coniglio, N., & Cross, C. E. (2013). Initiation and growth mechanisms for weld solidification cracking. In *International Materials Reviews* (Vol. 58, Issue 7, pp. 375–397). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1179/1743280413Y.0000000020>

Correia, D. S., & Ferraresi, V. A. (2007). Welding process selection through a double criteria: Operational costs and non-quality costs. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1–3), 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.006>

Costa, J. D. M., Ferreira, J. A. M., & Abreu, L. P. M. (2010). Fatigue behaviour of butt welded joints in a high strength steel. *Procedia Engineering*, 2(1), 697–705. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.075>

Costanza, G., Sili, A., & Tata, M. E. (2016). Weldability of austenitic stainless steel by metal arc welding with different shielding gas. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3508–3514. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.437>

COSUDE, & CAPLAB. (2001). *Manual de soldadura universal*.

Darwish, S. M., Al Tamimi, A., & Al-Habdan, S. (1997). A knowledge base for metal welding process selection. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(7), 1007–1023. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(96\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(96)00073-9)

David, S. A., Babu, S. S., & Vitek, J. M. (2001). Recent advances in modelling and characterisation of weld microstructures. *Science and Technology of Welding and Joining*,

6(6), 341–346. <https://doi.org/10.1179/stw.2001.6.6.341>

David, S. A., Babu, S. S., & Vitek, J. M. (2003). Welding: Solidification and microstructure.

JOM, 55(6), 14–20. <https://doi.org/10.1007/S11837-003-0134-7/METRICS>

Davis, J. (1998). Metals Handbook Desk Edition. In *Metals Handbook Desk Edition*.

<https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.9781627081993>

Di, X., Ji, S., Cheng, F., Wang, D., & Cao, J. (2015). Effect of cooling rate on microstructure,

inclusions and mechanical properties of weld metal in simulated local dry underwater

welding. *Materials and Design*, 88, 505–513. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.025>

Díaz Nova, D. A., Martínez, M., & Bohórquez, O. (2021). Impact of mechanical properties of

structural steel by three transfer modes in gas metal arc welding. *Iopscience.Iop.Org*, 2046,

12053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012053>

DuPont N., J., Lippold C., J., & Kiser D., S. (2013). Welding Metallurgy and Weldability of

Nickel Based Alloys. In *Chemistry & ...* Hoboken.

Ebrahimnia, M., Goodarzi, M., Nouri, M., & Sheikhi, M. (2009). Study of the effect of shielding

gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc

welding. *Materials and Design*, 30(9), 3891–3895.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.031>

Edwards, D., & Hamson, M. (1989). *Guide to Mathematical Modelling*. MacMillan Education

Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-10042-2>

Eroğlu, M., Aksoy, M., & Orhan, N. (1999). Effect of coarse initial grain size on microstructure

and mechanical properties of weld metal and HAZ of a low carbon steel. *Materials Science*

and Engineering: A, 269(1–2), 59–66. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00137-9)

ESAB. (2016). *Proceso de soldadura MIG/MAG*.

<https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm>

Ewing, J.A. Humfrey, J. (1903). VI. The fracture of metals under repeated alternations of stress.

Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 200(321–330), 241–250.

<https://doi.org/10.1098/rsta.1903.0006>

Feigenbaum, E., McCorduck, P., & Nii, H. (1988). *The rise of the expert company* (1st ed.).

Times Books. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/66783>

Fernández, R. (2004). Modelización lógica de procesos de solución de problemas y sus aspectos computacionales. *In Summa Logicae En El Siglo XXI*, 21.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4452154>

Fine, M. E., & Kwon, I. B. (1986). Fatigue crack initiation along slip bands. *Elsevier*, 29–40.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781483284231501358>

Fitri, M., Hidayatullah, P., Wibowo, K. M., & Darmawan, A. S. (2021). The effect of smaw welding currents on mechanical properties and micro structures of low carbon steels.

Materials Science Forum, 1029 MSF, 15–23.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1029.15>

Flores, R. B., Ruíz, A., Rubio-González, C., López, V. H., Lara, N. O., Hernández, R. G., &

Curiel López, F. F. (2016). Effect of heat input and accumulated fatigue damage on mechanical properties of dissimilar AL-6XN/316L welded joints. *Materials Characterization*, 112, 41–50.

<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.11.029>

Gadallah, R., Fahmy, R., Khalifa, T., & Sadek, A. (2012). Influence of shielding gas composition on the properties of flux-cored arc welds of plain carbon steel. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 2(1), 01–12.

<https://core.ac.uk/download/pdf/228833224.pdf>

Gery, D., Long, H., & Maropoulos, P. (2005). Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2–3), 393–401.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.018>

Gong, C., Siraj, S., Yu, L., Applications, L. F.-E. S. with, & 2024, U. (2024). A generalized form of the Distance-Induced OWA Operators-Demonstrating its use for Evaluation Indicator System in China. *Expert Systems with Applications*, 148, 54.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123257>

González Pérez, I., Meruane, V., & Mendez, P. F. (2023). Deep-learning based analysis of metal-transfer images in GMAW process. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 9–20.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.11.018>

Gregorutti, R., Grau, J. E., Desimoni, J., & Elsner, C. I. (2011). Caracterización del acero inoxidable dúplex para su posible uso como biomaterial. In *sedici.unlp.edu.ar RW Gregorutti, JE Grau, J Desimoni, CI Elsner XI Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales (SAM/CONAMET, 2011)•sedici.unlp.edu.ar.*

<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/119140>

Groover, M. P. (2015). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Proceses, and Systems, 6th Edition*. John Wiley & Sons.

Gurney, T. (1970). Fatigue of welded structures. In C. U. Press (Ed.), *Metal Constr Brit Weld J* (Cambridge, Vol. 2, Issue 11).

https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=tD89AAAIAAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=fatigue+of+welded+structures&ots=99l48l5SBY&sig=ECSRSkypk7-Uc1TK6dxsNedY_aw

- H.M Cobb. (2012). Dictionary of Metals. In *Metal History Timeline* (p. 304). ASM International.
<https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=ODsvB5gNs8sC&oi=fnd&pg=PR1&dq=Metals+Handbook,+Ninth+Edition,+Volume+1,+Properties+and+Selection:+Irons,+Steels,+and+High-Performance+Alloys&ots=7a7QUQVIKV&sig=RM31OH1k8V0gqy9m3ALWhkcRnWc>
- Hackenhaar, W., Gonzalez, A. R., Machado, I. G., & Mazzaferro, J. A. E. (2018). Welding parameters effect in GMAW fusion efficiency evaluation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1–4), 497–507. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0888-7>
- Harrison, P. L., & Farrar, R. A. (1989). Application of continuous cooling transformation diagrams for welding of steels. *International Materials Reviews*, 34(1), 35–51.
<https://doi.org/10.1179/imr.1989.34.1.35>
- Hernández-Trujillo, S. L., Lopez-Morelos, V. H., García-Rentería, M. A., García-Hernández, R., Ruiz, A., & Curiel-López, F. F. (2021). Microstructure and fatigue behavior of 2205/316l stainless steel dissimilar welded joints. *Metals*, 11(1), 1–18.
<https://doi.org/10.3390/met11010093>
- Higashida, Y., Burk, J. D., & Lawrence, F. V. (1978). Strain-controlled fatigue behavior of ASTM A36 and A514 grade F steels and 5083-0 aluminum weld materials. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 57(11).
- Hrabê, P., Chot, R., & Navrátilová, M. (2009). Influence of Welding Parameters on Geometry of Weld Deposit Bead. *International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems*, 10(3), 291–294.
- Hritonenko, N., & Yatsenko, Y. (2003). Applied Mathematical Modelling of Engineering

Problems. In *Applied Optimization Volume 81 Series Editors*. Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9160-7>

Huang, H. Y. (2010). Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding. *Materials and Design*, 31(5), 2488–2495.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.043>

Hwang, I., Kim, D. Y., Jeong, G., Kang, M., Kim, D., & Kim, Y. M. (2017). Effect of Weld Bead Shape on the Fatigue Behavior of GMAW Lap Fillet Joint in GA 590 MPa Steel Sheets. *Metals 2017, Vol. 7, Page 399*, 7(10), 399. <https://doi.org/10.3390/MET7100399>

Iamboliev, T., Katayama, S., & Matsunawa, A. (2003). Interpretation of Phase Formation in Austenitic Stainless Steel Welds. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 82(12).

Irfan, S., & Achwal, P. V. (2014). An Experimental Study on the Effect of MIG Welding Parameters on the Weldability of Galvenize Steel. *International Journal on Emerging Technologies*, 5(1), 146–152. <https://www.researchgate.net/publication/325945463>

Jafarian, M., & Ebrahim Vahdat, S. (2012). Technical Paper A fuzzy multi-attribute approach to select the welding process at high pressure vessel manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 14, 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.10.006>

Janardhan, G., Kishore, K., Dutta, K., & Mukhopadhyay, G. (2020). Tensile and fatigue behavior of resistance spot-welded HSLA steel sheets: Effect of pre-strain in association with dislocation density. *Materials Science and Engineering: A*, 793, 139796.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139796>

Jayant, A., Dhillon, M. S., & Singh, M. (2015). Use of Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select Welding Process in High Pressure Vessel Manufacturing Environment. *International Journal of App... Article in International Journal of Applied Engineering Research*, 10(8),

586–595. <http://www.ripublication.com>

Jeffus, L. (2004). Soldadura Principios y Aplicaciones. In *Spanish Welding Society*.

<https://doi.org/978-84-283-2937-8>

Jeffus, L., & Rowe, R. (2008). *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG)*. Paraninfo.

<https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=lvltVXsi1->

[EC&oi=fnd&pg=PP1&dq=larry+jeffus&ots=rg7sSg6wBM&sig=ftMhILvln8BA23N09esq](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=lvltVXsi1-EC&oi=fnd&pg=PP1&dq=larry+jeffus&ots=rg7sSg6wBM&sig=ftMhILvln8BA23N09esq)

[HK_gMDE](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=lvltVXsi1-EK_gMDE)

Jenney, C. L., & O'Brien, A. (1991). Welding Handbook_Volume 1_Welding Science and Technology. In *American Welding Society* (9th ed., Vol. 1). American Welding Society.

<https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpWHVWSTE2/viewerType:toc/>

Johnson, J., Carlson, N., ... H. S.-W., & 1991, U. (1991). Process Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode. *16th. Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Brunswick, ME (USA)*, 23–28.

<https://pdfs.semanticscholar.org/3ad3/1f2fa95afdeb1db428e1dcc5e2d46974708e.pdf>

Jonsson, P. G., Murphy, A. B., & Szekely, J. (1995). Influence of oxygen additions on argon-shielded gas metal arc welding processes. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 74(2), 48-s.

Jorge, V. L., Scotti, F. M., Reis, R. P., & Scotti, A. (2020). The effect of pulsed cold-wire feeding on the performance of spray GMAW. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(7–8), 3485–3498. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05247-4>

Joseph, A., Farson, D., Harwig, D., & Richardson, R. (2005). Influence of GMAW-P current waveforms on heat input and weld bead shape. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(3), 311–318. <https://doi.org/10.1179/174329305X40624>

- Joshi, A., & P Nerkar. (2023). Selection of Welding Method to Join AA6061 Alloy and Comparative Analysis of MIG and FSW. *Advancement in Mechanical Engineering and Technology*, 6(3), 19–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.8401456>
- Kadapa, H. (2024). A comprehensive framework for landslide risk assessment of archaeological sites in Gujarat, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(1), 41–51. <https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2024.01.002>
- Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9–12), 1411–1421. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>
- Kahveci, K., Can, Y., & Cihan, A. (2005). Heat transfer in continuous-drive friction welding of different diameters. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 48(10), 1035–1050. <https://doi.org/10.1080/10407780500283291>
- Karadeniz, E., Ozsarac, U., & Yildiz, C. (2007). The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. *Materials and Design*, 28(2), 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.07.014>
- Katherasan, D., Elias, J. V., Sathiya, P., & Haq, A. N. (2014). Simulation and parameter optimization of flux cored arc welding using artificial neural network and particle swarm optimization algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(1), 67–76. <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0675-0>
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1979). Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. In *Cambridge University Press* (Vol. 9, Issue 7). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310245>
- Khafifudin, M. (2017). The Effect Of Current On SMAW Welding To Tensile Strength And

Micro Structure Of Low Carbon Steel. *The 4th International Conference on Engineering and Technology Development, Icetd*, 173–177.

<http://artikel.ubl.ac.id/index.php/icetd/article/view/1017>

Khamari, B. K., Gunji, B., Karak, S. K., & Biswal, B. B. (2019). Variation of microstructural and mechanical properties with respect to polarity in shielded metal arc welding of mild steel. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 4(2), 521–530. <https://doi.org/10.33889/ijmems.2019.4.2-042>

Khamouli, F., Zidani, M., Farh, H., Saoudi, A., & Atoui, L. (2016). Effects of cellulosic and basic flux on the structure, composition and hardness of SMAW welds on steel X42. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 27, 11–19.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.27.11>

Kil, W., Shin, M., & Bang, K. (2017). Effects of Fluoride in the Flux on Hydrogen Content in Weld Metal and Operating Behavior in FCAW-S. *Journal of Welding and Joining*, 35(5), 65–70. <https://doi.org/10.5781/jwj.2017.35.5.9>

Klesnil, M., & Lukás, P. (1993). Fatigue of Metallic Materials. *International Journal of Materials Research*, 84(4), 291–291. <https://doi.org/10.1515/IJMR-1993-840416/HTML>

Kou, S. (1996). Transport phenomena and materials processing. In J. W. and Sons (Ed.), *John Wiley and Sons, New York, 1996*. <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=CICY.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mf n=004273>

Kou, Sindo. (2003). *Welding Metallurgy, second ed.* (John Wiley & Sons (ed.)). John Wiley & Sons. www.copyright.com.

Krauss, G. (2015). *Steels: processing, structure, and performance*. ASM International.

<https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=ETJ7CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=Metals+Handbook,+Ninth+Edition,+Volume+1,+Properties+and+Selection:+Irons,+Steels,+and+High-Performance+Alloys&ots=Nzb76YWBs0&sig=EKuMFFo1VZpKNx8YnWgcIVAzDYs>

Kumar, S., & Shahi, A. S. (2011). Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints. *Materials and Design*, 32(6), 3617–3623. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.017>

Kumar Singh, V., & Arora, H. (2015). Analysis of sensitization of austenitic stainless steel by different welding processes: A review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(7), 17837–17848. <https://www.researchgate.net/publication/281698788>

Lancaster, J. F. (1984). The physics of welding. *Physics in Technology*, 15(2), 73–79. <https://doi.org/10.1088/0305-4624/15/2/I05>

Lardner, R. W. (1968). A dislocation model for fatigue crack growth in metals. *Philosophical Magazine*, 17(145), 71–82. <https://doi.org/10.1080/14786436808218181>

Lawrence, F. V., Mattos, R. J., Higashida, Y., & Burk, J. D. (1977). Estimating the fatigue crack initiation life of welds. *ASTM Special Technical Publication*, 134–158. <https://doi.org/10.1520/stp33393s>

Lazić, V., Aleksandrović, S., Nikolić, R., Prokić-Cvetković, R., Popović, O., Milosavljević, D., & Čukić, R. (2012). Estimates of weldability and selection of the optimal procedure and technology for welding of high strength steels. *Procedia Engineering*, 40, 310–315. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.100>

Li, Q., Wang, Y., Du, Z., Li, Q., Zhang, W., Zhong, F., Wang, Z. J., & Chen, Z. (2024). APDF: An active preference-based deep forest expert system for overall survival prediction in

gastric cancer. *Expert Systems with Applications*, 245.

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123131>

Li, S., Yamaguchi, Y., Katsuyama, J., Li, Y., & Deng, D. (2023). Modeling of hardness and welding residual stress in type 316 stainless steel components for the assessment of stress corrosion cracking. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 5. <https://doi.org/10.1115/PVP2023-103449>

Liang, X., Bos, C., Hermans, M., & Richardson, I. (2023). An Improved Cellular Automata Solidification Model Considering Kinetic Undercooling. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 54(3), 1088–1098. <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02742-3>

Lin, T. H., & Ito, Y. M. (1969). Mechanics of a fatigue crack nucleation mechanism. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17(6), 511–523. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(69\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0022-5096(69)90006-4)

Lippold, J. C., & Kotecki, D. (2005). Welding metallurgy and weldability of stainless steels. In J. Wiley & Sons (Ed.), *Metals* (Vol. 10, Issue 1). John Wiley & Sons, Inc. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005wmws.book.....L/abstract>

Long, X., Li, H., Du, Y., Mao, E., & Tai, J. (2021). A knowledge-based automated design system for mechanical products based on a general knowledge framework. *Expert Systems with Applications*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114960>

López, J., & Vitriago, J. (2011). *Determinación de la microdureza y la metalurgia de uniones soldadas a tope en función del tipo de revestimiento del electrodo en acero ASTM A-36 Y ASTM*.

Lovegrove, G. L., Curtis, G. J., & Farrar, R. A. (1989). Welding advisory system for process

- selection “WASPS.” *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, IEA/AIE 1989*, 422–427. <https://doi.org/10.1145/66617.66669>
- Macdonald, K. A. (2011). Fracture and fatigue of welded joints and structures. In *Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures*. <https://doi.org/10.1533/9780857092502>
- Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., & Madhusudhan Reddy, G. (2008). Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of high strength, quenched and tempered steel joints. *Materials & Design*, 29(9), 1821–1827. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2008.03.006>
- Manoujan, A., & Riasi, A. (2024). Optimal selection of parallel pumps running as turbines for energy harvesting in water transmission lines considering economic parameters. *Applied Energy*, 359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122687>
- Maraki, M. R., Mahmoodi, M., Tagimalek, H., Maraki, M. R., & Khodaei, M. (2022). Evaluation of GMAW Welded Joints in A36 Low-Alloy Marine Steel Sheets: Tensile Test, Hardness, and Fatigue Properties. In *Journal of Advanced Materials and Processing* (Vol. 10, Issue 4). <http://jmatpro.iaun.iau.ir>
- Materials, A. S. for T. and. (2011). ASTM E-3. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. In *ASTM E-23: Vol. ASTM E-3*. <https://www.astm.org/Standards/E3.htm>
- Mathers, G. (2002). Welding metallurgy. In *The Welding of Aluminium and its Alloys* (pp. 10–34). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781855737631.10>
- Maurya, A. K., Pandey, C., & Chhibber, R. (2021). Dissimilar welding of duplex stainless steel with Ni alloys: A review. In *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (Vol.

- 192, p. 104439). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104439>
- McKelliget, J., & Szekely, J. (1986). Heat transfer and fluid flow in the welding arc. *Metallurgical Transactions A*, 17(7), 1139–1148. <https://doi.org/10.1007/BF02665312>
- Menzel, M. (2003). The influence of individual components of an industrial gas mixture on the welding process and the properties of welded joints. *Welding International*, 17(4), 262–264. <https://doi.org/10.1533/wint.2003.3111>
- Meskens, N., & Roubens, M. (1999). *Mathematical Modelling: Theory and Applications. Advance in Decision Analysis*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0647-6>
- Messler, R. W. (1999). Principles of Welding, Physics, Chemistry, and Metallurgy. In John Wiley (Ed.), *Principles of Welding*. John Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527617487>
- Mirhedayatian, S. M., Vahdat, S. E., Jelodar, M. J., & Saen, R. F. (2013). Welding process selection for repairing nodular cast iron engine block by integrated fuzzy data envelopment analysis and TOPSIS approaches. *Materials and Design*, 43, 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.010>
- Modenesi, P. J., & De Avelar, R. C. (1998). The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. *Journal of Materials Processing Technology*, 86(1–3), 226–232. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00315-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00315-X)
- Mohammed, G. R., Ishak, M., Aqida, S. N., & Abdulhadi, H. A. (2017). Effects of heat input on microstructure, corrosion and mechanical characteristics of welded austenitic and duplex stainless steels: A review. *Metals*, 7(2), 39. <https://doi.org/10.3390/met7020039>
- Mohd-Lair, N. A., Yuyut, Y., Ahmad, Z., & Tahir, A. M. (2021). SMAW: The Effects of Currents and Welding Rod Diameters on Welded Joint Ultimate Tensile Strength Using the

Full Factorial DOE. *Journal of Physics: Conference Series*, 2129(1), 2129.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2129/1/012071>

Moisa, R., Popescu, M., & Opris, C. (2011). Problems raised by Noxes control at FCAW. *Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering.*, 20113(3), 1265–1266. <https://doi.org/10.15660/AUOFMTE.2011-3.2356>

Moreno-Uribe, A. M., Romanelli Sales, C. G. A., Ribeiro Menezes, P. H., & Queiroz

Bracarense, A. (2020). Study of the transition current in GMAW (MIG/MAG). *Ingeniare*, 28(3), 528–539. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052020000300528>

Moslemi, N., Redzuan, N., Ahmad, N., & Hor, T. N. (2015). Effect of current on characteristic for 316 stainless steel welded joint including microstructure and mechanical properties. *Procedia CIRP*, 26, 560–564. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.010>

Mounika, G., Rajyalakshmi, K., Rajkumar, G. V. S., & Sravani, D. (2023). Prediction and optimization of process parameters using design of experiments and fuzzy logic. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*.

<https://doi.org/10.1007/s12008-023-01446-x>

Mukhopadhyay, S., & Pal, T. K. (2006). Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(3–4), 262–268. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2510-7>

Mupoperi, T. R., & Pita, M. (2022). An Investigation of the Effect of Welding Current on the Mechanical Properties of Mild Steel Joints When Using Arc Welding. *2022 IEEE 13th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2022*, 217–220. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT55556.2022.9845346>

Murakami, Y., Takagi, T., Wada, K., & Matsunaga, H. (2021). Essential structure of S-N curve:

Prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter.

International Journal of Fatigue, 146, 106138.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106138>

Mvola, B., & Kah, P. (2017). Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 88, Issues 9–12, pp. 2369–2387). Springer London. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8936-2>

Nadzam, J., Armao, F., Byall, L., Kotecki, D., & Miller, D. (2014). Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection. In *Tech Rep. C4.200*. www.lincolnelectric.com

Niesłony, A., Dsoki, C. el, Kaufmann, H., & Krug, P. (2008). New method for evaluation of the Manson-Coffin-Basquin and Ramberg-Osgood equations with respect to compatibility.

International Journal of Fatigue, 30(10–11), 1967–1977.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.012>

Noor, C. W. M., Ferry, M., & Nik, W. B. W. (2014). A study of software approach for predicting weld bead geometry in shielded metal arc welding (SMAW) process. *Applied Mechanics and Materials*, 554, 386–390. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.554.386>

O'Brien, A., & Guzman, C. (2011). *Welding Handbook Ninth Edition Volume 4 Materials and Applications Part 1*. American Welding Society.

Ogino, Y., Hirata, Y., & Murphy, A. B. (2016). Numerical simulation of GMAW process using Ar and an Ar–CO₂ gas mixture. *Welding in the World*, 60(2), 345–353.

<https://doi.org/10.1007/s40194-015-0287-3>

Omar, M., & Soltan, H. (2020). A framework for welding process selection. *SN Applied Sciences*, 2(3). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2144-2>

- Ospina López, R., Parra Lara, H., & Aguirre Corrales, H. (2007). Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles. *Scientia et Technica*, 2(34), 273–278.
<https://doi.org/10.22517/23447214.5571>
- Pamuk, M. T., Savaş, A., Seçgin, Ö., & Arda, E. (2018). Numerical simulation of transient heat transfer in friction-stir welding. *International Journal of Heat and Technology*, 36(1), 26–30. <https://doi.org/10.18280/ijht.360104>
- Park, H. J., Kim, D. C., Kang, M. J., & Rhee, S. (2013). The arc phenomenon by the characteristic of en ratio in AC pulse GMAW. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5–8), 867–875. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4371-1>
- Pástor, M. (2004). Introducción a la metalurgia de la soldadura. *Epoch*, 41–60. www.nfpa.org.
- Patil, K. R., Deshpande, S., Joshi, S., & Raul, A. K. (2024). Developing an integrated design framework using python scripting for parametric CAD modelling of flange coupling. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s12008-023-01694-x>
- Peng, P., Wang, K., Wang, W., Han, P., Zhang, T., Liu, Q., Zhang, S., Wang, H., Qiao, K., & Liu, J. (2020). Relationship between microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L steel produced by selective laser melting. *Materials Characterization*, 163, 110283. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110283>
- Phillips, D. H. (2016). Welding Engineering. In *Welding Engineering*. John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9781119191407>
- Pollard, B., & Cover, R. (1972). Fatigue of steel weldments. *Weld. J*, 51(11), 544s.
http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1972_11_s544.pdf
- Poorhaydari, K., Patchett, B. M., & Ivey, D. G. (2005). Estimation of cooling rate in the welding

of plates with intermediate thickness. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 84(10).

http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_2005_10_s149.pdf

Pratikno, H., Abiyuda, H., & Dhanista, W. L. (2022). Comparative Analysis of GTAW, GMAW, and FCAW Welding Results on A36 Steel Against Tensile Test and Macrostructure. *International Journal of Offshore and Coastal Engineering*, 6(1), 19.

<https://doi.org/10.12962/j25800914.v6i1.14555>

Praveen, P., Yarlagadda, P. K. D. V., & Kang, M. J. (2005). Advancements in pulse gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 1113–1119.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.100>

Puchi-Cabrera, E. S., Saya-Gamboa, R. A., la Barbera-Sosa, J. G., Staia, M. H., Ignoto-Cardinale, V., Berríos-Ortiz, J. A., & Mesmacque, G. (2009). Fatigue life of AISI 316L stainless steel welded joints, obtained by GMAW. *Welding International*, 23(10), 778–788.

<https://doi.org/10.1080/09507110902843347>

Purwaningrum, Y., Triyono, Wirawan PU, M., & Alfarizi, F. (2016). Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding (GMAW) of low carbon steel (LR Grade A). *Key Engineering Materials*, 705, 250–254.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.705.250>

Rafiquee, A., & Shabbiruddin. (2024). Optimal selection and challenges of municipal waste management system using an integrated approach: a case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 46(1), 1996–2023.

<https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2298285>

Ragavendran, M., Vasudevan, M., & Hussain, N. (2022). Study of the Microstructure, Mechanical Properties, Residual Stresses, and Distortion in Type 316LN Stainless Steel

- Medium Thickness Plate Weld Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(6), 5013–5025. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06534-1>
- Rahangmetan, K. A., Wullur, C. W., & Sariman, F. (2020). Effect Variations and Types of Smaw Welding Electrodes on A36 Steel to Tensile Test. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569(3), 32052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/3/032052>
- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., & Linares, P. (2010). Modelos matemáticos de optimización. In *Publicación Técnica, 1*.
- Ramu, K., Prasanth, V., & Ramachandran, M. (2023). Optimization of Welding Process Parameters Using the VIKOR MCDM Method. *Researchgate.Net*, 2(1), 2583–4800. <https://doi.org/10.46632/jame/2/1/5>
- Rao, R. V. (2013). *Multiple Attribute Decision Making in the Manufacturing Environment*. 1–5. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4375-8_1
- Ravisankar, V., Balasubramanian, V., & Muralidharan, C. (2006). Selection of welding process to fabricate butt joints of high strength aluminium alloys using analytic hierarchic process. *Materials and Design*, 27(5), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.11.008>
- Reddy, G. V. P., Sandhya, R., Valsan, M., & Rao, K. B. S. (2010). Temperature dependence of low cycle fatigue of 316(N) weld metals and 316L(N)/316(N) weld joints. *Materials Science and Technology*, 26(11), 1384–1392. <https://doi.org/10.1179/174328408X317110>
- Riemelmoser, F. O., Gumbsch, P., & Pippan, R. (2001). Dislocation modelling of fatigue cracks: An overview. *Materials Transactions*, 42(1), 2–13. <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.2>
- Roca, M. (2019). *Análisis de la microestructura y estudio de las propiedades en piezas soldadas por soldadura MAG entre acero F-1140 y fundición laminar sometidas a tratamientos térmicos*. Universitat Politècnica De València Escuela Técnica Superior De Ingeniería Del

Diseño.

- Rontescu, C., Cacic, D. T., Iacobescu, G., & Amza, G. C. (2015). The Influence of the Welding Current Polarity on the Geometric Configuration of the Bead. *Advanced Materials Research, 1088*, 797–801. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1088.797>
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling, 9*(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Sailabaht, A., Wang, F., Environmental, J. C.-I. J. of, & 2018, undefined. (2018). Extension of the Advanced REACH Tool (ART) to include welding fume exposure. *Mdpi.Com*. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102199>
- Saluja, R. S., & Singh, V. (2023). An Improved Fuzzy MULTIMOORA Approach and Its Application in Welding Process Selection. *International Journal of Fuzzy Systems, 25*(4), 1707–1726. <https://doi.org/10.1007/s40815-023-01472-7>
- Sánchez-Lozano, J. M., Meseguer-Valdenebro, J. L., & Portoles, A. (2017). Assessment of Arc Welding Process Through the Combination of TOPSIS–AHP Methods with Fuzzy Logic. *Transactions of the Indian Institute of Metals, 70*(4), 935–946. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0884-x>
- Santos, C. A., Spim, J. A., & Garcia, A. (2000). Modeling of solidification in twin-roll strip casting. *Journal of Materials Processing Technology, 102*(1), 33–39. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00448-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00448-9)
- Saravanan, V., Sivaji, C., Chinnasamy, S., & Raja, C. (2023). Assessment of Selecting the Most Appropriate Oilseed for Biodiesel Production Using the COPRAS Method. *Researchgate.Net, 1*(2), 2583–2889. <https://doi.org/10.46632/aae/1/2/2>
- Schulz, B. (2003). Introducción a la metalurgia de la soldadura. In *Introducción a la Metalurgia*.

Segel, L. A. (1979). Mathematical Modelling Techniques (R. Aris). *SIAM Review*, 21(4), 571–572. <https://doi.org/10.1137/1021109>

Senthilkumar, G., Rathinasabapathi, G., & Mayavan, T. (2023). Fuzzy Logic-Based Prediction of Mechanical Characteristics of Friction Welded AISI 430 Joint. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 409–421. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7612-4_33

Shah Hosseini, H., Shamanian, M., & Kermanpur, A. (2011). Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds. *Materials Characterization*, 62(4), 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.02.003>

Shankar, V., Gill, T. P. S., Mannan, S. L., & Sundarlsan, S. (2003). Solidification cracking in austenitic stainless steel welds. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 28(3–4), 359–382. <https://doi.org/10.1007/BF02706438>

Silva, C. R., Ferraresi, V. A., & Scotti, A. (2005). A quality and cost approach for welding process selection. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. <https://doi.org/10.1590/s0100-73862000000300002>

Singh, R. (2022). Arc Welding Processes Handbook. In Wiley (Ed.), *Arc Welding Processes Handbook*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119819080>

Sproesser, G., Schenker, S., Pittner, A., Borndörfer, R., Rethmeier, M., Chang, Y. J., & Finkbeiner, M. (2016). Sustainable Welding Process Selection Based on Weight Space Partitions. *Procedia CIRP*, 40, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.077>

Steels, H. (1990). ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys Section: Carbon and Low-Alloy Steels. *Asremavad.Com*, 57. <https://www.asremavad.com/wp-content/uploads/2020/01/29-High-Strength-Structural-and-High-Strength-Low-Alloy-Steels.pdf>

Suban, M., & Tušek, J. (2001). Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1–3), 185–192.

[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00940-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00940-2)

Suutala, N. (1983). Effect of solidification conditions on the solidification mode in austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions A*, 14(1), 191–197.

<https://doi.org/10.1007/BF02651615>

T. Lienert, T. Siewert, S. Babu, V. AcoffT. Lienert, T. Siewert, S. Babu, & V. Acoff. (2011). *ASM handbook - Welding Fundamentals and Processes* (Vol. 06A).

<https://dl.asminternational.org/technical-books/edited-volume/chapter-pdf/478023/a0005643.pdf>

Tabor, D. (1951). The Hardness of Metals. In *Nature*. <https://doi.org/10.1038/170818b0>

Tahir, A., Hendriyanto, D., Faizah, A., ... J. A.-J. I. dan, & 2024, U. (2024). Application of Forward Chaining and Rule-Based Reasoning Methods to Design an Expert System for Pregnant Women Disease Diagnosis in a Private Hospital. *Jidt.Org*.

<https://doi.org/10.60083/jidt.v6i1.480>

Talabi, S. I., Owolabi, O. B., Adebisi, J. A., & Yahaya, T. (2014). Effect of welding variables on mechanical properties of low carbon steel welded joint. *Advances in Production*

Engineering And Management, 9(4), 181–186. <https://doi.org/10.14743/apem2014.4.186>

Talkington, J. E. (1998). *Variable polarity gas metal arc welding* [MS Thesis, Ohio State University, Col, Ohio, USA].

https://etd.ohiolink.edu/pg_10?0::NO:10:P10_ACCESSION_NUM:osu1130352747

Tanaka, K., & Mura, T. (1981). A dislocation model for fatigue crack initiation. *Journal of*

Applied Mechanics, Transactions ASME, 48(1), 97–103. <https://doi.org/10.1115/1.3157599>

- Teker, T., & Kursun, T. (2017). Effect of the manual (GMAW) and pulsed (P-GMAW) welding processes on impact strength and fracture behavior of AISI 304-AISI 1040 dissimilar steel joints fabricated by ASP316L austenitic stainless steel filler metal. *KOVOVE MATERIALY-METALLIC MATERIALS*, 55(2), 141–148. https://doi.org/10.4149/KM_2017_2_141
- Tekriwal, P., & Mazumder, J. (1988). FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL TRANSIENT HEAT TRANSFER IN GMA WELDING. . *Welding Journal (Miami, Fla)*, 67(7). https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1988_07_s150.pdf
- Thakur, A., Gebrelibanos, H., & Gabrey, T. (2019). Arc Welding Process Selection through a Quality and Costs Article in. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 9(3). <https://doi.org/10.14741/ijcet/v.9.3.6>
- Tobar, E. (2015). Estudio de las Transformaciones Metalográficas y Propiedades Mecánicas de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) después del Proceso de Soldadura en los Aceros ASTM A588 y A36. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 10(1), 135–141. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/cienciaytecnologia/article/view/38>
- Topolska, S. (2016). Hardness analysis of welded joints of austenitic and duplex stainless steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 145(2), 022037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/145/2/022037>
- Unnikrishnan, R., Idury, K. S. N. S., Ismail, T. P., Bhadauria, A., Shekhawat, S. K., Khatirkar, R. K., & Sapate, S. G. (2014). Effect of heat input on the microstructure, residual stresses and corrosion resistance of 304L austenitic stainless steel weldments. *Materials Characterization*, 93, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.03.013>
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1–29.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>

Vander Voort, George F. (1993). Examination of some grain size measurement problems. *ASTM Special Technical Publication, 1165*, 266–294. <https://doi.org/10.1520/stp25108s>

Vasantharaja, P., Maduarimuthu, V., Vasudevan, M., & Palanichamy, P. (2012). Assessment of residual stresses and distortion in stainless steel weld joints. *Materials and Manufacturing Processes, 27*(12), 1376–1381. <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.663135>

Vietanti, F., Rajan, A. F., Arifin, A. A., Feryanto, D. H., Suheni, Irawan, H., Ulum, M., Arif, R. Z., Dicky, M. A., & Darmawan, F. B. (2021). Analysis of Welding Position and Current on Mechanical Properties of A36 Steel using Shield Metal Arc Welding. *Journal of Physics: Conference Series, 2117*(1), 12001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2117/1/012001>

Voort, G F Vander, Principles, M., & Asm, R. (2010). Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels Page 2 of 3. *ASM International, 195*(c), 19–21. <https://doi.org/10.1361/asmhba0003767>

Wardana, R. W., Masudin, I., & Restuputri, D. P. (2020). A novel group decision-making method by P-robust fuzzy DEA credibility constraint for welding process selection. *Cogent Engineering, 7*(1), 1728057. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1728057>

Wêglowski, M. S., Huang, Y., & Zhang, Y. M. (2008). Effect of welding current on metal transfer in GMAW. *Archives of Materials Science and Engineering, 33*(1), 49–56. <https://www.researchgate.net/publication/38103913>

Wendler, M., Ullrich, C., Hauser, M., Krüger, L., Volkova, O., Weiß, A., & Mola, J. (2017). Quenching and partitioning (Q&P) processing of fully austenitic stainless steels. *Acta Materialia, 133*, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.05.049>

- Wilhelm, G., Gött, G., Schöpp, H., & Uhrlandt, D. (2010). Study of the welding gas influence on a controlled short-arc GMAW process by optical emission spectroscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(43). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/43/434004>
- Wirsching, P. H., & Yao, J. T. P. (1970). Statistical Methods in Structural Fatigue. *Journal of the Structural Division*, 96(6), 1201–1219. <https://doi.org/10.1061/jsdeag.0002603>
- Woollin, P., & Gooch, T. (1995). Welding processes for stainless steels. *Welding in the World / Le Soudage Dans Le Monde*. [https://doi.org/10.1016/0043-2288\(95\)99619-0](https://doi.org/10.1016/0043-2288(95)99619-0)
- Wu, W., Xue, J., Zhang, Z., & Yao, P. (2019). Comparative study of 316L depositions by two welding current processes. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(13), 1502–1508. <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1643473>
- Yeo, S. H., & Neo, K. G. (1998). Inclusion of environmental performance for decision making of welding processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 82(1–3), 78–88. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00022-3)
- Yilmaz, R., Applied, H. U.-J. of M. of P. and, & 2002, U. (2002). Mechanical properties of Austenitic stainless steels Welded by GMAW and GTAW. *Journal of Marmara of Pure and Applied Sciences*, 18(3), 97–113. https://www.researchgate.net/profile/Ramazan-Yilmaz-5/publication/268421801_Mechanical_properties_of_austenitic_stainless_steels_welded_by_GMAW_and_GTAW/links/5a6f119eaca2722c947f8487/Mechanical-properties-of-austenitic-stainless-steels-welded-by-GMAW-and
- Yuwono, I., Tranggono Agus Salim, A., Cahya Aditama, C., Rosallino, R., Rohmatul Nugroho, S., Eka Febrianti, D., & Aditama, R. (2022). An Analysis of GMAW Welding Connections on A36 Material with a Heat Treatment and Rapid Cooling Process. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 8(1), 14–19.

- Zadeh, L. A., Klir, G. J., & Yuan, B. (1996). *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems* (Vol. 6). WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/2895>
- Zeng, M., Li, Z. T., Hu, Z. X., Xue, J. X., & Zhang, W. (2023). The effects of welding parameters on metal transfer and bead properties in the variable-polarity GMAW of mild steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(9–10), 4165–4183. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12579-4>
- Zhang, H., Shi, Y., Gu, Y., Xie, J., & Li, C. (2020). Effects of electrode polarity on the droplet transfer mode in self-shielded flux-cored arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.056>
- Zhang, X. F., Han, P., Terasaki, H., Sato, M., & Komizo, Y. (2012). Analytical Investigation of Prior Austenite Grain Size Dependence of Low Temperature Toughness in Steel Weld Metal. *Journal of Materials Science and Technology*, 28(3), 241–248. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60048-6](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60048-6)
- Zielinska, S., Pellerin, S., Valensi, F., Dzierzega, K., Musiol, K., De Izarra, C., & Briand, F. (2008). Gas influence on the arc shape in MIG-MAG welding. *EPJ Applied Physics*, 43(1), 111–122. <https://doi.org/10.1051/epjap:2008106>


- Resultado de ensayo de espectrometría de arco y chispa para ASTM A36

10/10/2023 10:35:27 AM

RESULTADOS DE ANALISIS

Sample Identification										
SampleNo										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.140	0.043	0.370	0.033	0.0037	0.298	0.044	<0.0015	0.015	0.019
2.	0.146	0.033	0.365	0.032	0.0033	0.291	0.042	<0.0015	0.014	0.019
3.	0.142	0.036	0.373	0.034	0.0034	0.300	0.044	<0.0015	0.015	0.018
Ø	0.143	0.037	0.369	0.033	0.0035	0.296	0.043	<0.0015	0.015	0.019
σ	0.0031	0.0051	0.0041	0.0010	0.00021	0.0047	0.0012		0.00071	0.00071
v	2.168	13.78	1.111	3.030	6.000	1.588	2.791		4.733	3.737
	As	B	Bi	Ca	Ce	Co	N	Nb	Pb	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0013	<0.00020	0.0066	<0.00050	0.0060	0.0021	~0.035	0.024	<0.0030	<0.0050
2.	0.0014	<0.00020	0.0054	<0.00050	0.0050	0.0015	>0.040	0.025	<0.0030	<0.0050
3.	0.0014	0.00022	0.0085	<0.00050	0.0057	0.0019	0.030	0.024	<0.0030	<0.0050
Ø	0.0014	0.00021	0.0068	<0.00050	0.0056	0.0018	~0.035	0.024	<0.0030	<0.0050
σ	0.00007	0.00001	0.0016		0.00051	0.00031	0.0050	0.00071		
v	5.000	4.762	23.53		9.107	17.22	14.29	2.958		
	Sn	Ta	La	Ti	V	W	Zr	Fe		
	%	%	%	%	%	%	%	%		
1.	0.0031	<0.030	0.0024	0.0016	0.0012	0.0075	<0.0010	98.90		
2.	0.0028	<0.030	0.0023	0.0023	0.00088	0.0066	<0.0010	98.92		
3.	0.0030	<0.030	0.0029	0.0019	0.0014	0.013	<0.0010	98.90		
Ø	0.0030	<0.030	0.0025	0.0019	0.0012	0.0090	<0.0010	98.91		
σ	0.00016		0.00032	0.00035	0.00027	0.0035		0.012		
v	5.333		12.80	18.42	22.50	38.89		0.012		

- Material de aporte proceso SMAW en material ASTM A36

	CERTIFICADO DE CALIDAD Quality Certificate							
Producto/ Product: OK 48.90	Dimensiones / Dimensions: 3.2mm							
Lote / Heat Number 1041028	Fecha de Producción/Date: 10-04-2021							
Clasificación / Classification: AWS A5.1 ASME SFA 5.1 / 2012 E7018								
Prueba del metal depositado / All-Weld Metal test:								
Análisis Químico (%) / Chemical Analysis:								
C 0.06	Si 0.44	Mn 1.05	P 0.02	S 0.01	Cr 0.02	Ni 0.02	Mo 0.01	V 0.01
Propiedades Mecánicas Típicas / Typical Mechanical Properties								
Resistencia a la Tracción (MPa) / Tensile Strength	601							
Limite de Fluencia (MPa) / Yield Strength	485							
Alargamiento (%) / Elongation	26							
Ensayo de Impacto CHARPY-V (J) / Impact Test	151							
Temperatura (°C) / Temperature	-30							
Observaciones / Observations								
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>								



HERBERT RODRIGUEZ CASTRO

Certificado De Calidad / Quality Certificate

ELECTRODOS
BAJO HIDRÓGENO



Atom Arc 7018



Electrodo de bajo hidrógeno con alto contenido de polvo de hierro y especial resistencia a la absorción de humedad. Muy recomendable donde las condiciones ambientales son extremas.

Clasificaciones	ASME SFA 5.1 AWS A5.1 : E7018 H4R
Aprobaciones	ABS : 3Y/AWS A5.1: E7018 CWB CSA W48 : E4918 DNV : 3Y(H10) LR : 3m,3Ym(H10) MIL-E-22200/1 : MIL-7018
Industria	Automotive Railcars Bridge Construction Industrial and General Fabrication Civil Construction Ship/Barge Building Mobile Equipment Fabricación industrial en general Industria Automotriz Vagones de trenes Equipos móviles Construcción de barcos/embarcaciones Construcción de puentes Construcción civil

Corriente de soldadura	AC or DC+
Tipo de revestimiento	Low-hydrogen iron powder
Prueba CTOD	false

Typical Tensile Properties				
Condition	Limite de flujo	Resistencia a la tracción	Alargamiento	Reducción en el área
Liberado de tensiones 8 hour(s) 621 °C (1150 °F)	395 MPa (57 ksi)	485 MPa (70 ksi)	33 %	77 %
Como queda soldado	470 MPa (68 ksi)	540 MPa (78 ksi)	30 %	75 %

Typical Charpy V-Notch Properties		
Condition	Testing Temperature	Valor de impacto
Liberado de tensiones 8 hour(s) 621 °C (1150 °F)	-29 °C (-20 °F)	280 J (193 ft-lb)

% típico de análisis de metal de soldadura				
C	Mn	Si	S	P
0.045	1.10	0.40	0.014	0.015

Depósito				
Diameter	Current	Efficiency (%)	Corriente ideal	Deposition Rate
6.4 mm (1/4 in.)	300-400 A	78 %	300 A	3.5 kg/h (7.7 lbs/h)
6.4 mm (1/4 in.)	300-400 A	77 %	350 A	3.9 kg/h (8.7 lbs/h)

ELECTRODOS
BAJO HIDRÓGENO



Atom Arc 7018

Depósito				
Diameter	Current	Efficiency (%)	Corriente ideal	Deposition Rate
3.2 mm (1/8 in.)	90-160 A	71.6 %	120 A	1.2 kg/h (2.6 lbs/h)
3.2 mm (1/8 in.)	90-160 A	70.9 %	140 A	1.2 kg/h (2.7 lbs/h)
4.8 mm (3/16 in.)	200-300 A	76.4 %	200 A	2.2 kg/h (4.9 lbs/h)
4.8 mm (3/16 in.)	200-300 A	74.6 %	250 A	2.4 kg/h (5.4 lbs/h)
2.4 mm (3/32 in.)	70-100 A	66.3 %	90 A	0.8 kg/h (1.7 lbs/h)
4.0 mm (5/32 in.)	130-220 A	75 %	140 A	1.4 kg/h (3.1 lbs/h)
4.0 mm (5/32 in.)	130-220 A	73.5 %	170 A	1.7 kg/h (3.8 lbs/h)
5.6 mm (7/32 in.)	250-350 A	75 %	250 A	2.9 kg/h (6.5 lbs/h)
5.6 mm (7/32 in.)	250-350 A	74 %	300 A	3.3 kg/h (7.2 lbs/h)

- Material de aporte proceso GMAW en material ASTM A36



CERTIFICADO DE CALIDAD
Quality Certificate

Producto/ Product: Weld 70S-6		Dimensiones / Dimensions: 0.9mm (0.035")								
Lote / Heat Number: 20444314				Fecha de Producción/Date: 2020.11.03						
Clasificación / Classification: ASME SFA/AWS A5.18										
Especificación / Specification: ER70S-6										
Análisis Químico (%) / Chemical Analysis:										
Elemento:	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
Especificación:	0.06-0.15	1.40-1.85	0.80-1.15	≤0.025	≤0.035	≤0.5	≤0.15	≤0.15	≤0.15	≤0.03
Composición Química:	0.076	1.48	0.92	0.008	0.013	0.124	0.022	0.027	0.005	0.003
Prueba del metal depositado / All-Weld Metal test: Propiedades Mecánicas Típicas / Typical Mechanical properties										
	Requerimientos					Resultados				
Resistencia a la Tracción (MPa) / Tensile Strength	≥ 480					537				
Limite de Fluencia (MPa) / Yield Strength	≥ 400					447				
Alargamiento (%) / Elongation	≥ 22					24				
Ensayo de Impacto CHARPY-V (J) -30 °C / Impact Test	≥ 54					75				
Observaciones / Observations										



HERBERT RODRIGUEZ CASTRO

Certificado De Calidad / Quality Certificate

ALAMBRES SÓLIDOS
ACERO CARBONO



SOLDAMIG ER70S-6

Alambre macizo para la soldadura de aceros al carbono o de baja aleación por el proceso MAG. Su contenido de silicio y manganeso le confiere excelentes propiedades desoxidantes, lo que asegura una soldadura libre de porosidades en una variedad de trabajos. Está diseñado para aplicaciones en donde se requieren eficiencia y alto grado de deposición.

Clasificaciones	AWS A5.18 / ASME SFA-5.18 : ER70S-6
Aprobaciones	ABS 3SA : ABS 3SA

Typical Tensile Properties				
Condition	Límite de flujo	Resistencia a la tracción	Alargamiento	Tipo de corriente CA/CD /CC (+)(-)
Como queda soldado	410 MPa	497-552 MPa	22 %	CC(+)

Typical Charpy V-Notch Properties			
Declaración condicional	Condition	Testing Temperature	Valor de impacto
AWS	Como queda soldado	-20 °C	81 J

Depósito		
Diameter	Current	Voltage
0.8 mm	80-160 A	17-21 V
1 mm	90-190 A	18-24 V
1.2 mm	130-330 A	19-31 V

- Material de aporte proceso FCAW en material ASTM A36



CERTIFICADO DE CALIDAD
Quality Certificate

Producto/ Product: Weld 71T 1		Dimensiones / Dimensions: 1.2mm (0.045")								
Lote / Heat Number: JL200201		Fecha de Producción/Date: 2020.02.27								
Clasificación / Classification: ASME SFA/AWS A5.20										
Especificación / Especification: E71T - 1C										
Análisis Químico (%) / Chemical Analysis:										
Elemento:	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
Especificación:	≤0.12	≤1.75	≤0.90	≤0.03	≤0.03	≤0.35	≤0.50	≤0.20	≤0.30	≤0.08
Composición Química:	0.055	1.34	0.63	0.016	0.015	0.025	0.024	0.024	0.007	0.022
Prueba del metal depositado / All-Weld Metal test: Propiedades Mecánicas Típicas / Typical Mechanical properties										
	Requerimientos					Resultados				
Resistencia a la Tracción (MPa) / Tensile Strength	490 - 670					558				
Límite de Fluencia (MPa) / Yield Strength	≥ 390					483				
Alargamiento (%) / Elongation	≥ 22					28				
Ensayo de Impacto CHARPY-V (J) -20 °C / Impact Test	≥ 27					125				
Observaciones / Observations										

HERBERT RODRIGUEZ CASTRO

Certificado De Calidad / Quality Certificate

GAS-SHIELDED FLUX-CORED WIRES (FOAW)

MILD STEEL WIRES



ESAB 71T1

ESAB 71T1 is an all position rutile flux cored wire designed for optimum performance with 100% CO₂ shielding gas. It produces a slag with good coverage that is easily removable as well as a weld metal that is consistently free of slag inclusions and porosity.

Classifications Weld Metal	SFA/AWS A5.20 : E71T-1C EN ISO 17632-A : T 42 0 P C 1 H10
Approvals	ABS 2Y400 BV 2Y40 IRS 2Y40GM LR 2Y

Approvals are based on factory location. Please contact ESAB for more information.

Welding Current	DC+
Alloy Type	C-Mn

Typical Tensile Properties

Condition	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation
C1 shielding gas			
As Welded	500 MPa	550 MPa	28 %

Typical Charpy V-Notch Properties

Condition	Testing Temperature	Impact Value
C1 shielding gas		
As Welded	0 °C	95 J
As Welded	-20 °C	40 J

Typical Weld Metal Analysis %



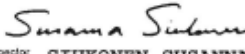
C	Mn	Si
0.05	1.10	0.45

Current Range

Diameter	Current	Voltage
1.6 mm	160-410 A	22-34 V
1.2 mm	140-300 A	21-32 V

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 182

- Lamina de material AISI 316L

		INSPECTION CERTIFICATE 3.1 EN 10204 3.1		Certificate No. Zeugnis Nr. N° du certificat 569417/001		Page Seite Page 1 (01)						
Delivery address, Empfänger, Lieu de livraison WESCO S.A. (NIT:860.527.960-9) AVENIDA CALLE 63 NO. 74 B42 BODEGA 6 PARQUE EMPRESARIAL NORMANDIA BOGOTA COLOMBIA				WESCO S.A. (NIT:860.527.960-9) AVENIDA CALLE 63 NO. 74 B42 BODEGA 6 PARQUE EMPRESARIAL NORMANDIA BOGOTA COLOMBIA								
Requirements, Anforderungen, Exigences ASTM A240/A240M ASME SA-240/SA-240M II A ED. 2019				Our Order No. Unser Auftrag Nr. Notre commande n° 300582598		Your order, Ihre Bestellung, Votre commande WESCO 01						
Product, Erzeugnisform, Produit SHEET, STAINLESS STEEL				Mark of Manufacturer Zeichen des Lieferanten Signe de producteur outokumpu		Process Fertigstellungsart Mode de finition AOD						
Grade, Werkstoff, Nuance TYPE 316L				Tolerances Toleranzen, Tolérances ASTM A 480								
Marking, Kennzeichnung, Marquage A/SA-240 316L 2B				Marks, Versandzeichen, Marques SLIT EDGE								
Line Reihe Ligne	Item Position Poste	Charge-test No. Schmelze-Probe Nr. Coulée n°	Size, Abmessungen, Dimensions	Quantity Stückzahl Nombre	Weight, Gewicht, Poids	Finish Ausführung Fini						
1	1	25574	4,5 X 1524 X 3048 MM	131	21708 KG	2B						
2	2	26330	4,5 X 1524 X 6096 MM	69	22954 KG	2B						
Charge no. Schmelze Nr. Coulée n°	Chemical composition, Chemische Zusammensetzung, Composition chimiques											
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	MO %	N %			
25574	0,021	0,50	1,39	0,034	0,001	17,3	10,0	2,04	0,036			
26330	0,018	0,50	0,92	0,039	0,001	17,2	10,1	2,04	0,036			
Line Reihe Ligne	Mechanical properties, Mechanische Eigenschaften, Caractéristiques mécaniques							Tensile test, Zugversuch, Essai de traction				
	Sample ID Proben ID Echantillon	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	Rm MPa	A5 %	A50 %	%	ISO 6892-1:2019 A223 SAMPLES PERPENDICULAR TO THE ROLLING DIRECTION				
		Hardness Härte, Dureté HBW										
1	01	324	365	612	55	53		TENSILE TEST				
	02	320	362	621	55	53		AT ROOM TEMPERATURE				
2	01	338	371	613	53	51		IN DELIVERY CONDITION				
	02	332	365	609	53	51		RP0.2 PROOF STRENGTH				
								RP1.0 PROOF STRENGTH				
								RM TENSILE STRENGTH				
								A50 ELONGATION GL 50 MM				
								A5 ELONGATION PROPORTION				
								HBW BRINELL HARDNESS				
								HV10 VICKERS HARDNESS				
Identity test, Verwechslungsprüfung, Contrôle d'identification Sizes, Abmessungen, Dimensions Surface, Oberfläche, Surface Test of intergranular corrosion, Prüfung auf Interkristallkorrosion, Test de corrosion intercritique. ASTM A262 PRACTICE E : OK												
We certify that the above mentioned products comply with the terms of the order contract. Wir bestätigen, dass die Lieferung den Vereinbarungen der Bestellung entspricht. Nous certifions que les produits énumérés ci-dessus sont conformes aux prescriptions de la commande.								This test certificate is made by controlled ADP-system and is valid without signature. Dieses Zeugnis wurde von einem überprüften Datenverarbeitungssystem erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi par un système informatique contrôlé et est valide sans signature.				
Outokumpu Stainless Oy  Authorized Inspector Werkstoffprüfer/Inspekteur autorisé SIUKONEN SUSANNA								FI-05490 Tornio, Finland Tel: +358 18 4521, email: cert@outokumpu.com, www.outokumpu.com Domicile: Tornio, Finland. Business Identity Code 0823315-9				

- Resultado de ensayo de espectrometría de arco y chispa para AISI 316L

10/9/2023 10:35:07 AM

RESULTADOS DE ANALISIS

Sample Identification										
SampleNo										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	<0.0020	0.313	1.446	0.0026	<0.00050	17.68	1.626	9.768	<0.253	<0.0010
2.	<0.0020	0.323	1.455	0.0031	<0.00050	17.75	1.659	9.739	<0.249	<0.0010
Ø	<0.0020	0.318	1.450	0.0029	<0.00050	17.72	1.643	9.754	0.251	<0.0010
σ		0.0071	0.0064	0.00036		0.050	0.023	0.021	0.0028	
v		2.233	0.441	12.41		0.282	1.400	0.215	1.116	
	As	B	Co	N	Nb	Sn	Ti	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	<0.0010	<0.0010	0.173	0.049	<0.0010	<0.00050	<0.0010	0.026	<0.020	68.64
2.	<0.0010	<0.0010	0.174	0.050	<0.0010	<0.00050	<0.0010	0.027	<0.020	68.54
Ø	<0.0010	<0.0010	0.173	0.050	<0.0010	<0.00050	<0.0010	0.026	<0.020	68.59
σ			0.0010	0.0010				0.0010		0.071
v			0.578	2.000				3.846		0.104

- Material de aporte proceso SMAW en material AISI 316L

Especificación

UTP 316 L

EN 1600 : E 19 12 3 L R 3 2
 AWSA5.4 : E316L-16

Electrodo de bajo contenido de carbono para soldar aceros inoxidable Cr-Ni y resistentes a los ácidos.

Campo de aplicación

UTP 316 L se usa primordialmente para soldadura de unión y de revestimiento en aceros inoxidables al bajo carbono, del tipo CrNiMo 19/12/3 resistentes al ataque de productos químicos estabilizados como no estabilizado, así como para aceros de la misma composición química. El depósito puede ser utilizado a temperaturas de trabajo de hasta 400°C.

UTP 316 L se utiliza para soldar entre otros, los siguientes materiales:

ASTM	UNS	DIN	Número de material	Material de base
A 240Tp.316	S 31600	X5 CrNiMo 17 12 2	1.4401	Placa, hoja de acero y cinta
A 240Tp.316Ti	S 316 35	X6 CrNiMoTi 17 12 2	1.4571	Placa, hoja de acero y cinta
A 240Tp. 316Ti	S 316 35	X10 CrNiMoTi 18 12	1.4573	Placa, hoja de acero y cinta
A 240Tp.316 Cb	S 316 40	X6 CrNiMoNb 17 12 2	1.4580	Placa, hoja de acero y cinta

Características

UTP 316 L se suelda en todas las posiciones excepto en la vertical descendente. Tiene arco estable y suelda sin salpicaduras. Fácil encendido y reencendido. Separación fácil de la escoria. La superficie del cordón posee un aspecto liso y fino, sin socavaciones.

Propiedades mecánicas típicas del depósito

Resistencia a la Tracción MPa	Alargamiento (l = 4d) %
> 490	>30

Análisis estándar del depósito (% en peso)

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu
< 0,04	17 – 20	11 – 14	2 – 3	0,5 – 2,5	< 1,00	< 0,75

Instrucciones para soldar

Limpiar la zona de soldadura, desengrasándola perfectamente. Utilice arco corto. Utilice sólo electrodos secos y soldar con arco corto. Electrodos húmedos por haber estado expuestos al ambiente, se deben secar a una temperatura entre 250 y 300°C de 2 a 3 h.

Tipo de corriente:	(= +)	(~)
--------------------	-------	-----

Posiciones de soldaduras



Parámetros recomendados

Electrodos	Ø x L(mm)	2,4 x 300	3,2 x 350	4,0 x 400
Amperaje	A	60-80	80-120	100-130

- Material de aporte proceso GMAW en material AISI 316L



BÖHLER EAS 4 M-IG

TIG rod, high-alloyed, stainless

Classifications						
EN ISO 14343-A	EN ISO 14343-B	AWS A5.9				
W 19 12 3 L	SS316L	ER316L				
Characteristics and typical fields of application						
GTAW rod of type W 19 12 3 L / ER316L engineered to a very precise analysis to create a weld deposit of high purity, superior hot cracking a corrosion resistance.						
CVN toughness down to -196 °C, resistant to intergranular corrosion up to +400 °C.						
Base materials						
1.4401 X5CrNiMo17-12-2, 1.4404 X2CrNiMo17-12-2, 1.4435 X2CrNiMo18-14-3, 1.4436 X3CrNiMo17-13-3, 1.4571 X6CrNiMoTi17-12-2, 1.4580 X6CrNiMoNb17-12-2, 1.4583 X10CrNiMoNb18-12, 1.4409 GX2CrNiMo 19-11-2 UNS S31603, S31653; AISI 316L, 316Ti, 316Cb						
Typical analysis of the TIG rods (wt.-%)						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
wt.-%	≤ 0.02	0.5	1.8	18.5	12.3	2.8
Mechanical properties of all-weld metal						
Condition	Yield strength R _{p0.2}	Tensile strength R _m	Elongation (L ₀ =5d ₀)	Impact work ISO-V KV J		
	MPa	MPa	%	+20 °C	-196 °C	
u	470 (≥ 320)	610 (≥ 510)	38 (≥ 25)	140	≥ 32	
u untreated, as welded – shielding gas Argon						
Operating data						
	Polarity: DC (-)	Shielding gas: 100 % Argon	Rod marking: front: † W 19 12 3 L back: ER 316 L	Dimensions (mm)		
				0.8	1.0	1.2
Approvals						
TÜV (00149), DB (43.014.12), DNV (316L), GL (4429), SEPROZ, NAKS (Ø 2.4; 3.0), CE						

- Material de aporte proceso FCAW en material AISI 316L



BÖHLER EAS 4 M-FD

Alambre tubular tipo fluxed cored, de alta aleación, resistente a la corrosión.

Especificación					
Diámetros 1.2 y 1.6 mm.					
EN ISO 17633-A		EN ISO 17633-B		AWS A 5.22	
T 19 12 3 L R M21 (C 1) 3		TS316L-F M21 (C1) 0		E316T0-4/ E316LT0-1	
Diámetros 1.0 mm					
EN ISO 17633-A		EN ISO 17633-B		AWS A 5.22	
T 19 12 3 L P M21 (C1) 1		TS 316L F M21 (C1) 1		E316 LT1 -4/-1	
Campo de aplicación					
Debido a sus características sobresalientes, se aplican estas soldaduras en posición plana y horizontal, con temperatura de servicio entre 120°C hasta 400°C, BÖHLER EAS 4M-FD diámetro 0.9 mm es recomendado para espesores de desde 1.5 mm y de diámetro de 1.2 puede usarse en espesores desde 3.0 mm en adelante. El alambre de 0.9 mm esta diseñado para soldadura en todas posiciones, el alambre de 1.2 mm y 1.6 son recomendados para las soldaduras plana y horizontal					
Materiales base					
1.4401 X5CrNiMo17-12-2, 1.4404 X2CrNiMo17-12-2, 1.4435 X2CrNiMo18-14-3, 1.4436 X3CrNiMo17-13-3, 1.4571 X8CrNiMoTi17-12-2, 1.4580 X6CrNiMoNb17-12-2, 1.4583 X10CrNiMoNb18-12, 1.4409 GX2CrNiMo19-11-2, UNS 31603, S31653; AISI 316L, 316Ti, 316Cb					
Características					
Es un alambre tubular con fundente rutílico del tipo 316L. Provee excelentes características para la aplicación de soldadura en posiciones plana y horizontal con mayores velocidades de depósito. La transferencia del metal se logra a través de arco spray con excelente poder de penetración, logrando depósitos libres de proyecciones metálicas y con auto desprendimiento de escoria. Este alambre tubular ofrece muchas ventajas económicas y de calidad sobre la soldadura con alambres sólidos y arco pulsado, altas cantidades de depósito y productividad son alcanzables, brindando entre otro, los beneficios siguientes:					
- Menos consumo de gas de protección (Ar + 15 - 25 de CO ₂ o 100 % CO ₂)					
- Excelentes características de aplicación (menos esmerlado)					
- Depósitos con mínima decoloración (menos costos de decapado)					
- Fáciles de aplicar con penetración segura (reduciendo los riesgos de defectos en los depósitos de soldadura, mismos que están asociados con costos adicionales por reparaciones).					
Análisis estándar del depósito (% en peso)					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0.0	0.7	1.5	19.0	12.0	2.7
Propiedades mecánicas del depósito					
Condición	Límite de Elasticidad MPa	Resistencia a la Tracción MPa	Alargamiento (L ₀ = 5d ₀) %	Resistencia al impacto ISO-V KV J	
				+20°C	-60°C
Sin Tratamiento Térmico	400 (≥ 320)	560 (≥ 510)	38 (≥ 30)	55	35 (≥ 32)
Resultados sin tratamiento térmico y gas de protección Ar + 18% CO ₂					
Gas de protección					
Ar + 15 - 25% CO ₂ o 100%CO ₂ (M1 -M3, CO ₂)					
Instrucciones para soldar					
Los alambres tubulares böhlerwelding pueden ser soldados con corriente directa y electrodo positivo, al aplicar se recomienda que la antorcha tenga una ligera inclinación en el sentido del avance (aprox. 80°). El ajuste de parámetros es similar al alambre sólido, se requiere de una velocidad más alta al momento de soldar. Recomendamos una mezcla gaseosa del tipo Ar+ 15-25% CO ₂ o 100% CO ₂ . El flujo de gas debe ser de 15-18 l/min. Cuando utilice CO ₂ es necesario incrementar el voltaje con 2 volts más. Re-hornear a 150°C 24 h, si es necesario, precalentamiento y temperatura de interpases son requeridos de acuerdo al material base.					
Posiciones de soldadura			Tipos de corriente		



BÖHLER EAS 4 M-FD

Alambre tubular tipo fluxed cored, de alta aleación, resistente a la corrosión.



Corriente Directa / Electrodo Positivo (DC/EP) (= +)

Parámetros recomendados

Diámetro mm	Posición de soldadura	Espesores mm	Tipo de junta	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Velocidad del alambre (m/min)
0.9	vertical ascendente	5.0 - 15	Bisel en V	100 - 130	22 - 27	9.0 13
0.9		1.5 - 5.0	Horizontal	100 - 160	22 - 32	8.5 16
1.2	Descendente + Horizontal	3.0 - 5.0	Horizontal	130 - 150	21 - 24	5.0 - 7.0
1.2		5.0 - 15	Bisel en V con raíz	130 - 150	21 - 24	5.0 - 7.0
1.2		5.0 - 15	Bisel en V con raíz	190 - 280	28 - 36	9.0 - 18
1.6		9.0 - 20	Bisel en V con raíz	200 - 350	26 - 38	5.0 - 12
0.9	Descendente + Horizontal	1.5 - 5.0	Filete	100 - 160	22 - 32	5.0 12
1.2		3.0 - 7.0	Filete	130 - 230	21 - 32	8.5 - 16
1.2		7.0 - 15	Filete	200 - 280	29 - 36	9.0 - 18
1.6		8.0 - 20	Filete	200 - 350	26 - 38	5.0 - 12

Presentaciones

StaPac (caja de cartón)

Diámetros


0.9 mm	1.2 mm	1.6 mm
Bobina de 15 kg		

Aprobaciones

TÜV (5349.), DB (43.014.15), CWB (E316LT0-1(4)), GL (4571 (C1, M21)), LR (DX BF, 316L S), SEPROZ, CE, DNV

Los datos e información contenidos en esta ficha técnica son exclusivamente para dar orientación acerca de la aplicación de ciertos productos. El usuario es totalmente responsable de la debida utilización de dichos productos para dar cumplimiento con los estándares, especificaciones, procedimientos de mantenimiento y códigos de construcción, fabricación, montaje o reparación aplicables.

- Hoja técnica del gas de protección utilizado en los procesos GMAW y FCAW



Mezcla StarGold®C-25

Fórmula Química Mezcla de Argón-Dióxido de Carbono
No. CAS Argón 7440-37-1
 Dióxido de Carbono 124-38-9
Clasificación DOT Gas No Inflamable
Etiqueta DOT Gas No Inflamable
No. ONU 1956
 (Gases comprimidos n.o.s.)

INFORMACIÓN GENERAL

Descripción del Producto

La mezcla StarGold®C-25 es una mezcla de argón-dióxido de carbono en la cual el componente que va en mayor proporción es el argón y el de menor proporción el dióxido de carbono. La mezcla es No Inflamable porque está conformada por dos gases inertes, es incolora e inodora.

Identificación del Producto y Suministro

La mezcla StarGold®C-25 es suministrada en cilindros para alta presión de color dorado envasada a una presión de 2000 ó 2200 psi dependiendo de las características del cilindro. Los cilindros se identifican mediante una etiqueta de cuello en la que se suministra información sobre las concentraciones, norma AWS A5.32, riesgos, características de la mezcla, manejo del cilindro y atención en caso de emergencia

Las válvulas de los cilindros son válvulas CGA 580 de rosca interna ó rosca hembra que se ajusta en el sentido de las manecillas del reloj.


La mezcla se comercializa en m³ y normalmente el contenido varía entre 7 y 8 m³ dependiendo del tamaño del cilindro y de la presión final de la mezclas, pero también puede ser preparada en la cantidad requerida por el cliente.

USOS Y APLICACIONES

La principal razón para utilizar la mezcla StarGold®C-25 es proteger en forma eficiente la región del arco eléctrico y el pozo de fusión contra la contaminación atmosférica. Influye en la forma de solidificación del metal de soldadura mejorando sus propiedades físicas y químicas.

La mezcla StarGold®C-25 es aplicable en soldaduras con proceso MIG para aceros al carbón y acero al carbón de baja aleación con alambres sólidos. Debido a su alto contenido en dióxido de carbono, su transferencia metálica es un poco limitada.

Posee transferencia estable, baja cantidad de salpicaduras, bajo volumen de escorias y facilidad para retirar la escoria formada. Mejora la presentación del cordón y mejora la eficiencia de deposición. Proporciona gran penetración y buena estabilidad del arco.



PROCESO DE PRODUCCIÓN

La mezcla StarGold®C-25 es producida en la Estación de Llenado de Gases Industriales por el método de presiones parciales que consiste en introducir en el cilindro uno a uno los componentes hasta una presión previamente establecida. Las presiones parciales de cada componente son corregidos según la temperatura alcanzada por el cilindro, de esta manera se garantiza una concentración dentro de especificaciones para el dióxido de carbono y el argón.

COMPATIBILIDAD CON MATERIALES


La mezcla StarGold®C-25 no es corrosiva y por consiguiente puede ser utilizada con una amplia variedad de materiales comerciales que cumplan con los requisitos de presión.

PRINCIPALES CONSIDERACIONES EN EL MANEJO Y EL ALMACENAMIENTO

- El principal peligro de la mezcla StarGold®C-25 es el de causar asfixia por desplazamiento del Oxígeno del aire en espacios confinados.
- Utilizan únicamente equipo aprobado para Argón y para la presión y temperatura de utilización.
- Mantener los recipientes por debajo de 50°C, en un lugar bien ventilado.
- No permitir el retroceso de sustancias hacia el interior del cilindro.
- Debe prevenirse la entrada de humedad al interior del cilindro.
- Solicitar al proveedor las instrucciones para la manipulación del recipiente.
- Abrir las válvulas lentamente y cerrarlas cuando no se utilice el producto.

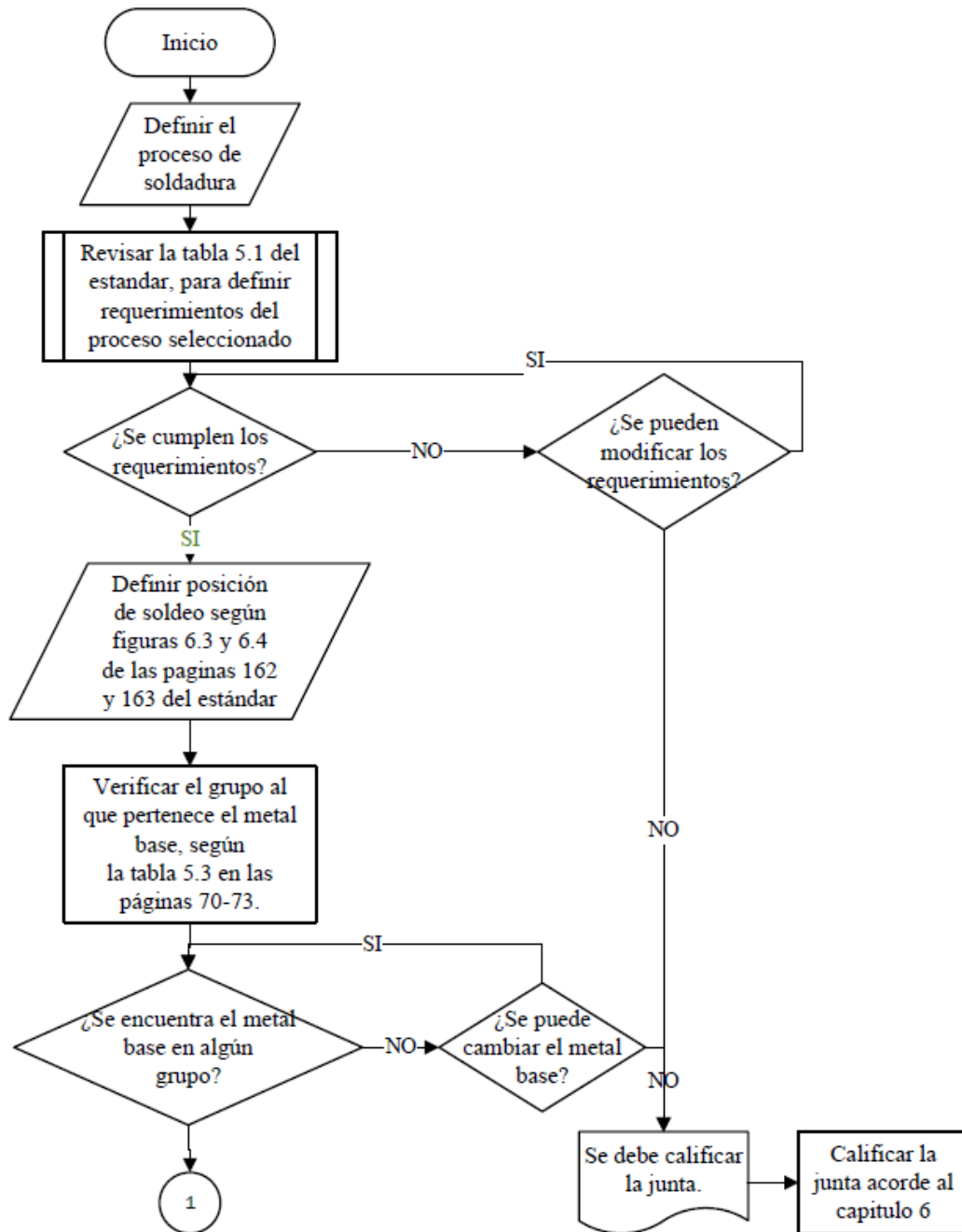
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Humedad: Máximo 10 ppmV
- Total de Hidrocarburos (THC): Máximo 5 ppmV

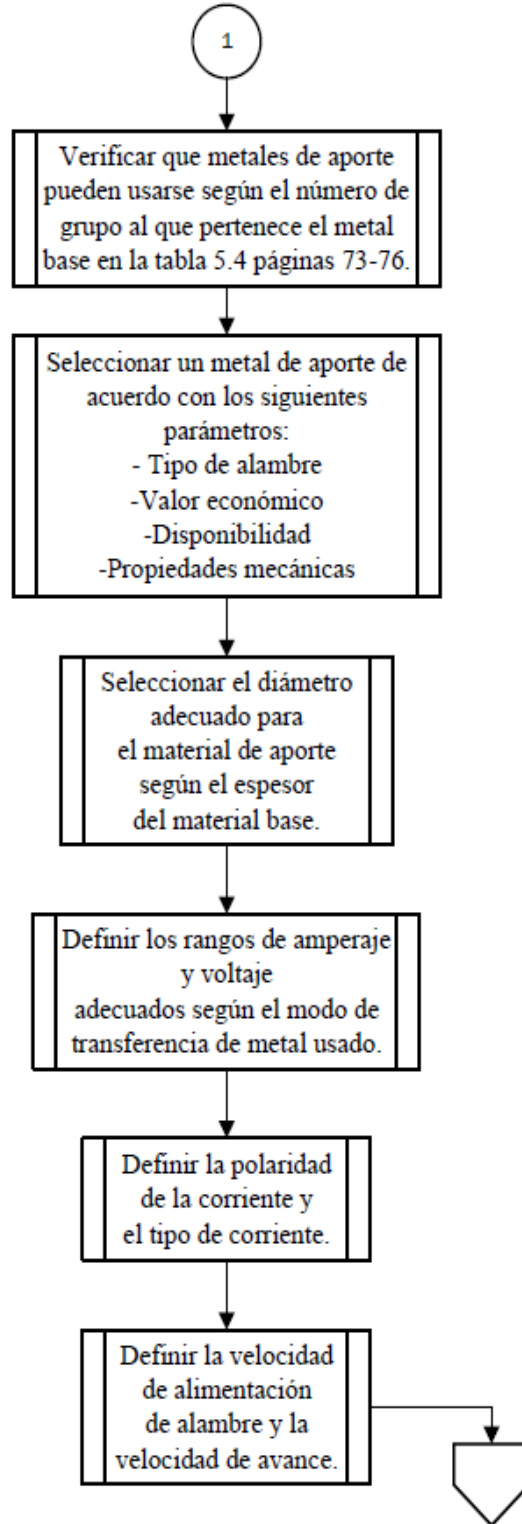


Apéndice B. Definición de parámetros y formatos de los procesos de soldadura

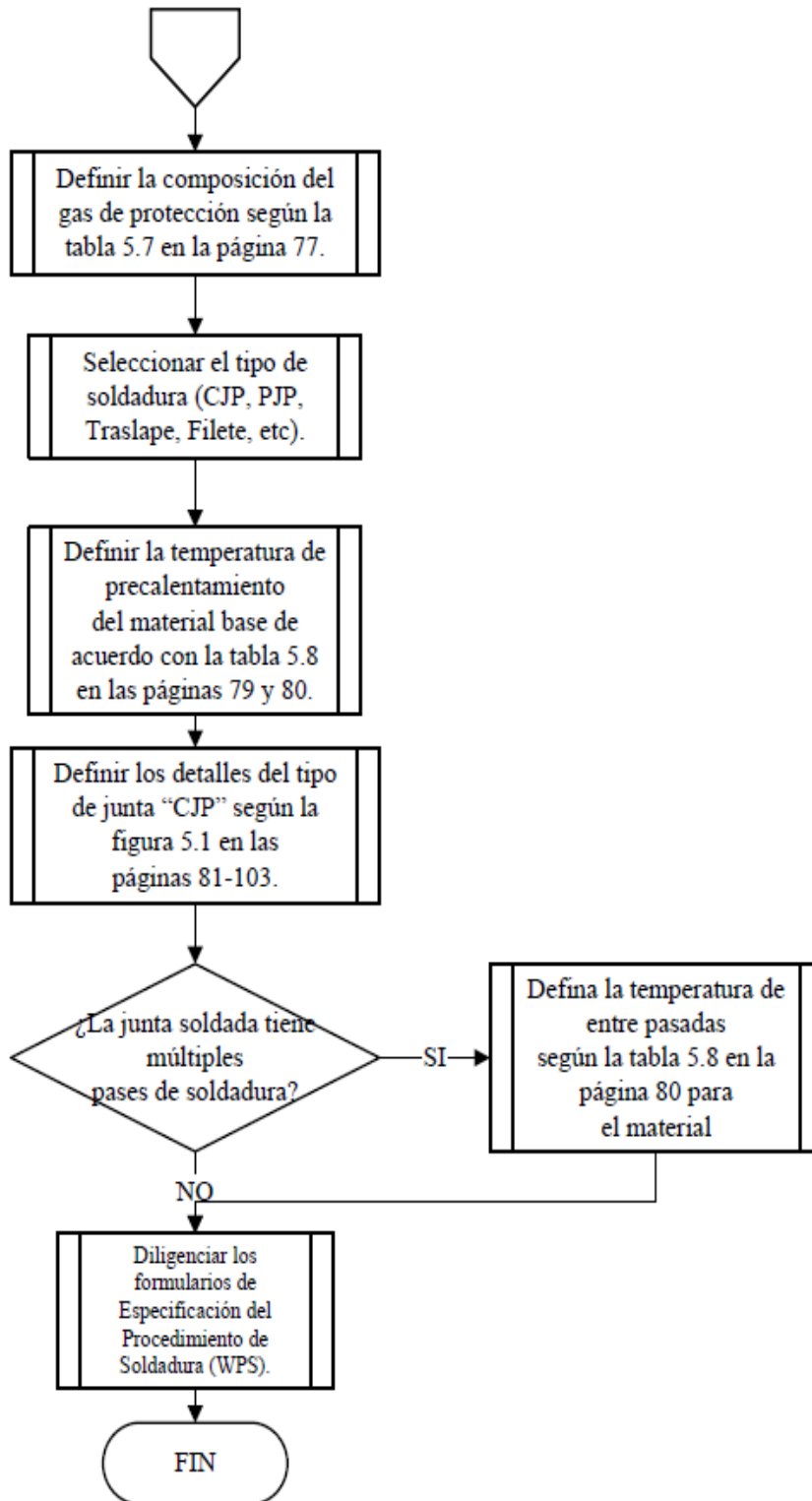
- Algoritmo de tratamiento para la norma AWS D1.1/20. y D1.6/17




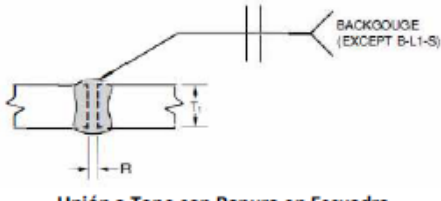
- Algoritmo de tratamiento para la norma AWS D1.1/20. y D1.6/17 (continuación)



- Algoritmo de tratamiento para la norma AWS D1.1/20. y D1.6/17 (continuación)





- Especificación del proceso de soldadura WPS para acero ASTM A36 en proceso SMAW

 Universidad Industrial de Santander		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA WPS AWS D1.1/D1.1M:2020		WPS N°: 1 Fecha: 30/01/2023 Página: 1 de 2 Revisión: 1 Ciudad: B/manga	
Proyecto: Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas					
Empresa: Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales - UIS			Código Aplicable: AWS D1.1 Versión 2020		
Localización de la Obra: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Soporte PQR: Precalificada B-L1b		
Sitio de la Prueba: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Fecha de Elaboración: 25 / 11 / 2021		
PROCESO DE SOLDADURA: SMAW			POSICIÓN		
TIPO	Manual <input checked="" type="checkbox"/>	Semiautomático <input type="checkbox"/>	Posición de Ranura: 1-G Filete: ...		
	Mecanizado <input type="checkbox"/>	Automático <input type="checkbox"/>	Progresión Vertical: Up <input type="checkbox"/> Down <input type="checkbox"/>		
DISEÑO DE LA JUNTA SOLDADA			DETALLES DEL DISEÑO DE LA JUNTA		
Tipo de la Junta: Unión a Tope con Ranura en Escuadra					
Bisel Simple: <input type="checkbox"/>	Bisel Doble: <input type="checkbox"/>				
Respaldo: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>					
Abertura de Raíz (R): 0" +/- 1/8"					
Repelar: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>	Método: Pulidora/Disco Abrasivo				
Limpieza entre Pases: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>	Método: Grata y/o Disco Abrasivo				
METAL BASE			METAL DE APORTE		
PLATINA <input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA <input type="checkbox"/>		Especificación: AWS A5.1		
Metales base	Especificación	Grupo N°/AWS	Clasificación: AWS E-7018		
Material base	ASTM A36	I	Identificación: E-7018		
Soldado a	ASTM A36	I	N° F: 5.1.		
Espesor Platina (T1): 4.5 mm		Espesor Platina (T2): 4.5 mm		Diametro: 3.2 mm	
Diametro Tubería: N.A.		Espesor: N.A.		Nombre Comercial: ESAB E7018	
TECNICA					
Cordón arrastre y/o Oscilado: Arrastre, oscilación maxima de 1/2"			Número de Electrodo: 1 a su longitud de cordón.		
Pasada Multiple o Sencillo (Por cada lado): Sencillo					
Distancia Electrodo entre Pieza y Tubo de Contacto: 3-5 mm			Método de Descarbonado: Manual		
Limpieza Inicial y Entre Pases: mecanica y quimica con solvente			Martilleo: N.A.		
PRECALENTAMIENTO					
Temperatura Minima de Prealentamiento: 25° -30°C, Temperatura ambiente					
Temperatura Minima entre Pases: N/A, unico pase					
Temperatura Maxima entre Pases: N/A, unico pase					
Otros:					

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 193

POST-CALENTAMIENTO						
Rango de Temperaturas: N/A, unico pase, enfriamiento al aire.						
Tiempo de Mantenimiento: N/A, unico pase						
Rata de Enfriamiento: Conveccion natural 5 m/s aprox.						
Otros:						
ENTRADA DE CALOR						
Entrada de Calor Calculado:		KJ/in <input type="text"/>	KJ/mm <input type="text"/>	2369.15		
Máxima Entrada de Calor:						
Minima Entrada de Calor:						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						
Numero de pases de soldadura	Proceso	Metal de Aporte	CORRIENTE		Voltios (Rango)	Velocidad de Avance (mm/seg)
		Diametro	TIPO Y POLARIDAD	Amperios (Velocidad Salida Alambre)		
1	SMAW	1/8"	DCEP	95	62.5	2.5
Elaboró: Oscar Bohórquez _____			Aprobó: Edgar Oviedo _____			


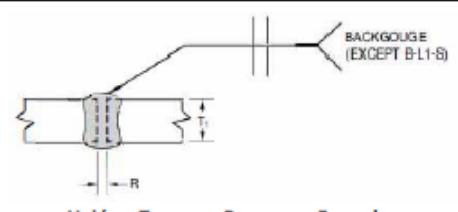
- Especificación del proceso de soldadura WPS para acero ASTM A36 en proceso GMAW

 Universidad Industrial de Santander		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA WPS AWS D1.1/D1.1M:2020		WPS N°: 1 Fecha: 30/01/2023 Página: 1 de 2 Revisión: 1 Ciudad: B/manga	
Proyecto: Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas					
Empresa: Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales - UIS			Código Aplicable: AWS D1.1 Versión 2020		
Localización de la Obra: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Soporte PQR: Precalificada B-L1b-GF		
Sitio de la Prueba: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Fecha de Elaboración: 13/11/2021		
PROCESO DE SOLDADURA: GMAW			POSICIÓN		
TIPO	Manual <input type="checkbox"/>	Semiautomático <input checked="" type="checkbox"/>	Posición de Ranura: 1-G		Filete: ...
	Mecanizado <input type="checkbox"/>	Automático <input type="checkbox"/>	Progresión Vertical: Up <input type="checkbox"/> Down <input type="checkbox"/>		
DISEÑO DE LA JUNTA SOLDADA			DETALLES DEL DISEÑO DE LA JUNTA		
Tipo de la Junta: Unión a Tope con Ranura en Escuadra					
Bisel Simple: <input type="checkbox"/> Bisel Doble: <input type="checkbox"/>					
Respaldo: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>					
Abertura de Raiz (R): 0" +/- 1/8"					
Repelar: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/> Método: Pulidora/Disco Abrasivo					
Limpieza entre Pases: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/> Método: Grata y/o Disco Abrasivo					
METAL BASE			METAL DE APORTE		
PLATINA <input checked="" type="checkbox"/>		TUBERIA <input type="checkbox"/>		Especificación: AWS A5.18	
Metales base		Especificación		Clasificación: AWS ER-70S-6	
Material base		ASTM A36		Identificación: ER70S-6	
Soldado a		ASTM A36		N° F: 5.18	
Espesor Platina (T1): 6 mm		Espesor Platina (T2): 6 mm		Diametro: 0.035"	
Diametro Tuberia: N.A.		Espesor: N.A.		Nombre Comercial: ESAB Weld 70S-6	
GAS DE PROTECCIÓN			CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS		
Tipo: Mezcla		Composición: Ar 75% -CO2 25%		Modo de Transferencia: (GMAW): N.A.	
Caudal: 15 Lt/min		Nombre Comercial: Stargold C25		C. Circuito: <input type="checkbox"/> Globular: <input type="checkbox"/> Spray <input checked="" type="checkbox"/>	
				Corriente: A.C <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/>	
TECNICA					
Cordón arrastre y/o Oscilado: Arrastre, oscilacion maxima de 1/2"			Número de Electrodos: Longitud de alambre		
Pasada Multiple o Sencillo (Por cada lado): Sencillo			Tamaño de la Boquilla: 0.035"		
Distancia Electrodo entre Pieza y Tubo de Contacto: 3-5 mm			Método de Descarbonado: Gel y antispatter		
Limpieza Inicial y Entre Pases: mecanica y química con solvente			Martilleo: N.A.		

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 195

PRECALENTAMIENTO						
Temperatura Minima de Pre calentamiento: 25° -30°C, Temperatura ambiente						
Temperatura Minima entre Pases: N/A, unico pase						
Temperatura Maxima entre Pases: N/A, unico pase						
Otros:						
POST-CALENTAMIENTO						
Rango de Temperaturas: N/A, unico pase, enfriamiento al aire.						
Tiempo de Mantenimiento: N/A, unico pase						
Rata de Enfriamiento: Conveccion natural 5 m/s aprox.						
Otros:						
ENTRADA DE CALOR						
Entrada de Calor Calculado: KJ/ln <input type="text"/> KJ/mm <input type="text"/> 2355.13						
Máxima Entrada de Calor:						
Mínima Entrada de Calor:						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						
Numero de pases de soldadura	Proceso	Metal de Aporte	CORRIENTE		Voltios (Rango)	Velocidad de Avance (mm/seg)
		Diametro	TIPO Y POLARIDAD	Amperios (Velocidad Salida Alambre)		
1	GMAW	0.035"	DCEP	185	24.4	1.92
Elaboró: Oscar Bohórquez			Aprobó: Edgar Oviedo			


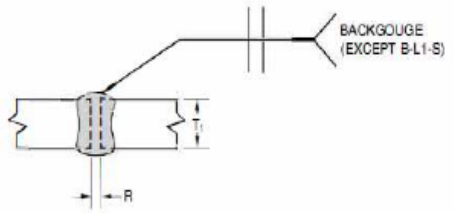
- Especificación del proceso de soldadura WPS para acero ASTM A36 en proceso FCAW

 Universidad Industrial de Santander		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA WPS AWS D1.1/D1.1M:2020		WPS N°: 1 Fecha: 30/01/2023 Página: 1 de 2 Revisión: 1 Ciudad: B/manga		
Proyecto: Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas						
Empresa: Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales - UIS			Código Aplicable: AWS D1.1 Versión 2020			
Localización de la Obra: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Soporte PQR: Precalificada B-L1b-GF			
Sitio de la Prueba: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Fecha de Elaboración: 13/11/2021			
PROCESO DE SOLDADURA: GMAW			POSICIÓN			
TIPO	Manual	<input type="checkbox"/>	Semiautomático	<input checked="" type="checkbox"/>	Posición de Ranura: 1-G Filete: ... Progresión Vertical: Up <input type="checkbox"/> Down <input type="checkbox"/>	
	Mecanizado	<input type="checkbox"/>	Automático	<input type="checkbox"/>		
DISEÑO DE LA JUNTA SOLDADA			DETALLES DEL DISEÑO DE LA JUNTA			
Tipo de la Junta: Unión a Tope con Ranura en Escuadra						
Bisel Simple:	<input type="checkbox"/>	Bisel Doble:				<input type="checkbox"/>
Respaldo:	SI <input type="checkbox"/>	NO <input checked="" type="checkbox"/>				
Abertura de Raiz (R):	0" +/- 1/8"					
Repelar:	SI <input type="checkbox"/>	NO <input checked="" type="checkbox"/>				Método: Pulidora/Disco Abrasivo
Limpieza entre Pases:	SI <input type="checkbox"/>	NO <input checked="" type="checkbox"/>				Método: Grata y/o Disco Abrasivo
METAL BASE			METAL DE APORTE			
PLATINA <input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA <input type="checkbox"/>		Especificación: AWS A5.18			
Metales base	Especificación	Grupo N°/AWS	Clasificación: AWS ER-70S-6			
Material base	ASTM A36	I	Identificación: ER70S-6			
Soldado a	ASTM A36	I	N° F: 5.18			
Espesor Platina (T1): 6 mm	Espesor Platina (T2): 6 mm		Diametro: 0.035"			
Diametro Tubería: N.A.	Espesor: N.A.		Nombre Comercial: ESAB Weld 70S-6			
GAS DE PROTECCIÓN			CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS			
Tipo: Mezcla	Composición: Ar 75% -CO2 25%		Modo de Transferencia: (GMAW): N.A.			
Caudal:	15 Lt/min	Nombre Comercial: Stargold C25	C. Circuito: <input type="checkbox"/>	Globular: <input type="checkbox"/>	Spray <input checked="" type="checkbox"/>	
			Corriente: A.C <input type="checkbox"/>	DCEP <input checked="" type="checkbox"/>	DCEN <input type="checkbox"/>	
TECNICA						
Cordón arrastre y/o Oscilado: Arrastre, oscilacion maxima de 1/2"			Número de Electrodo: Longitud de alambre			
Pasada Multiple o Sencillo (Por cada lado): Sencillo			Tamaño de la Boquilla: 0.035"			
Distancia Electrodo entre Pieza y Tubo de Contacto: 3-5 mm			Método de Descarbonado: Gel y antispatter			
Limpieza Inicial y Entre Pases: mecanica y química con solvente			Martilleo: N.A.			

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 197

PRECALENTAMIENTO						
Temperatura Minima de Precalentamiento: 25° -30°C, Temperatura ambiente						
Temperatura Minima entre Pases: N/A, unico pase						
Temperatura Maxima entre Pases: N/A, unico pase						
Otros:						
POST-CALENTAMIENTO						
Rango de Temperaturas: N/A, unico pase, enfriamiento al aire.						
Tiempo de Mantenimiento: N/A, unico pase						
Rata de Enfriamiento: Conveccion natural 5 m/s aprox.						
Otros:						
ENTRADA DE CALOR						
Entrada de Calor Calculado: KJ/In <input type="text"/> KJ/mm <input type="text"/> 2006.04						
Máxima Entrada de Calor:						
Minima Entrada de Calor:						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						
Numero de pases de soldadura	Proceso	Metal de Aporte	CORRIENTE		Voltios (Rango)	Velocidad de Avance (mm/seg)
		Diametro	TIPO Y POLARIDAD	Amperios (Velocidad Salida Alambre)		
1	FCAW	0.045"	DCEP	219	22.9	2.5
Elaboró: Oscar Bohórquez			Aprobó: Edgar Oviedo			

- Especificación del proceso de soldadura WPS para acero inoxidable AISI 316L en proceso SMAW


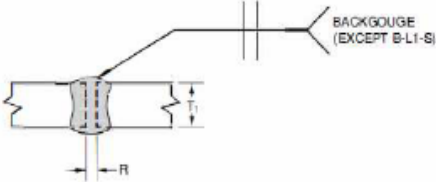
		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA WPS AWS D1.6/D1.6M:2017		WPS N°: 1 Fecha: 12/02/2022 Página: 1 de 2 Revisión: 1 Ciudad: B/manga		
Proyecto: Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas						
Empresa: Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales - Uis			Código Aplicable: AWS D1.6 Versión 2017			
Localización de la Obra: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Soporte PQR: Precalificada B-L1b			
Sitio de la Prueba: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Fecha de Elaboración: 12 / 02 /2022			
PROCESO DE SOLDADURA: SMAW			POSICIÓN			
TIPO	Manual	<input checked="" type="checkbox"/>	Semiautomático	<input type="checkbox"/>	Posición de Ranura: 1-G Filete: ...	
	Mecanizado	<input type="checkbox"/>	Automático	<input type="checkbox"/>	Progresión Vertical: Up <input type="checkbox"/> Down <input type="checkbox"/>	
DISEÑO DE LA JUNTA SOLDADA			DETALLES DEL DISEÑO DE LA JUNTA			
Tipo de la Junta: Unión a Tope con Ranura en Escuadra						
Bisel Simple:	<input type="checkbox"/>	Bisel Doble:				<input type="checkbox"/>
Respaldo:	SI <input type="checkbox"/>	NO <input checked="" type="checkbox"/>				
Abertura de Raiz (R):	0" +/- 1/8"					
Repelar:	SI <input type="checkbox"/>	NO <input checked="" type="checkbox"/>				Método: Pulidora/Disco Abrasivo
Limpieza entre Pases:	SI <input type="checkbox"/>	NO <input checked="" type="checkbox"/>				Método: Grata y/o Disco Abrasivo
METAL BASE			METAL DE APORTE			
PLATINA <input checked="" type="checkbox"/>	TUBERIA <input type="checkbox"/>		Especificación: AWS A5.4			
Metales base	Especificación	Grupo N°/AWS	Clasificación: AWS A5.4 E316L-16			
Material base	AISI A316L	I	Identificación: UTP-316L			
Soldado a	AISI A316L	I	N° F: 5.4			
Espesor Platina (T1): 4.5 mm	Espesor Platina (T2): 4.5 mm		Diámetro: 1/8"			
Diámetro Tubería: N.A.	Espesor: N.A.		Nombre Comercial: UTP 316L			
TECNICA						
Cordón arrastre y/o Oscilado: Arrastre, oscilacion maxima de 1/2"			Número de Electrodo: 1 a su longitud de cordon.			
Pasada Multiple o Sencillo (Por cada lado): Sencillo			Método de Descarbonado: Manual			
Distancia Electrodo entre Pieza y Tubo de Contacto: 3-5 mm			Martilleo: N.A.			
Limpieza Inicial y Entre Pases: mecanica y química con solvente			Martilleo: N.A.			

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 199

PRECALENTAMIENTO						
Temperatura Mínima de Pre calentamiento: 25° -30°C, Temperatura ambiente						
Temperatura Mínima entre Pases: N/A, unico pase						
Temperatura Maxima entre Pases: N/A, unico pase						
Otros:						
POST-CALENTAMIENTO						
Rango de Temperaturas: N/A, unico pase, enfriamiento al aire.						
Tiempo de Mantenimiento: N/A, unico pase						
Rata de Enfriamiento: Conveccion natural 5 m/s aprox.						
Otros:						
ENTRADA DE CALOR						
Entrada de Calor Calculado: KJ/In <input style="width: 50px;" type="text"/> KJ/mm <input style="width: 50px;" type="text"/> 2494.8						
Máxima Entrada de Calor: Arco estable, N/A.						
Minima Entrada de Calor: Arco estable, N/A.						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						
Numero de pases de soldadura	Proceso	Metal de Aporte	CORRIENTE		Voltios (Rango)	Velocidad de Avance (mm/seg)
		Diametro	TIPO Y POLARIDAD	Amperios (Velocidad Salida Alambre)		
1	SMAW	1/8"	DCEP	99	63	2.5
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> <p>Elaboró:</p> <p>Oscar Bohórquez</p> <hr style="width: 200px; margin: 0 auto;"/> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Aprobó:</p> <p>Edgar Oviedo</p> <hr style="width: 200px; margin: 0 auto;"/> </div> </div>						

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 200

- Especificación del proceso de soldadura WPS para acero inoxidable AISI 316L en proceso GMAW


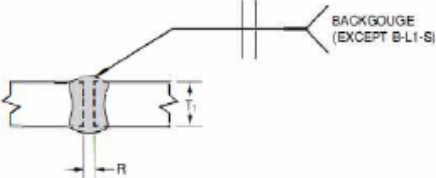
 Universidad Industrial de Santander		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA WPS AWS D1.6/D1.6M:2017		WPS N°: 1 Fecha: 30/01/2023 Página: 1 de 2 Revisión: 1 Ciudad: B/manga			
Proyecto: Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas							
Empresa: Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales - Uis			Código Aplicable: AWS D1.6 Versión 2017				
Localización de la Obra: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Soporte PQR: Precalificada B-L1b				
Sitio de la Prueba: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Fecha de Elaboración: 10 / 12 / 2021				
PROCESO DE SOLDADURA: GMAW			POSICIÓN				
TIPO	Manual	<input type="checkbox"/>	Semiautomático	<input checked="" type="checkbox"/>	Posición de Ranura: 1-G Filete: ... Progresión Vertical: Up <input type="checkbox"/> Down <input type="checkbox"/>		
	Mecanizado	<input type="checkbox"/>	Automático	<input type="checkbox"/>			
DISEÑO DE LA JUNTA SOLDADA			DETALLES DEL DISEÑO DE LA JUNTA				
Tipo de la Junta: Unión a Tope con Ranura en Escuadra							
Bisel Simple: <input type="checkbox"/>		Bisel Doble: <input type="checkbox"/>					
Respaldo: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>							
Abertura de Raiz (R): 0" +/- 1/8"							
Repelar: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>		Método: Pulidora/Disco Abrasivo					
Limpieza entre Pases: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>		Método: Grata y/o Disco Abrasivo					
METAL BASE			METAL DE APORTE				
PLATINA <input checked="" type="checkbox"/>		TUBERIA <input type="checkbox"/>		Especificación: AWS A5.9			
Metales base		Especificación		Clasificación: AWS A5.9 ER316L			
Material base		AISI A316L		Identificación: ER-316L			
Soldado a		AISI A316L		N° F: 5.9			
Espesor Platina (T1): 4.5 mm		Espesor Platina (T2): 4.5 mm		Diametro: 0.9 mm o 0.035 pulg			
Diametro Tubería: N.A.		Espesor: N.A.		Nombre Comercial: BÖEHLER ER 316L			
GAS DE PROTECCIÓN			CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS				
Tipo: Mezcla: Binaria		Composición: 75% Ar 25% CO2		Modo de Transferencia: (GMAW): N.A.			
Caudal: 20 lpm		Nombre Comercial: Stargold C25		C. Circuito: <input type="checkbox"/> Globular: <input type="checkbox"/> Spray <input checked="" type="checkbox"/>			
				Corriente: A.C <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/>			
TECNICA							
Cordón arrastre y/o Oscilado: Arrastre, oscilacion maxima de 1/2"			Número de Electrodos: Longitud de alambre				
Pasada Multiple o Sencillo (Por cada lado): Sencillo			Tamaño de la Boquilla: 0.035"				
Distancia Electrodo entre Pieza y Tubo de Contacto: 3-5 mm			Método de Descarbonado: Gel y antispatter				
Limpieza Inicial y Entre Pases: mecanica y quimica con solvente			Martilleo: N.A.				

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 201

PRECALENTAMIENTO						
Temperatura Minima de Pre calentamiento: 25° -30°C, Temperatura ambiente						
Temperatura Minima entre Pases: N/A, unico pase						
Temperatura Maxima entre Pases: N/A, unico pase						
Otros:						
POST-CALENTAMIENTO						
Rango de Temperaturas: N/A, unico pase, enfriamiento al aire.						
Tiempo de Mantenimiento: N/A, unico pase						
Rata de Enfriamiento: Conveccion natural 5 m/s aprox.						
Otros:						
ENTRADA DE CALOR						
Entrada de Calor Calculado: KJ/In <input style="width: 50px;" type="text"/> KJ/mm <input style="width: 50px;" type="text"/> 1462.5						
Máxima Entrada de Calor: Arco estable, N/A.						
Minima Entrada de Calor: Arco estable, N/A.						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						
Numero de pases de soldadura	Proceso	Metal de Aporte	CORRIENTE		Voltios (Rango)	Velocidad de Avance (mm/seg)
		Diametro	TIPO Y POLARIDAD	Amperios (Velocidad Salida Alambre)		
1	GMAW	0.035 "	DCEP	130	22.5	2.0
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> Elaboró: <u>Oscar Bohórquez</u> </div> <div style="width: 45%;"> Aprobó: <u>Edgar Oviedo</u> </div> </div>						

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 202

- Especificación del proceso de soldadura WPS para acero inoxidable AISI 316L en proceso FCAW

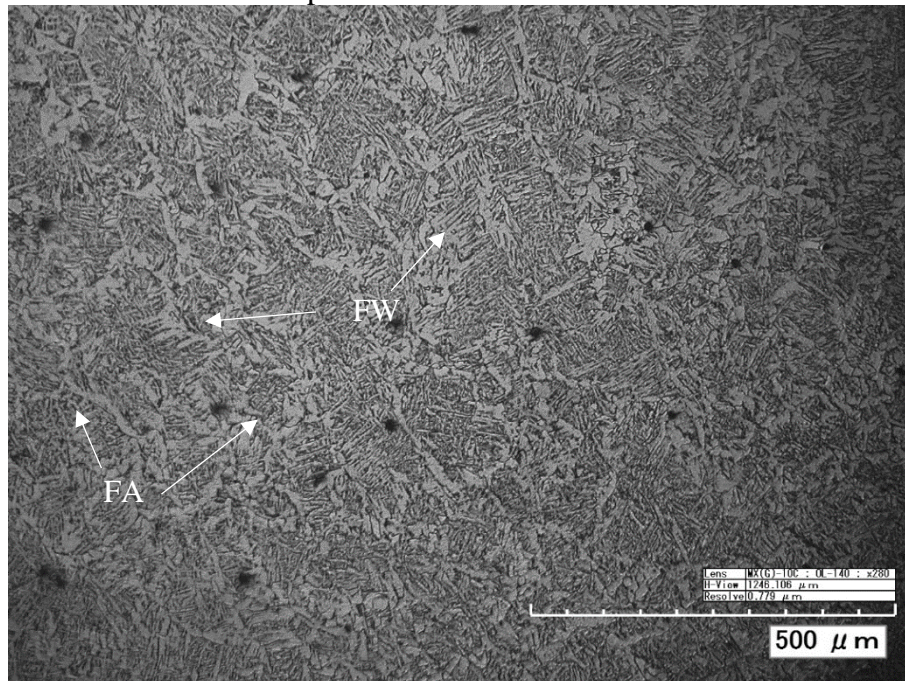
 Universidad Industrial de Santander		ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA WPS AWS D1.6/D1.6M:2017		WPS N°: 1 Fecha: 30/01/2023 Página: 1 de 2 Revisión: 1 Ciudad: B/manga			
Proyecto: Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas							
Empresa: Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales - Uis			Código Aplicable: AWS D1.6 Versión 2017				
Localización de la Obra: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Soporte PQR: Precalificada B-L1b				
Sitio de la Prueba: Lab. De fabricación, Esc. Ing. Mec. - UIS			Fecha de Elaboración: 15 / 12 /2021				
PROCESO DE SOLDADURA: FCAW				POSICIÓN			
TIPO	Manual	<input type="checkbox"/>	Semiautomático	<input checked="" type="checkbox"/>	Posición de Ranura: 1-G Filete: ... Progresión Vertical: Up <input type="checkbox"/> Down <input type="checkbox"/>		
	Mecanizado	<input type="checkbox"/>	Automático	<input type="checkbox"/>			
DISEÑO DE LA JUNTA SOLDADA			DETALLES DEL DISEÑO DE LA JUNTA				
Tipo de la Junta: Unión a Tope con Ranura en Escuadra							
Bisel Simple: <input type="checkbox"/>		Bisel Doble: <input type="checkbox"/>					
Respaldo: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>							
Abertura de Raiz (R): 0" +/- 1/8"							
Repelar: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>		Método: Pulidora/Disco Abrasivo					
Limpieza entre Pases: SI <input type="checkbox"/> NO <input checked="" type="checkbox"/>		Método: Grata y/o Disco Abrasivo					
METAL BASE			METAL DE APORTE				
PLATINA <input checked="" type="checkbox"/>		TUBERIA <input type="checkbox"/>		Especificación: ASW A5.22			
Metales base		Especificación		Grupo N°/AWS			
Material base		AISI A316L		1			
Soldado a		AISI A316L		1			
Esesor Platina (T1): 4.5 mm		Esesor Platina (T2): 4.5 mm		Clasificación: AWS A5.22 E316LT0-4			
Diametro Tubería: N.A.		Esesor: N.A.		Identificación: E316LT0-4			
				N° F: 5.22.			
				Diametro: 1.2 mm o 0.045 pulg			
				Nombre Comercial: BÖEHLER EAS 4M-FD			
GAS DE PROTECCIÓN			CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS				
Tipo: Mezcla: Binaria		Composición: 75% Ar 25% CO2		Modo de Transferencia: (GMAW): N.A.			
Caudal: 10 lpm		Nombre Comercial: Stargold C25		C. Circuito: <input type="checkbox"/> Globular: <input type="checkbox"/> Spray <input checked="" type="checkbox"/>			
				Corriente: A.C <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/>			
TECNICA							
Cordón arrastre y/o Oscilado: Arrastre, oscilacion maxima de 1/2"			Número de Electrodo: Longitud de alambre				
Pasada Multiple o Sencillo (Por cada lado): Sencillo			Tamaño de la Boquilla: 0.045"				
Distancia Electrodo entre Pieza y Tubo de Contacto: 3-5 mm			Método de Descarbonado: Gel y antispatter				
Limpieza Inicial y Entre Pases: mecanica y quimica con solvente			Martilleo: N.A.				

MODELO MATEMÁTICO PARA SELECCIÓN DE PROCESOS DE SOLDADURA 203

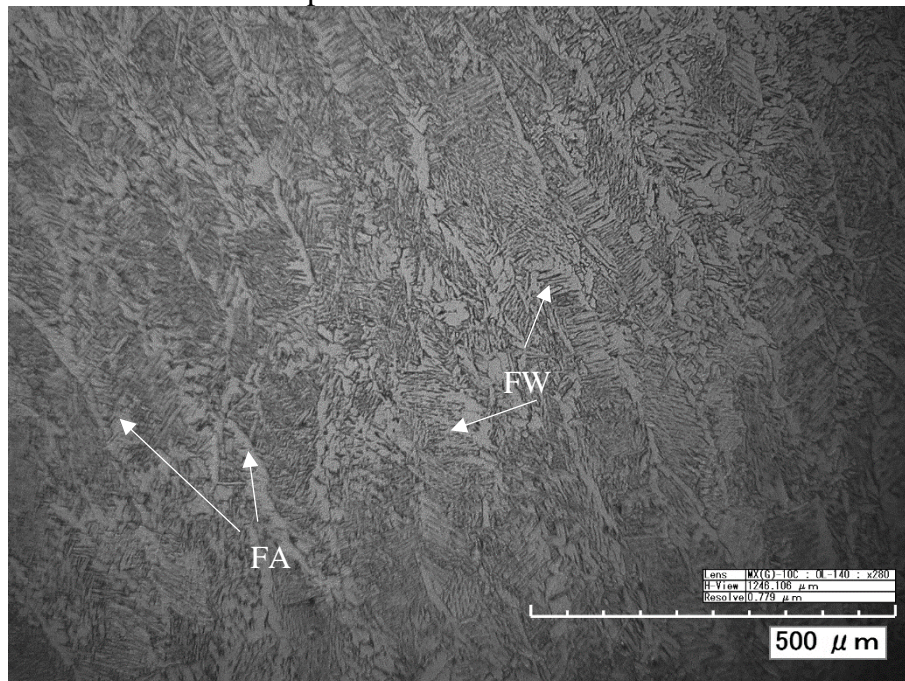
PRECALENTAMIENTO						
Temperatura Minima de Precalentamiento: 25° -30°C, Temperatura ambiente						
Temperatura Minima entre Pases: N/A, unico pase						
Temperatura Maxima entre Pases: N/A, unico pase						
Otros:						
POST-CALENTAMIENTO						
Rango de Temperaturas: N/A, unico pase, enfriamiento al aire.						
Tiempo de Mantenimiento: N/A, unico pase						
Rata de Enfriamiento: Conveccion natural 5 m/s aprox.						
Otros:						
ENTRADA DE CALOR						
Entrada de Calor Calculado:		KJ/In <input type="text"/>	KJ/mm <input type="text"/>	2076.8		
Máxima Entrada de Calor: Arco estable, N/A.						
Minima Entrada de Calor: Arco estable, N/A.						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						
Numero de pases de soldadura	Proceso	Metal de Aporte	CORRIENTE		Voltios (Rango)	Velocidad de Avance (mm/seg)
		Diametro	TIPO Y POLARIDAD	Amperios (Velocidad Salida Alambre)		
1	FCAW	0.045 "	DCEP	220	23.6	2.5
Elaboró: Oscar Bohórquez			Aprobó: Edgar Oviedo			

Apéndice C. Figuras de resultados de ensayos.

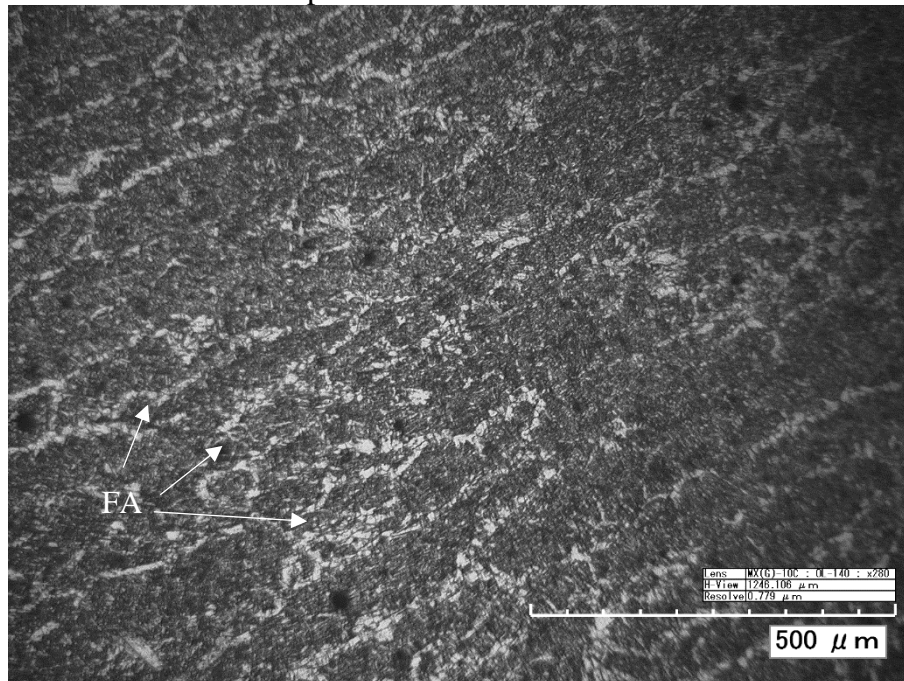
- Micrografías de la zona de fusión para ASTM A36 -Proceso SMAW a 280X



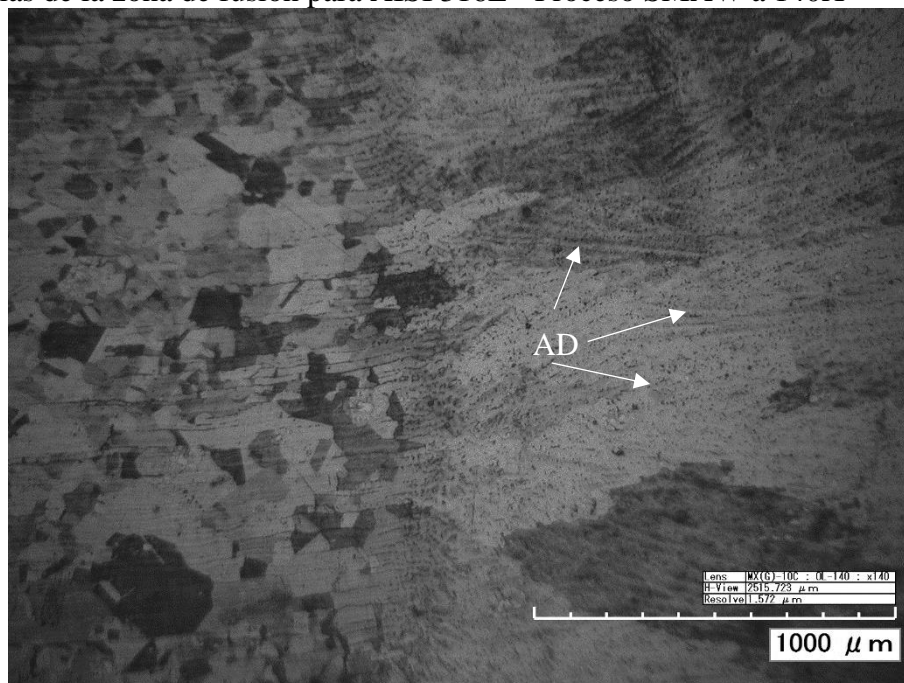
- Micrografías de la zona de fusión para ASTM A36 -Proceso GMAW a 280X



- Micrografías de la zona de fusión para ASTM A36 -Proceso FCAW a 280X



- Micrografías de la zona de fusión para AISI 316L - Proceso SMAW a 140X



- Micrografías de la zona de fusión para AISI 316L -Proceso GMAW a 140X



- Micrografías de la zona de fusión para AISI 316L -Proceso FCAW a 140X



- Probetas falladas de ensayo de tracción material ASTM A36 sin proceso de soldadura o probetas de material base.



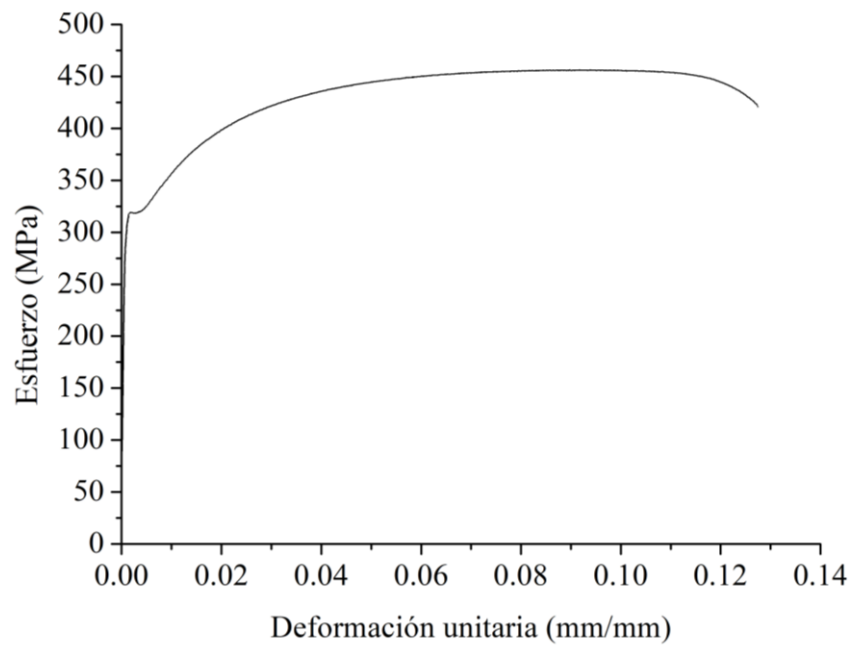
- Probetas falladas de ensayo de tracción material ASTM A36 con proceso de soldadura SMAW.



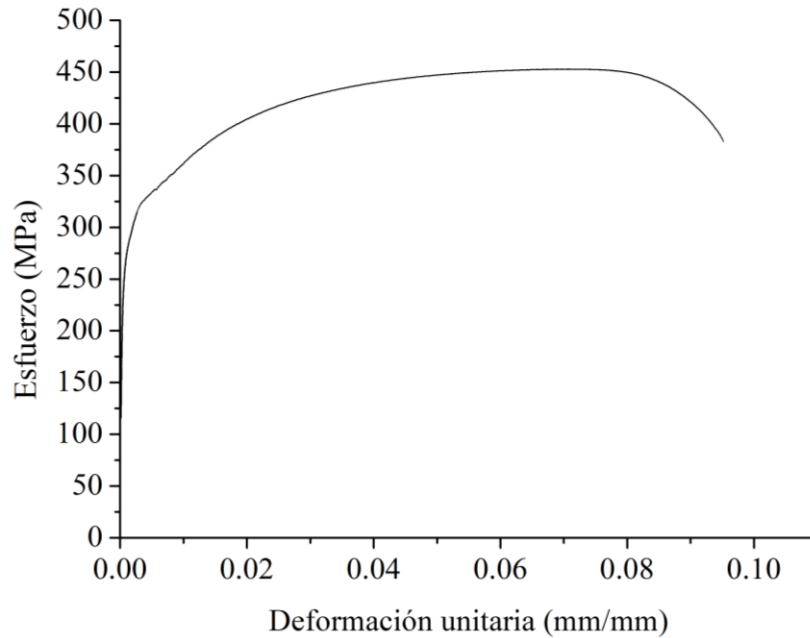
- Probetas falladas de ensayo de tracción material ASTM A36 con proceso de soldadura FCAW.



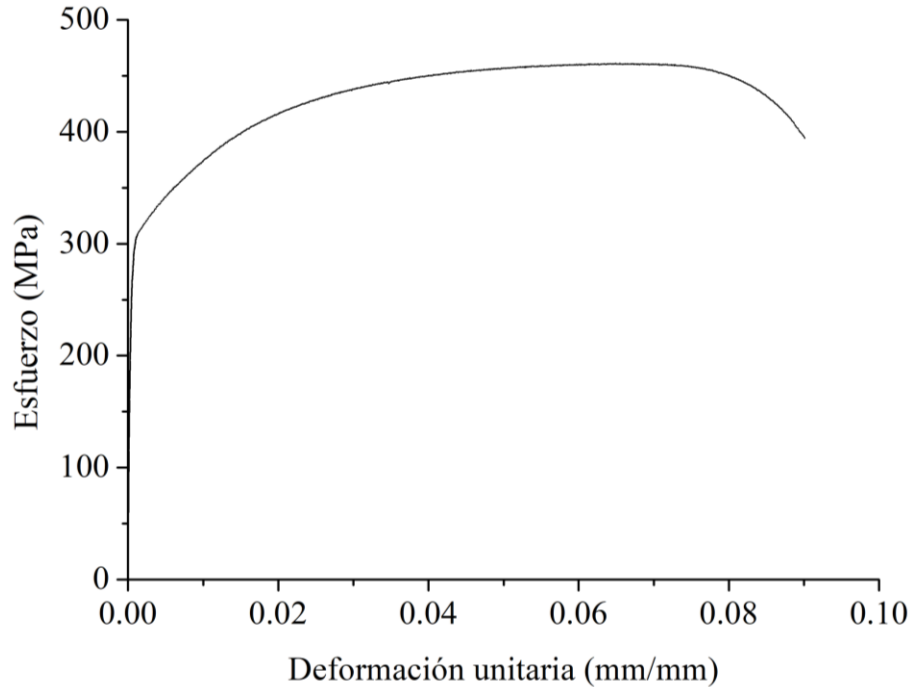
- Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para ASTM A36 sin proceso de soldadura o probetas de material base.



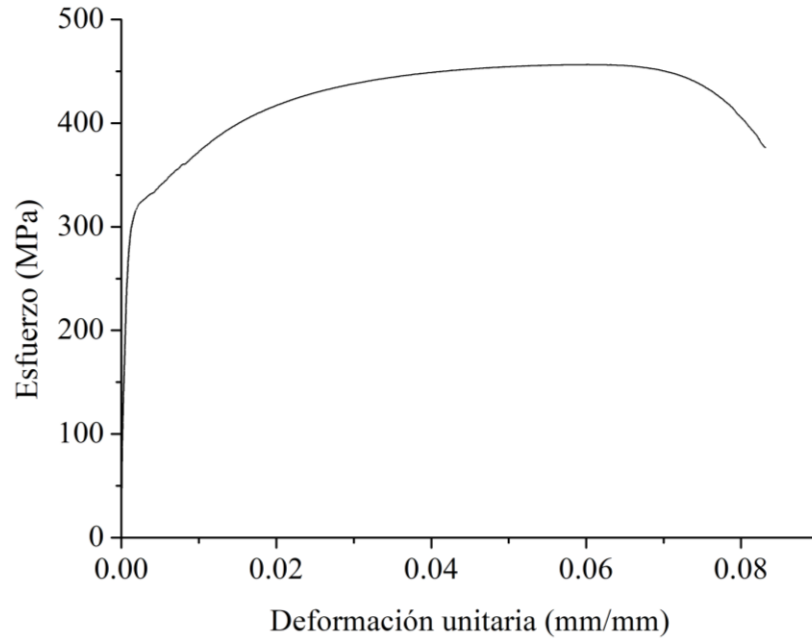
- Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para ASTM A36 con proceso de soldadura SMAW.



- Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para ASTM A36 con proceso de soldadura GMAW.



- Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para ASTM A36 con proceso de soldadura FCAW.



- Probetas falladas de ensayo de tracción material AISI 316L sin proceso de soldadura o probetas de material base.



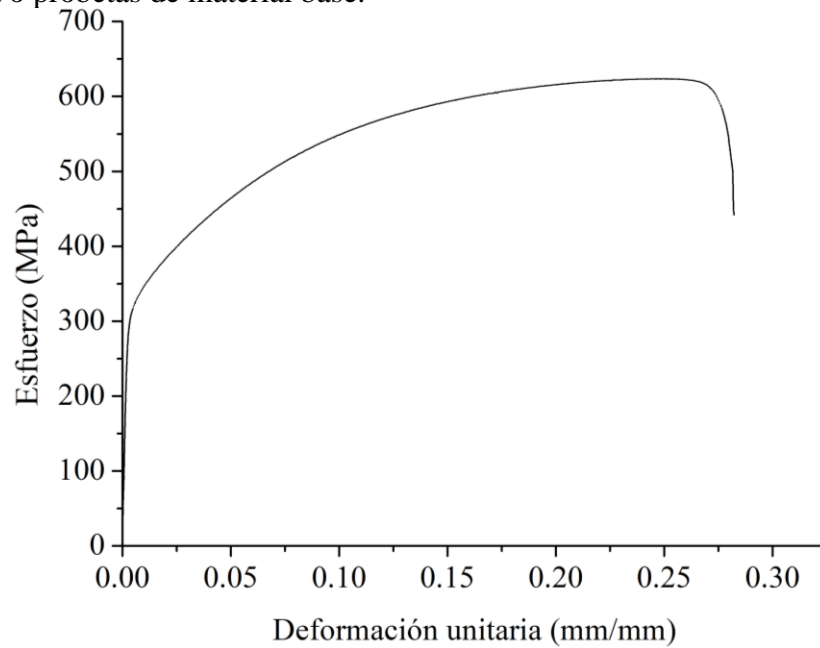
- Probetas falladas de ensayo de tracción material AISI 316L con proceso de soldadura SMAW.



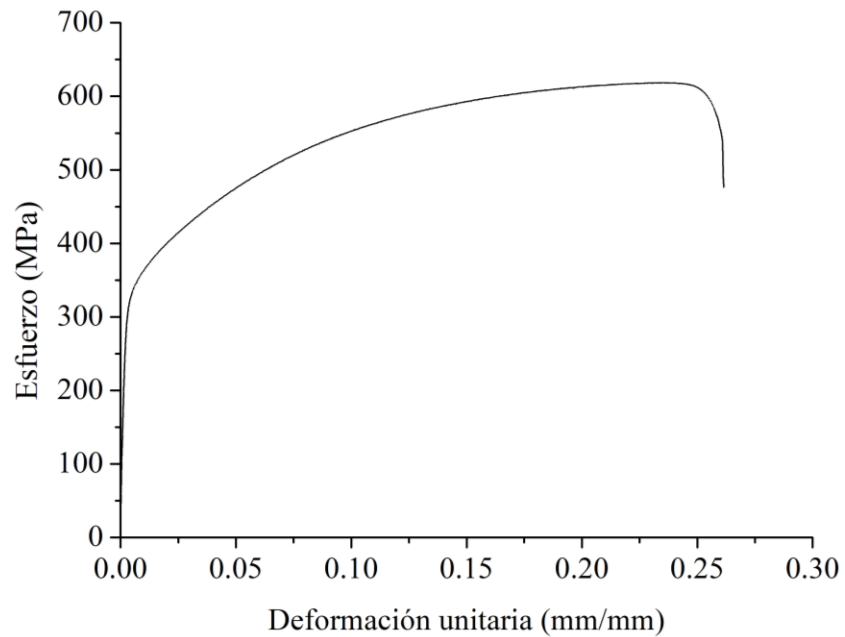
- Probetas falladas de ensayo de tracción material AISI 316L con proceso de soldadura FCAW.



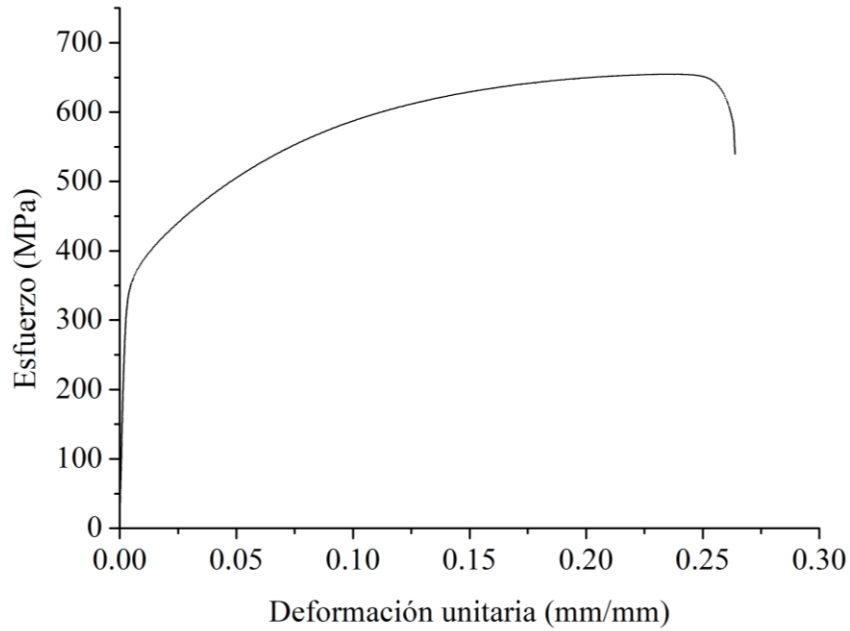
- Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L sin proceso de soldadura o probetas de material base.



- Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L con proceso de soldadura SMAW.



- Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L con proceso de soldadura GMAW.



- Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L con proceso de soldadura FCAW.

