

Selección de procesos de soldadura por arco eléctrico basado en el comportamiento mecánico de las juntas soldadas

Oscar Bohorquez-Becerra¹, Mauricio Rincón-Ortiz², Alberto Pertuz-Comas³, Laura Arenas-Cordero⁴, Jorge Diaz-Rodríguez⁵

¹Grupo de Investigación en Diseño y Manufactura DIMA, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander UIS, Colombia. Email: obohorbe@correo.uis.edu.co

²Grupo de Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales GIMAT, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Universidad Industrial de Santander UIS, Colombia. Email: mrincono@uis.edu.co

³Grupo de Investigaciones en Corrosión GIC, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander UIS, Colombia. Email: apertuzc@uis.edu.co

⁴Grupo de Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales GIMAT, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Universidad Industrial de Santander UIS, Colombia. Email: lxarecor@uis.edu.co

⁵Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Guadalajara 45201, México. Email: jorgegdiaz@tec.mx

Resumen

La soldadura por arco eléctrico es empleada como técnica de unión de materiales en los procesos de diseño, fabricación y mantenimiento. Existiendo diversos procesos de soldadura por arco eléctrico, la selección del proceso adecuado al tipo de carga o funcionalidad que tendrá la junta soldada no posee una argumentación sólida que este respaldada en estudios de resistencia y durabilidad de los materiales, así como de sus características mecánicas o metalúrgicas. Este trabajo se desarrolló con el propósito de generar un conocimiento que permita tomar decisión al respecto. Se diseñó un experimento factorial que incluyó tres procesos de soldadura por arco eléctrico, en un acero estructural ASTM A36. Se generaron juntas precalificadas a tope bajo norma estructural de fabricación y se aplicaron procedimientos de caracterización microestructural, así como ensayos de tensión, microdureza y fatiga. Los resultados permitieron cuantificar diferencias relevantes entre la influencia de cada uno de los procesos de soldadura y el material base, estas cuantificaciones fueron revisadas para determinar el proceso que generó menor afectación en el ensayo estático y de igual forma con el ensayo dinámico. Los resultados de la selección mostraron coherencia con los comportamientos obtenidos en la caracterización de los materiales encontrando consistencia en la decisión.

Palabras clave: Soldadura, Manufactura, Selección de procesos, Caracterización, Acero.

Abstract

Electric arc welding is used as a technique for joining materials in the design, manufacturing and maintenance processes. Since there are several electric arc welding processes [1], the selection of the appropriate process for the type of load or functionality that the welded joint will have does not have a solid argumentation that is supported by studies of resistance and durability of the materials, as well as their mechanical or metallurgical characteristics. This work was developed with the purpose of generating knowledge that allows deciding in this regard. A factorial experiment was designed that included three electric arc welding processes in an ASTM A36 structural steel. Pre-qualified butt joints were generated under structural fabrication standards and microstructural characterization procedures were applied, as well as tension, microhardness and fatigue tests. The results allowed quantifying relevant differences between the influence of each of the welding processes and the base material, these quantifications were reviewed to determine the process that generated less affectation in the static test and likewise with the dynamic test. The results of the selection showed coherence with the behaviors obtained in the characterization of the materials, finding consistency in the decision.

Keywords: Welding, Manufacturing, Process selection, Materials Characterization, Steel

1. Introducción

La soldadura es un proceso de unión que genera cambios en el comportamiento mecánico del material al que se aplica. Estos cambios pueden producirse en función de los parámetros de cada proceso [1]. Por lo tanto, es crucial determinar la soldabilidad de cada material, lo que puede hacerse mediante un análisis metalúrgico y mecánico [2].

La microestructura del acero estructural A36 cuando se suelda puede verse afectada por variables como la temperatura máxima alcanzada, la velocidad de transferencia de calor y la velocidad de enfriamiento, que a su vez dependen de factores como el espesor, el tipo de soldadura y el precalentamiento del material [3]. Los resultados microestructurales pueden estudiarse mediante un análisis metalúrgico. Generalmente se observan tres zonas en el acero soldado, la zona de fusión, la zona afectada por el calor y la zona del material base. Cada una de estas zonas presentará una microestructura diferente que dependerá de las condiciones en las que se haya realizado la unión [4]. Por ejemplo, en la zona afectada por el calor se puede observar un aumento del tamaño de grano con respecto al material base, tal y como determina [5] en su trabajo. En cuanto a la zona de fusión, [6] en su trabajo de investigación encontró un mayor tamaño de grano con respecto a la zona afectada por el calor.

En cuanto a la dureza después de la aplicación de la soldadura en el acero A36, se encontró que un aumento en la tasa de transferencia de calor puede disminuir la dureza del material, como se puede observar en el estudio de [7], donde el calor transferido por el arco a una temperatura de enfriamiento constante.

Por otro lado, el medio de enfriamiento también produce cambios en la dureza, como se puede ver en el estudio de [8] donde calculó valores de dureza en la zona afectada por el calor y en el metal base de 79.6 HRB y 85.7 HRB cuando utilizó aire como medio de enfriamiento, mientras que cuando se utilizó agua estos valores fueron de 79.0 HRB y 83.9 HRB.

Teniendo en cuenta las investigaciones anteriores, este estudio pretende ampliar el conocimiento sobre la soldadura por arco eléctrico en un material ampliamente utilizado en la industria, como es el acero estructural A36. Para ello, se evaluó la microestructura y la dureza utilizando SMAW, GMAW y FCAW.

2. Marco metodológico

2.1. Materiales

En la etapa inicial, se cortaron placas de 400 mm de espesor de 4,5 mm a cortante y en sentido longitudinal, siguiendo la dirección de conformación. Las uniones se prepararon bajo las indicaciones de la norma de construcción AWS D1.1 [9] para aceros estructurales de bajo carbono cuya composición se presenta en la Tabla 1. Bajo esta misma norma, se implementó la selección del tipo de material de aporte y algunas variables geométricas sugeridas para configurar una junta precalificada bajo la denominación de junta a tope sin bisel ni varilla de respaldo.

Tabla 1. Composición química de materiales empleados.

Composición química				
Elemento	Lámina	SMAW	GMAW	FCAW
%C	0.15	0.06	0.076	0.055
%Mn	0.27	1.05	1.48	1.34
%P	0.014	0.02	0.008	0.016
%S	0.07	0.01	0.013	0.015
%Si	0.14	0.44	0.92	0.63
%Cr	0.32	0.02	0.027	0.024

2.2. Equipos

La aplicación de los procesos GMAW y FCAW se ejecutó con una máquina de carro mecanizado, evitando la fluctuación generada por los métodos manuales. El equipo ofrece varias ventajas. Una distancia constante en la aplicación del material de aporte, una velocidad constante en el avance de la aplicación y un valor de oscilación constante para la deposición del material de aporte. La instalación del equipo fue desarrollada como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Estación mecanizada de soldadura para aplicación de procesos GMAW y FCAW.

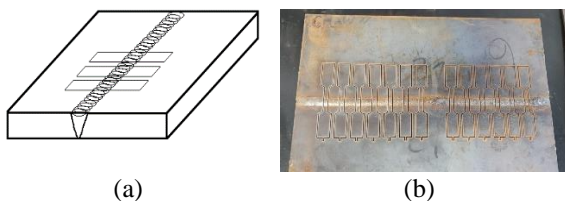
El proceso SMAW, debido a la dificultad del mecanizado, fue aplicado por personal certificado. Los parámetros utilizados en cada proceso se mencionan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros usados en cada proceso de soldadura.

Parámetros usados en cada proceso			
Parámetro	SMAW	GMAW	FCAW
Voltaje [V]	62.5	24.4	22.9
Corriente [A]	95	185	219
Impedancia [%]	10	50	75
Flujo de gas [lpm]	NA	15	15

Para cada una de las probetas, se prestó especial atención a la ubicación central de la unión, con el fin de no generar defectos o desviaciones durante la deposición del material de aporte. Una vez obtenidas las probetas, se realizaron técnicas de inspección visual de acuerdo con las normas AWS B1.11 [10] para la aceptación de las uniones realizadas.

El material de la probeta se extrajo con un sistema de corte por chorro de agua, evitando así la afectación térmica de las piezas. La orientación de las piezas obtenidas corresponde a cortes transversales respecto a la dirección longitudinal del avance de aplicación del cordón de soldadura. Esto permite el análisis del material configurado por la unión soldada. La figura 2 muestra un esquema de la extracción de las probetas, así como de las probetas cortadas.

**Figura 2.** Esquema de posición de obtención de muestras (a), muestras cortadas (b).

Las probetas de acero bajo en carbono ASTM A36 sometidas a los procesos de soldadura SMAW, GMAW y FCAW fueron diseñadas utilizando la norma ASTM E384 [11] para los ensayos de dureza con mediciones apropiadas para incluir la zona del metal base, la zona afectada por el calor y la zona de fusión. Adicionalmente, para el proceso metalográfico, las probetas fueron previamente preparadas como indica la norma ASTM E3.0 [12], desarrollando una superficie lisa y plana con un acabado espejo de 1.0 micras [μm] de tamaño mediante pulido con papel abrasivo de diferentes rangos desde nivel 80 hasta nivel 1500 y acabado en disco de paño con pasta de diamante de una micra 1.0 [μm]. Adicionalmente, las probetas de metalografía fueron colocadas en baquelita para su mejor manejo en el equipo de microscopía. Las probetas de acero estructural fueron atacadas con reactivo Nital 2% durante 10 segundos utilizando la norma ASTM 407 [13], para poder percibir las microestructuras formadas debido a la afectación generada por el proceso de soldadura. Para la medición

de la dureza, se utilizó un microdurómetro Bruker Tribolab siguiendo el patrón estándar para el espaciado de indentación. Se utilizó un indentador Vickers estándar con punta piramidal con valores de carga de indentación de 0.4 [gf] cada 0.2 mm con medidas diagonales medias de 40 micras. Para el estudio metalográfico, se utilizó un microscopio óptico metalúrgico invertido Olympus, referencia GX71, y también se emplearon como recursos comparativos el Handbook of Metallography Volumen 9 [14] y el Handbook of Welding Volumen 6 [15]. El microdurómetro y el microscopio óptico se muestran en la figura 3.



(a)



(b)

Figura 3. Microdurómetro Bruker Tribolab (a), Microscopio óptico metalúrgico invertido Olympus, referencia GX71.

Los ensayos de tracción y fatiga fueron desarrollados en la máquina universal de ensayos MTS Bionix modelo 370.02 de la Universidad Industrial de Santander. Los parámetros aplicados para estos ensayos se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros usados en los ensayos de tracción y fatiga

Parámetros usados en cada proceso	
Tracción	
Estándar	ASTM E8/E8M-13
Velocidad de aplicación de carga	4 mm/mm
Fatiga	
R, relación de carga	0.1 tracción - tracción
Valores de esfuerzo	Decremento 5% desde 95% S_y (95%, 90%, 85%, 80%)
Frecuencia	30 Hz

3. Resultados

3.1. Análisis microestructural

Se muestra la caracterización microestructural de las áreas en la figura 4, la Zona de Fusión (FZ), Zona Afectada por el Calor (HAZ) y Metal Base (BM) de los

Procesos de soldadura evaluados (SMAW, GMAW, FCAW) en acero estructural ASTM A36, utilizando el método de microscopía óptica.

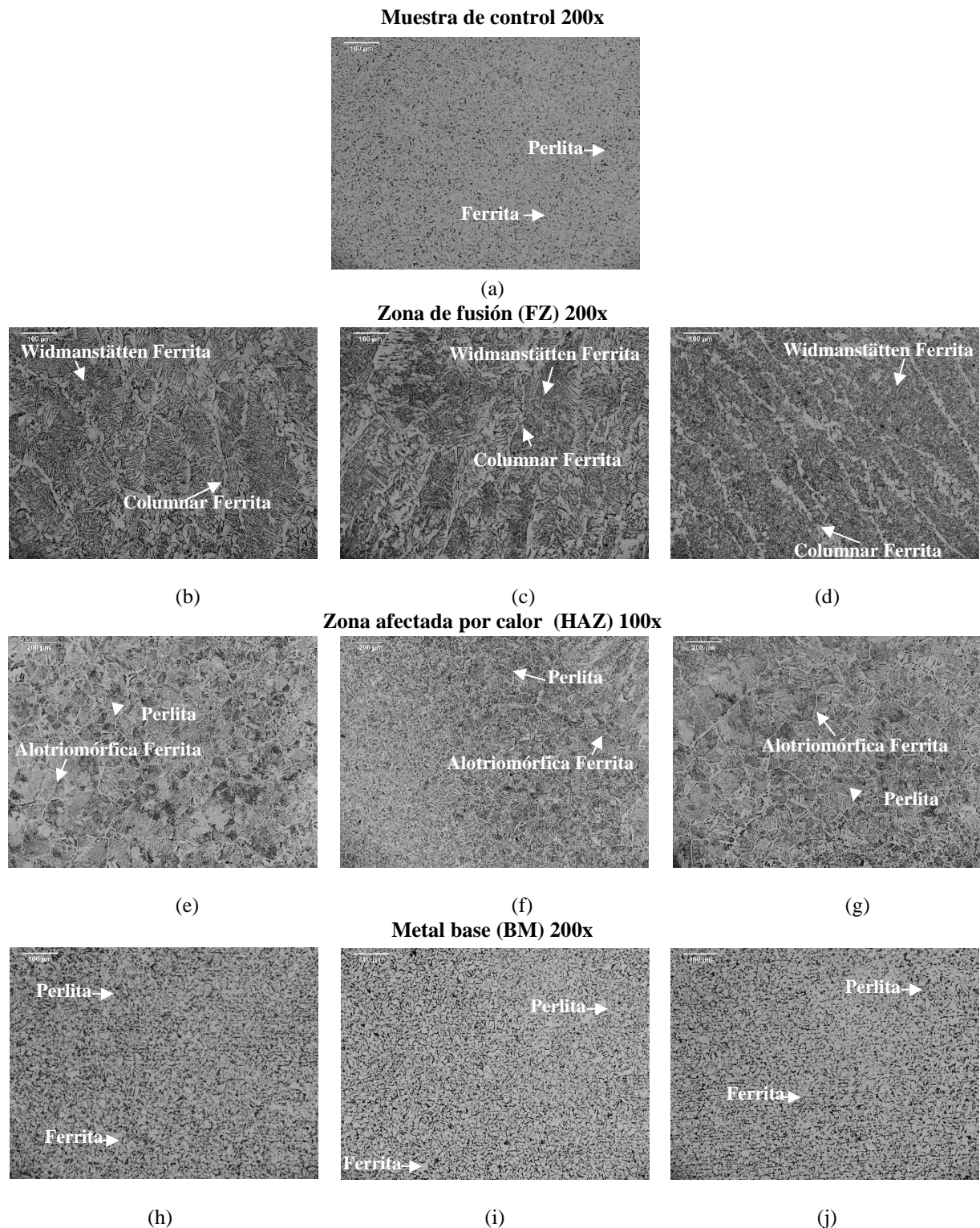


Figura 4. Microestructura de la FZ, HAZ, BM en procesos de soldadura SMAW, GMAW y FCAW.

3.1.1. Zona de fusión

Se caracterizó por la presencia de ferrita columnar en mayor cantidad que los procesos ya mencionados. Asimismo, estuvo constituida por ferrita Widmanstätten con una morfología más fina como se puede observar en la figura 4.d. que la ya expuesta, debido a que la técnica FCAW se realizó con una entrada de corriente similar al proceso GMAW, ver Tabla 2, pero a diferencia de éste, su deposición fue mayor, produciendo un cordón de soldadura más ancho, lo que originó una velocidad de enfriamiento menor en comparación con los otros procesos, dando lugar a un mayor crecimiento de ferrita columnar y una microestructura más fina.

3.1.2. Zona de fusión

Se formó de la misma manera por las fases anteriormente mencionadas, ver Figura 4.g. y bajo el mismo comportamiento. Aumento del tamaño de grano en el límite entre la FZ y la HAZ y disminución del tamaño de grano a medida que se aleja de la FZ, teniendo como longitud afectada máxima 2005 μm (2.005 mm) y longitud afectada mínima de 1341 μm (1.341 mm). El proceso FCAW fue la técnica con mayor tamaño de grano en la ZAT, esto ya se ha mencionado debido a una menor velocidad en la expulsión del calor.

3.1.3. Metal base

Corresponde al evidenciado en el espécimen control y en el BM de los demás procesos evaluados, como se puede observar en la Figura 4.j.

3.2. Ensayo de microdureza

Los resultados del ensayo de dureza se muestran en la Figura 5. Las uniones realizadas mediante los procesos SMAW y GMAW presentaron un mayor valor de dureza en la HAZ que el proceso FCAW, lo que puede asociarse al mayor tamaño de grano producido en esta zona por este proceso como se muestra en la Figura 4.g. siendo ligeramente inferior al de la probeta control. En cuanto a la FZ, esta presentó una gran variabilidad entre los tres procesos, siendo la técnica FCAW la que produjo un mayor valor de dureza en la FZ y la mayor diferencia de dureza entre la probeta control como se muestra en la Figura 5. esto debido a la microestructura obtenida, ya que, como se evidencia en la Figura 4.d. La FZ producida por el proceso FCAW generó una mayor cantidad de ferrita Widmanstätten y al mismo tiempo un menor tamaño en las agujas que la constituyen, lo que permite soportar el aumento significativo de la dureza.

Por otro lado, el MB de los tres procesos de soldadura aumentó ligeramente su dureza respecto a la probeta control, especialmente en las técnicas SMAW y FCAW, mientras que GMAW mantuvo una dureza en la BM similar a la probeta control. Esta variación en la dureza puede corresponder a las tensiones residuales producidas tras la aplicación de cada proceso de soldadura, ya que no se realizó poscalentamiento, debido a que no se suele realizar industrialmente.

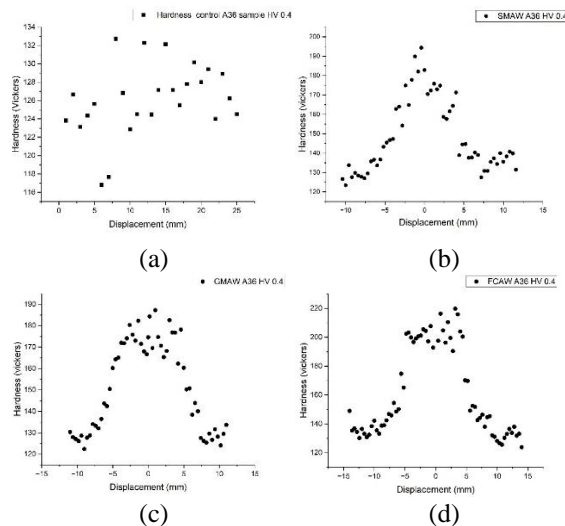


Figura 5. Perfiles de microdureza Vickers en procesos de soldadura SMAW(b), GMAW (c), FCAW (d) y en material base (a).

3.3. Ensayo de tracción

La figura 6 presenta el resultado de los ensayos de tracción para los procesos de soldadura evaluados, mostrando coherencia con los resultados del análisis microestructural, donde puede verse una superioridad del proceso FCAW en las formaciones alineadas de la ferrita Widmanstätten [16]. Esto representa un valor del esfuerzo ultimo de tracción mas elevado.

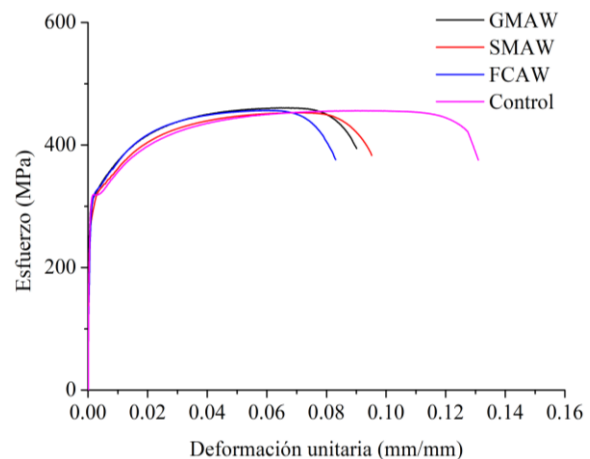


Figura 6. Curva de esfuerzo vs deformación en procesos de soldadura SMAW, GMAW y FCAW

Los valores de módulo de elasticidad, límite elástico y tenacidad son presentados en la tabla 4. Las variaciones presentadas son atribuibles al proceso experimental.

Tabla 4. Valores extraídos del ensayo de tracción para procesos de soldadura SMAW, GMAW, FCAW

Proceso	E [GPa]	Sy [MPa]	Sut [MPa]	Tenacidad [MJ/m3]
Control	199.2±7	315.4±23	456.14 ±18	53.42±2
SMAW	201.3±4	314.3±12	452.78±10	40.01±2
GMAW	198.5±10	308.8±17	460.87±6	38.66±3
FCAW	203.3±3	318.4±13	466.39 ±10	35.15±1

Las probetas presentaron zona de fractura en la zona blanda del material, si puede denominarse así a la zona que no corresponde al área donde el material de aporte es depositado, zona de fusión o FZ, ni a la zona de la transformación metalúrgica obtenida por la temperatura durante el proceso de soldado, zona afectada por el calor o HAZ, y finalmente si parece localizarse en la zona adyacente a la HAZ y el metal base, guardando coherencia en ser la zona de reblandecimiento por temperatura [17]. La figura 7 presenta un grupo de probetas falladas para uno de los procesos evaluados.



Figura 7. Conjunto de probetas soldadas con proceso FCAW y falladas bajo ensayo de tracción.

3.4. Ensayo de fatiga

Los resultados para los ensayos de fatiga fueron graficados bajo el esquema de la recta de Wöhler. Se realizó manejo de los datos obtenidos a través de la norma ASTM E739-23, para cada conjunto de cinco probetas por valor de esfuerzo y calculando un punto de la gráfica. Posteriormente, se trazó la recta de regresión lineal y se obtuvieron los valores de la forma canónica lineal del tipo $Y=m(X)+b$. Aun cuando Y está representado por el valor del logaritmo en base diez de los ciclos resistivos de la pieza, y siendo esta la variable dependiente y la variable X corresponde al valor del

esfuerzo que es un valor independiente aun cuando es la variable controlada que se programa en el ensayo, su resultado no depende del comportamiento del material durante la prueba, debido a que fue determinado previamente.

La figura 8 exhibe las rectas S-N bajo el modelo lineal de Wöhler para los procesos de soldadura evaluados durante este trabajo.

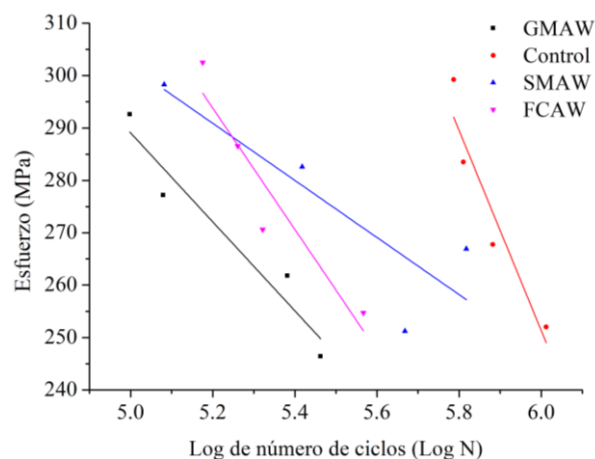


Figura 8. Comportamiento S-N para probetas soldadas con procesos de soldadura SMAW, GMAW, FCAW y material base

En el caso de la fatiga la presencia de falla se presentó en la zona de fusión de todos los materiales, siendo claramente consecuente con la posesión del material de más alta dureza, por cuanto la fatiga siendo un fenómeno de plasticidad localizada puede presentarse en la zona de material que menos resistencia tenga a este tipo de fenómeno. La figura 9 presenta un grupo de probetas falladas del proceso de fatiga y que permite observar la posición de la fractura bajo este tipo de carga. Algo relevante es que como es común en la fatiga, los escenarios de estricción no se hacen presentes.



Figura 9. Conjunto de probetas soldadas con proceso GMAW y falladas bajo ensayo de fatiga.

Del resultado de la figura 8 puede mencionarse como observación la condición del material soldado con SMAW. Este material presenta una pendiente de recta mucho más atenuada frente a los valores de los otros dos procesos, lo cual permite enunciar que su comportamiento es mucho más durable o resistivo a esfuerzos de fatiga que los otros procesos.

Un acercamiento a este comportamiento puede hacerse rápidamente a través de las variables obtenidas de la regresión lineal del comportamiento de cada material bajo el modelo de Wöhler. Estos indicadores de m y b corresponden en revisiones de autores [18] con estudios de fatiga a los coeficientes de endurecimiento por deformación dinámica. Estos valores pueden verse en la tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes de endurecimiento por deformación dinámica en procesos de soldadura SMAW, GMAW, FCAW

Proceso	m	b
SMAW	-0.11	1116.80
GMAW	-0.14	1452.32
FCAW	-0.17	2229.77

De los valores de la tabla 5 puede inferirse que siendo una pendiente negativa la mostrada en cada proceso evaluado y presente en la figura 8. La pendiente de mayor valor representará una menor durabilidad en número de ciclos para el material soldado sometido a fatiga. Lo que indica que el proceso de mejor comportamiento es el SMAW, respecto de los dos procesos adicionales.

3.5. Conclusiones

El análisis realizado sobre el material ASTM A36 sometido a tres procesos de soldadura, y evaluado su comportamiento bajo cargas monotónicas y dinámicas permite establecer que cada proceso de soldadura tiene un efecto diverso, esto se refleja en las diferencias de las microestructuras encontradas en la revisión microestructural a partir de las formaciones que tienen variedad de tamaños de grano y de área de diferencia.

El comportamiento monotónico arroja que el proceso FCAW aplicado sobre el material posee un mejor desempeño frente a los otros materiales y no presenta una diferencia significativa sobre el material base.

La afectación de cargas dinámicas sobre los materiales soldados es suficiente para considerar elementos como los tratamientos térmicos en búsqueda de reducir su nivel de pérdida de resistencia.

El proceso SMAW exhibió una durabilidad en ciclos superior a las de los otros procesos de soldadura, pero

siendo aun bastante afectado respecto al desempeño del material base, el cual no recibió procesos de soldadura.

4. Referencias

- [1] E. Esquicha-Larico and J. Esquicha-Tejada, "Implicancias En La Soldabilidad De Aceros A36 Y A615 Mediante Proceso SMAW," in *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development" "Leveraging emerging technologies to construct the future,"* 2021, vol. 2021-July, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.417.
- [2] L. Montoya and K. Osorio, "Estudio de la soldabilidad de uniones de acero estructural ASTM A-36 con acero inoxidable SAE-AISI 304, para la empresa Ingeniar Inoxidables de Pereira," Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.
- [3] J. A. Corrales Rhénals and J. E. Chica De Aguas, "Efecto de los procesos de soldadura al arco en las propiedades mecánicas y microestructura en aceros de alta resistencia y baja aleación," Universidad de Córdoba, 2020.
- [4] C. A. Valencia Rodríguez, "Efecto del Amperaje en la Microestructura de la Zona Afectada por el Calor de las Uniones Soldadas con el Proceso GMAW en Espesores de 1/4 in 3/8 in Y 1/2 in de Acero A-36.," Universidad Francisco José de Caldas, 2016.
- [5] B. DeOilers, N. Lupian, and R. Rumph, "Welding Procedure Qualification of A36 Steel Plates Using the GTAW and GMAW Processes.," 2016, [Online]. Available: <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1160&context=matesp>.
- [6] B. K. Khamari, P. Kumar Sahu, and B. B. Biswal, "Microstructure Analysis of Arc Welded Mild Steel Plates," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 377, no. 1, p. 012049, Jun. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/377/1/012049.
- [7] A. I. S. and E. E., "Effect of Arc Welding Current on the Mechanical Properties of A36 Carbon Steel Weld Joints," *Int. J. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 9, pp. 32–40, Sep. 2015, doi: 10.14445/23488360/IJME-V2I9P113.
- [8] Akhyar *et al.*, "Evaluation of Welding Distortion and Hardness in the A36 Steel Plate Joints Using Different Cooling Media," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1405, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031405.
- [9] AWS, "AWS D1.1 Structural Welding Code - Steel." 2000.
- [10] AWS, "AWS B1.11 Guide for the visual

- examination of welds.” 2015.
- [11] ASTM, “ASTM E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.” 2021, doi: 10.1520/E0384-17.
 - [12] ASTM, “ASTM E3 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.” 2017.
 - [13] ASTM, “ASTM E407-07 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.” 2016.
 - [14] ASM International, *ASM Handbook: Metallography and Microstructures*, 9th ed. ASM International, 2004.
 - [15] ASM International, *ASM Handbook: Welding, Brazing, and Soldering*, 6th ed. ASM International, 1993.
 - [16] M. R. Maraki, M. Mahmoodi, H. Tagimalek, M. R. Maraki, and M. Khodaei, “Evaluation of GMAW Welded Joints in A36 Low-Alloy Marine Steel Sheets: Tensile Test, Hardness, and Fatigue Properties,” 2022. Accessed: Nov. 08, 2023. [Online]. Available: <http://jmatpro.iaun.iau.ir>.
 - [17] I. M. W. Ekaputra, S. Mungkasi, G. Dwi Haryadi, R. Tungga Dewa, and S. J. Kim, “The influence of welding speed conditions of GMAW on mechanical properties of 316L austenitic stainless steel,” in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 159, doi: 10.1051/mateconf/201815902009.
 - [18] M. Klesnil and P. Lukás, “Fatigue of Metallic Materials,” *Int. J. Mater. Res.*, vol. 84, no. 4, pp. 291–291, Apr. 1993, doi: 10.1515/IJMR-1993-840416/HTML.