

EFFECTO DE LOS FLUX ACTIVOS EN SOLDADURAS GMAW SOBRE LA
MICROESTRUCTURA Y MICRODUREZA DE LA ZONA FUNDIDA DE UN
ACERO AISI/SAE 1020

ANDRÉS AUGUSTO ANGARITA PALLARES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2019

EFFECTO DE LOS FLUX ACTIVOS EN SOLDADURAS GMAW SOBRE LA
MICROESTRUCTURA Y MICRODUREZA DE LA ZONA FUNDIDA DE UN
ACERO AISI/SAE 1020

ANDRÉS AUGUSTO ANGARITA PALLARES

TRABAJO DE GRADO (MODALIDAD, PROYECTO DE INVESTIGACIÓN) PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

DIRECTOR

MAURICIO RINCÓN ORTÍZ
PhD. Ingeniería de Corrosión.

CODIRECTOR

ANA EMILSE COY ECHEVERRÍA
PhD. Corrosión y protección de aleaciones ligeras.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

Al todopoderoso por la salud, la protección ante cualquier adversidad y las bendiciones diarias para realizar cada uno de mis proyectos de vida.

A mis padres Ariel Augusto Angarita Pallares y Ana de Jesús Pallares, de igual manera mi hermana Ariana Angélica Angarita Pallares, quienes han sido mi inspiración, mi motivo para seguir adelante y han permitido que alcance cada uno de mis propósitos. Con ellos puedo encontrar amor, tranquilidad y apoyo, mil bendiciones.

A mi amigo, hermano y colega Cristhian Harley Madariaga Rosas, quien me brindó su confianza, su apoyo, su conocimiento y motivación cada vez que fue necesario.

A mi primo Luis Alfredo Palacios y toda su familia, ya que me han permitido ser un integrante más de su núcleo, por su apoyo, comprensión y colaboración en cada momento.

A mis amigos Edgar Iván Nieto Arango, Fabian Arturo Baene, Jose Albeiro Rueda y Hernán Dario Salamanca, en los cuales he encontrado una gran amistad y apoyo en mi vida universitaria.

A todas aquellas personas que me han brindado un espacio en sus vidas, que han contribuido en mi proceso de formación tanto personal como profesionalmente. Dándome su apoyo y enseñanzas con las cuales he podido sobrellevar cada dificultad de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente a Dios por ser mi motor y mi roca ante cualquier adversidad y situación de la vida, quien me ha dado la oportunidad de conocer grandes personas que han contribuido de cierta manera en la realización de este proyecto de vida. De igual forma a mis padres y hermana quienes son mi inspiración y apoyo en cada proceso que realizo.

Igualmente, a los profesores Mauricio Rincón Ortiz, Ana Emilse Coy Echeverría y Jaime Alberto González quienes me brindaron su confianza, tiempo y orientación para realizar un trabajo de calidad y obtener buenos resultados.

Al laboratorio de microscopía de la Universidad Industrial de Santander (UIS) sede Guatiguará por la prestación de sus servicios y al Ingeniero Carlos Alberto Chacón por su ayuda.

Agradezco al Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS, a los técnicos Sergio y Domingo por su apoyo y orientación en la preparación metalográfica de las muestras y posterior microscopia.

Al laboratorio de Ciencia de Materiales Biológicos y Semiconductores (CIMBIOS) de la UIS sede Guatiguará y al Ingeniero Rogelio Ospina Ospina por su apoyo.

De igual forma agradezco a mis colegas, Cristhian Harley Madariaga Rosas y Edgardo Mario Saavedra por su ayuda, entrega y conocimiento compartido en la realización de este proyecto.

Finalmente doy gracias a mis amigos y personas cercanas que han compartido conmigo durante estos años de formación personal y profesional, y con los que he vivido momentos gratos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. ANTECEDENTES	14
2. OBJETIVOS	18
2.1. OBJETIVO GENERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN	19
3.1. VARIABLES A ESTUDIAR Y MATERIAL DE ESTUDIO	19
3.2. CARACTERIZACIÓN MACROESTRUCTURAL	19
3.3. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	20
3.4. MICRODUREZA	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1. CARACTERIZACIÓN MACROESTRUCTURAL	21
4.2. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	22
4.2.1. Influencia del tipo de flux activo; CaCO ₃ , SiO ₂	23
4.2.2. Influencia del modo de transferencia; globular, globular próximo a la región de transición, spray	28
4.2.3. Análisis microestructural mediante SEM y EDS	34
4.3. EFECTO EN LA MICRODUREZA DE LA ZONA FUNDIDA	35
5. CONCLUSIONES	38
6. RECOMENDACIONES	39
BIBLIOGRAFÍA	40
ANEXOS	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Número de probetas a utilizar con respecto a las variables y compuestos utilizados.....	19
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Macrografía de los perfiles de los cordones de soldadura.	22
Figura 2. Micrografía óptica a 500X, del baño fundido de la soldadura sin flux y con transferencia globular.	22
Figura 3. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 soldado con transferencia globular. Aumento: 200X. a) Sin flux b) CaCO_3 c) SiO_2 . Aumento: 500X. d) Sin flux e) CaCO_3 f) SiO_2	24
Figura 4. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 soldado con transferencia globular próxima a la región de transición. Aumento: 200X. a) Sin flux b) CaCO_3 c) SiO_2 . Aumento: 500X. d) Sin flux e) CaCO_3 f) SiO_2	26
Figura 5. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 soldado con transferencia spray. Aumento: 200X. a) Sin flux b) CaCO_3 c) SiO_2 . Aumento: 500X. d) Sin flux e) CaCO_3 f) SiO_2	27
Figura 6. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 sin aplicación de flux. Aumento: 200X. a) Transferencia globular b) globular próxima a la región de transición c) Transferencia spray. Aumento: 500X. d) Transferencia globular e) globular próxima a la región de transición f) Transferencia spray.	29
Figura 7. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 con aplicación de CaCO_3 . Aumento: 200X. a) Transferencia globular b) globular próxima a la región de transición c) Transferencia spray. Aumento: 500X. d) Transferencia globular e) globular próxima a la región de transición f) Transferencia spray.	31
Figura 8. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 con aplicación de SiO_2 . Aumento: 200X. a) Transferencia globular b) globular próxima a la región de transición c) Transferencia spray. Aumento: 500X. d) Transferencia globular e) globular próxima a la región de transición f) Transferencia spray.	33
Figura 9. Micrografías electrónicas del acero AISI/SAE 1020 soldado obtenidas por medio de SEM a 2000x a) sin flux con transferencia spray, b) CaCO_3 con transferencia spray y c) SiO_2 con transferencia spray.	35
Figura 10. Gráfico resumen de los datos obtenidos mediante prueba de microdureza para las soldaduras estudiadas.	36

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Micrografía obtenida por SEM y Espectro EDS de la muestra CaCO_3 , a) Micrografía SEM de la muestra con CaCO_3 a 2000X, b) Espectro EDS en el punto rojo, c) Espectro EDS el punto verde y d) Espectro EDS el punto amarillo.	41
Anexo B. Tablas de composición química de los espectros EDS de la muestra CaCO_3 (Anexo A), a) para el punto rojo, b) para el punto verde y c) para el punto amarillo.	41
Anexo C. Micrografía obtenida por SEM y Espectro EDS de la muestra SiO_2 , a) Micrografía SEM de la muestra con SiO_2 a 2000X, b) Espectro EDS en el punto rojo, c) Espectro EDS el punto verde y d) Espectro EDS el punto amarillo.	42
Anexo D. Tablas de composición química de los espectros EDS de la muestra SiO_2 (Anexo C), a) para el punto rojo, b) para el punto verde y c) para el punto amarillo.	42
Anexo E. Resultados obtenidos prueba microdureza para las muestras sin flux (Tabla a), con aplicación de flux CaCO_3 (Tabla b) y SiO_2 (Tabla c), en los modos de transferencia globular, globular próxima a la región de transición y spray.....	43
Anexo F. Valores de las diagonales de las huellas de microdureza para las muestras con modo de transferencia spray con aplicación de CaCO_3 (Tabla a) y SiO_2 (Tabla b).	44

RESUMEN

TITULO: EFECTO DE LOS FLUX ACTIVOS EN SOLDADURAS GMAW SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y MICRODUREZA DE LA ZONA FUNDIDA DE UN ACERO AISI/SAE 1020*

AUTOR: Angarita Pallares, Andrés Augusto**

PALABRAS CLAVE: A-GMAW, microdureza, microestructura, transferencia.

El proceso de soldadura GMAW es un proceso de arco eléctrico que produce la fusión localizada de metales entre un electrodo consumible (alambre) y la pieza de trabajo, con una protección gaseosa que tiene como función evitar la contaminación del charco de fusión. A pesar de las ventajas que tiene el proceso convencional puede presentar ciertas dificultades con respecto al control de las variables, razón por la cual se ha dado paso a una posible alternativa, la soldadura A-GMAW. En ésta se aplica una fina capa de flux sobre la superficie del metal base teniendo como finalidad un mejor control de las variables del proceso, la incidencia en las propiedades mecánicas, cambios en geometría y apariencia del cordón, entre otros. El presente trabajo se basa en la evaluación del efecto generado por la aplicación de dos tipos de flux SiO_2 y CaCO_3 con modos de transferencia spray y globular sobre la microestructura y microdureza de la zona fundida de un acero AISI/SAE 1020 en soldadura GMAW. Se realizó la caracterización microestructural y pruebas de microdureza en la zona fundida de las muestras con la aplicación de las variables mencionadas. De acuerdo a los resultados, los microconstituyentes del proceso A-GMAW son los mismos del proceso convencional, sin embargo, cambia su forma, tamaño y distribución, lo que influye en las propiedades mecánicas del material como microdureza. También se observó que el modo de transferencia afecta las características microestructurales. De esta forma, se concluyó que la aplicación de los compuestos evaluados influye en la microestructura y microdureza de las soldaduras.

*Trabajo de grado (modalidad, proyecto de investigación)

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Ph.D. Mauricio Rincón Ortíz, Ingeniero Metalúrgico.

Co-director: Ph.D. Ana Emilse Coy Echeverría, Ingeniera Metalúrgica.

ABSTRACT

TITLE: EFFECT OF ACTIVE FLUX ON GMAW WELDING ON THE MICROSTRUCTURE AND THE MICROHARDNESS OF THE WELD ZONE OF AISI SAE 1020 STEEL WELDS*

AUTHOR: Angarita Pallares, Andres Augusto**

KEYWORDS: A-GMAW, microhardness, microstructure, transfer.

The GMAW welding process is an electric arc process that produces the localized fusion of metals between a consumable electrode and the work piece, with a gaseous protection whose function is to avoid contamination of the melting pool. Despite the advantages of the conventional process may present certain difficulties with respect to the control of the variables, for which a possible alternative has been chosen, A-GMAW welding, In this welding a thin layer of flux is applied on the surface of the base metal with the purpose of controlling the process variables, influence the mechanical properties, changes in the geometry and appearance of the cord and others. This study is an assessment of the effects caused by the application of two types of flux SiO_2 y CaCO_3 with spray and globular transfer modes on the microstructure and the microhardness of the weld zone of AISI SAE 1020 steel welds with the GMAW process. Microstructural characterization and microhardness were performed on the melt zone of the samples with the application of the mentioned variables. According to the results, the microconstituents of the A-GMAW process are the same as the conventional process; however, it changes its shape, size and distribution, which influences the mechanical properties of the material such as microhardness. It was observed that the transfer mode affects the microstructural characteristics. Thus, it was concluded that the application of the compounds evaluated influences the microstructure and microhardness of the welds.

* Degree work (modality, research Project)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Adviser: PhD. Mauricio Rincón Ortíz, Metallurgical engineer.

Adviser: PhD. Ana Emilse Coy Echeverría, Metallurgical Engineer.

INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding), también llamado MIG/MAG, es un proceso de soldadura de arco eléctrico que produce la fusión localizada de metales entre la pieza a soldar y un electrodo consumible (alambre) alimentado constantemente, con una protección gaseosa que tiene como función evitar la contaminación del charco de fusión ¹. Cabe mencionar que la soldadura GMAW se caracteriza por su alta productividad, alta tasa de deposición, producción de cordones con buena penetración, facilidad para soldar un amplio rango de espesores y versatilidad para realizarse en materiales ferrosos y no ferrosos ².

A pesar de las ventajas que tiene el proceso convencional puede presentar ciertas dificultades con respecto al control de las variables, razón por la cual se ha dado paso a una posible alternativa, la soldadura A-GMAW. En ésta se aplica una fina capa de compuestos denominados flux sobre la superficie del metal base, que permite darle un mejor control a la forma en que se deposita el metal líquido y por ende influir en la geometría y apariencia del cordón ³. Cabe mencionar que en este tipo de soldadura se pueden evidenciar diferentes modos de transferencia metálica según los valores de corriente aplicados, y que esta variable influye en la estabilidad operacional del arco y a su vez en las propiedades y características del cordón de soldadura.

En una investigación previa en la que utilizaron como flux activos SiO_2 y CaCO_3 y modo de transferencia spray y globular ⁴, se evidenció que estas variables influyen en la características macroestructurales, para este caso el cordón se hizo más estrecho y profundo que el proceso convencional; sin embargo, no se logró determinar su influencia en las características microestructurales de la soldadura, característica importante, dado que está estrechamente relacionada con las propiedades mecánicas de la soldadura. Por esta razón, en la presente investigación se estudia el efecto conjunto que tiene la adición de flux activos y el modo de transferencia en la soldadura GMAW de un acero AISI/SAE 1020, en el tipo, forma, tamaño y distribución de las fases presentes en la zona fundida, así el grado de variación de las propiedades mecánicas a través de los valores de microdureza.

1. Welding Technology, de Welding Robots Technology System Issues and Applications, Springer Science & Business Media, pp. 27 – 71, 2006.
2. ED. J. NADZAM, OH. CLEVELAND: Lincoln Global Inc. The Lincoln Electric Company, Gas Metal Arc Welding (Product and Procedure Selection), pp. 96, 2014.
3. Huang, H, Y. Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments. Materials and Design, pp. 2404 – 2409, 2009.
4. Madariaga, C., Efecto de los flux activos sobre soldaduras GMAW aplicadas a um acero AISI/SAE 102. Universidad Industrial de Santander, 2018.

1. ANTECEDENTES

GMAW es un proceso de soldadura en el cual el metal de aporte es transferido al metal base en forma de gotas; a su vez se caracteriza por una alta deposición, productividad, posibilidad de ser operado de forma semiautomática, automática o mecanizada y por su versatilidad para soldar materiales ferrosos (aceros al carbono, aceros aleados) o no ferrosos (cobre, estaño, zinc, plomo) ^{5, 6}.

Existe un gran número de variables que hacen del proceso GMAW uno de los más complejos, entre estas la intensidad de corriente, el voltaje, la velocidad de alimentación, velocidad de avance, la distancia del tubo de contacto, el gas protector ^{6, 7}. Es un proceso en el que según su ajuste pueden estar presentes diferentes tipos de transferencia metálica, teniendo en cuenta el rendimiento con el que se deposita la gota en el charco de fusión, por esta razón cada tipo de transferencia afecta la estabilidad operacional del arco y a su vez en las propiedades y características del cordón de soldadura ⁸.

El Instituto Internacional de Soldadura (IWW por sus siglas en inglés) clasifica en dos grupos los diferentes modos de transferencia, del cual resulta la transferencia metálica natural y la transferencia metálica controlada ^{9, 10, 11, 12}. La transferencia metálica natural se da de forma espontánea sin necesidad de control de parámetros adaptivos. En este grupo se establece una subdivisión, la primera hace referencia a los modos que presiden su transferencia de gota por contacto, cuando existe un choque del electrodo con la gota aún en crecimiento y el metal base; en la segunda, se da una deposición de gotas en vuelo libre hacia el charco de fusión ¹². En el modo de transferencia por vuelo libre se da el desprendimiento de las gotas del electrodo cuando las fuerzas gravitatorias y de origen magnético superan la fuerza asociada a la tensión superficial, es decir se alcanza un diámetro de gota crítico.

5. LINCOLN ELECTRIC. Soldadura Semiautomática con Gas de Protección (MIG - MAG). Departamento de Formación Lincoln-KD, S.A, 2005.
6. OLIVA M, Carlos. Capítulo 5: Procesos de Soldadura. Inspector de Soldadura AWS QC1:2007. Instituto Chileno de Soldadura, pp. 125 – 136, 2007.
7. COMITE ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, Welding, Brazing, and Soldering. ASM INTERNATIONAL, 1993.
8. ESAB, Apostila de Soldagem MIG/MAG. ESAB BRASIL, 2005.
9. Scotti, A. Ponomarev, V. and Lucas, W. "Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification," J. Mater. Process. Technol., Vol. 214, No. 11, pp. 2488–2496, 2014.
10. Modenesi, P, J. Física do Arco Elétrico Soldagem I. Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
11. Modenesi P. J. and Queiroz Bracarense A., Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
12. Scotti, A. Ponomarev, V. and Lucas, W. "A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA," J. Mater. Process. Technol. 212, pp. 1406– 1413, 2012.

En este subgrupo se pueden dar dos modos de transferencia, uno de ellos es el globular, en donde las fuerzas gravitacionales son quienes dominan el proceso; a su vez el diámetro de la gota resulta siendo mayor que el del electrodo lo que conlleva a un mayor peso y desprendimiento de ésta debido a la fuerza por la que está dominada. El otro mecanismo de transferencia se denomina spray o por rocío, en éste se tiene una mejor estabilidad de arco con respecto al globular, de igual forma es un proceso de alta energía ya que hay una alta transmisión de calor por medio de las gotas lo que se traduce en mayor penetración.

Es preciso mencionar que los resultados obtenidos en los procesos de soldadura están estrechamente relacionados con el control y manejo de los parámetros y variables existentes, lo cual no es una tarea sencilla ¹¹. Sin embargo, gracias a estudios y ensayos previos se ha recurrido hoy en día a modificar o incluir elementos en los procesos de soldadura como es el caso del proceso A-GMAW, éste a diferencia del proceso convencional se utilizan flux activos.

El proceso A-GMAW está dado básicamente por la aplicación de una fina capa de compuestos sobre la superficie limpia del metal base. Este agregado se realiza diluyendo el compuesto en una sustancia volátil, normalmente acetona y luego depositarla de manera homogénea sobre el metal base ¹³. Esta técnica es nueva con respecto a la soldadura GMAW ya que la mayoría de los estudios realizados se han hecho en soldadura láser ¹⁴, por arco de plasma ¹⁵ y TIG convirtiéndose en A-TIG. En esta última las investigaciones han sido numerosas y se han evidenciado efectos en la morfología del cordón tanto en apariencia, profundidad y ancho ^{16, 17, 18}. No obstante, algunos estudios también se han orientado al análisis microestructural y las propiedades mecánicas resultantes. En estos se ha visto cómo los microconstituyentes presentes en la zona fundida son similares a los de un proceso convencional de soldadura TIG, de igual forma se ha evidenciado que

13. Huang, H. Y. Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding. *Materials and Design*, pp. 2488-2495, 2010.
14. Kuo, M., Sun, Z. & Pan, D. Laser welding with activating flux. *Science and Technology of Welding and Joining*, pp. 17-22, 2001.
15. Huang, H. Y. Research on the activating flux gas tungsten arc welding and plasma arc welding for stainless steel. *Metals and Materials International*, pp. 819-825, 2010.
16. Snow, H. M. Investigation on the effect of a Surface-Active Flux on the Microstructure and Properties of Gas Tungsten Arc Welds made on a Superaustenitic Stainless Steel. Tesis de Maestría. Lehigh University, Materials Science and Engineering, 2002.
17. Nayee, S. G. and Badheka, V. J. Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of Dissimilar Activating Flux Assisted-Tungsten Inert Gas Welds. *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 137-143, 2014.
18. Modenesi, P. J. Apolinário, E. R. and Pereira, I. M. TIG welding with single-component fluxes. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, No. 1-3, pp. 260-265, 2000.

los valores de microdureza son muy cercanos con ambas técnicas, lo que indicaría que la presencia de estos compuestos no influye en la formación de nuevas fases o compuestos en la zona fundida del metal ¹⁹.

Sin embargo, otras investigaciones ^{3, 20} realizadas con la técnica A-TIG muestran incrementos considerables en la microdureza del metal de soldadura con respecto al proceso convencional, lo cual demuestra que no existe claridad en cuanto a la influencia de los compuestos en la microestructura y por ende en las propiedades mecánicas del material.

En los pocos estudios realizados con respecto a la aplicación de compuestos o flux activos en soldadura GMAW (A-GMAW), se ha visto como éstos influyen tanto en la geometría del cordón como en las propiedades mecánicas tales como microdureza. Particularmente Huang ¹³ evaluó el efecto de tres tipos de compuestos Fe_2O_3 , SiO_2 y MgCO_3 en un acero AISI SAE 1020, registrando un aumento en la penetración del cordón, disminución de la distorsión angular de los granos e incremento en la resistencia a la tracción y microdureza de la soldadura. Por otro lado, diferentes investigaciones llegaron a la conclusión que la presencia de estos compuestos no representa una variación microestructural significativa, ni tampoco incide en las propiedades mecánicas como microdureza con relación al proceso convencional GMAW ^{21, 22}.

Mediante un estudio realizado por Madariaga en el que evaluó el efecto de los flux activos (SiO_2 y CaCO_3) en un acero al carbono AISI/SAE 1020 con el modo de transferencia globular y spray, se pudo evidenciar diferencias significativas en las características geométricas del cordón, por un lado, el SiO_2 permitió tener una mayor penetración con respecto al proceso convencional y por otro el CaCO_3 arrojó resultados totalmente contrarios, mostrando menor penetración ⁴. Por otra parte, Mayorga realizó un análisis de las propiedades microestructurales y microdureza de la zona fundida de un acero AISI/SAE 1020 con aplicación de CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3

19. Ramkumara K, D., Chandrasekhar, A., Singh, A, K., Ahuja, S, Agarwal, A., Arivazhagan, N. and RABEL, A, M., Comparative studies on the weldability, microstructure and tensile properties of autogeneous TIG welded AISI 430 ferritic stainless steel with and without flux. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, pp. 54-59, 2015.
20. Ahmadi, E., and Ebrahimi, A., The effect of activating fluxes on 316L stainless steel weld joint characteristic in TIG welding using the Taguchi method. *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 1, No. 1, pp. 55-62, 2012.
21. Varbai, B., Komos, R. and Májlinger, K. Effects of Active Fluxes in Gas Metal Arc Welding. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 61, No. 1, pp. 68-73, 2016.
22. Ruan, Y., Qui, X.M, Gong, W.B., Sun, D.Q. and Li, Y.P. Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO_2 flux. *Materials and Design*, Vol. 35, pp. 20-24, 2012.

y KClO_4 y modo de transferencia corto circuito, y determinó que tanto la microestructura como la microdureza no representan variaciones significativas en comparación al proceso sin aplicación de compuestos ²³.

Con base en lo mencionado anteriormente se puede decir que no existe claridad en cuanto al efecto en las propiedades mecánicas y microestructura que tiene la aplicación de flux activos o compuestos en la soldadura GMAW, al igual que con el proceso TIG. Esto se debe a que los parámetros y variables utilizadas son diferentes e influyen en la longitud del arco eléctrico generado, el tamaño, forma y distribución de los microconstituyentes y por ende en las características mecánicas del material debido a las velocidades de enfriamiento.

23. Mayorga, M., Evaluación de la microdureza y la microestructura de la zona fundida de soldaduras fabricadas mediante el proceso A-GMAW en un acero AISI/SAE 1020. Universidad Industrial de Santander, 2017.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los efectos de los flux activos sobre las características microestructurales finales de la zona fundida producida mediante proceso de soldadura GMAW con transferencia spray y globular en un acero AISI/SAE 1020.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar los efectos de los flux sobre la microestructura final de la zona fundida producida mediante proceso de soldadura GMAW con transferencia spray y globular.
2. Determinar la influencia de los flux SiO_2 y CaCO_3 , en la microdureza de la zona fundida, obtenidos por medio de soldadura GMAW con transferencia spray y globular.

3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN

3.1. VARIABLES A ESTUDIAR Y MATERIAL DE ESTUDIO.

Para la realización de este trabajo se utilizaron cordones de soldadura GMAW aplicada sobre un acero AISI/SAE 1020. Los parámetros que fueron constantes en la aplicación del proceso de soldadura para todas las muestras fueron los siguientes: Velocidad de soldadura= 40 [cm/min]; Electrodo (alambre)= ER70S6 – 1,2 [mm]; Gas de protección= Ar - 4%CO₂; Caudal de gas= 18 [L/min]; Orientación del electrodo= perpendicular al plano de la mesa; Distancia de la boquilla de contacto a la pieza= 25 [mm]. Las muestras usadas fueron de un trabajo de pregrado previo. En el estudio se consideraron dos variables: i) la aplicación de dos tipos de flux, SiO₂ y CaCO₃, y ii) el modo de transferencia; globular, globular próxima a la región de transición y spray, derivadas de los diferentes valores de corriente utilizados. En la tabla 1 se resume la combinación de las variables mencionadas y el total de probetas empleadas.

Tabla 1. Número de probetas a utilizar con respecto a las variables y compuestos utilizados.

FLUX	MODOS DE TRANSFERENCIA			Número de probetas
	Transferencia globular 190 [A]	Transferencia globular próxima a la región de transición 210 [A]	Transferencia spray 230 [A]	
Sin flux	1	1	1	3
SiO ₂	1	1	1	3
CaCO ₃	1	1	1	3
TOTAL				9

3.2. CARACTERIZACIÓN MACROESTRUCTURAL.

Se realizó una comparación visual de la forma y tamaño de los cordones de soldadura con el fin de evaluar tanto la penetración como la geometría del cordón con el efecto conjunto de aplicación de flux y variación en los modos de transferencia.

3.3. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.

Previo a la caracterización las soldaduras fueron preparadas metalográficamente siguiendo los parámetros establecidos en la norma ASTM E3-11 ²⁴. Para esto, una vez cortadas fueron encapsuladas en una resina acrílica en frío con objeto de facilitar su manipulación, posteriormente fueron desbastadas con papel abrasivo de SiC número 80, 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1200 y 1500. El pulido posterior se realizó utilizando paños y pasta de diamante como material abrasivo de granulometría 3 y 1 μm . Para finalizar la preparación metalográfica, las probetas se atacaron químicamente con Nital 2%; esto con el fin de revelar la microestructura en la zona fundida.

El análisis se llevó a cabo por medio del microscopio óptico OLYMPUS GX71. También se realizaron estudios de microscopia electrónica de barrido (SEM) usando el microscopio QUANTA FEG650 en alto vacío y voltaje de aceleración de 25 kV, equipado con detectores de electrones secundarios y retrodispersados para la adquisición de imagen y análisis de composición química mediante espectrometría de dispersión de rayos x (EDS).

3.4. MICRODUREZA.

Para el estudio de esta propiedad mecánica se realizaron medidas a cada una de las soldaduras sobre la zona fundida con el fin de comparar y evaluar la influencia de la aplicación de flux activos y los modos de transferencia.

Esta medición se llevó a cabo con un microdurómetro INNOVATEST de INNOVASTET Europe BV aplicando una carga de 500 gramos-fuerza durante un tiempo de 10 s en cada punto establecido. Para cada muestra se realizaron 5 indentaciones, los puntos de medición se ubicaron de forma aleatoria a lo largo de la zona fundida con el fin de tener un balance general de la microdureza en las soldaduras y realizar un análisis comparativo. Con los resultados obtenidos se determinó la microdureza promedio por ser una microestructura fina y su desviación estándar.

24. ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, 2017.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN MACROESTRUCTURAL.










En el proceso de soldadura la deposición del metal se da en una dirección de flujo de adentro hacia afuera, la cual produce que el cordón de soldadura sea ancho. Con la aplicación de flux a base de O como es el caso del SiO_2 y CaCO_3 se presenta el efecto Marangoni, en el cual se redirecciona el flujo del metal líquido, es decir, el flujo va de afuera hacia adentro lo que conlleva a que este no logre expandirse a lo largo de la superficie, sino que tiende a ser más estrecho y profundo ²⁵. De igual forma el gas de protección usado en el proceso de soldadura influye en la penetración del cordón, por esta razón se utilizan mezclas binarias que contienen argón +1-5% de O, lo cual crea un perfil de penetración profundo conocido como perfil en dedo (finger shape), o también argón + CO_2 donde los niveles de CO_2 son 18% o menos, que proporcionan un tipo más redondeado de penetración ^{11, 12, 26}.

Como se puede observar en la Fig. 1, las soldaduras sin aplicación de flux muestran un cordón ancho con baja penetración. Con la aplicación del flux de CaCO_3 se tiene un cordón más estrecho y un poco más profundo; para el caso de las muestras de SiO_2 se da una penetración circular más definida y profunda, con un cordón muy angosto. Por tal razón, el uso de flux reduce el ancho del cordón y aumenta su penetración. La variación en el modo de transferencia también se hace notable en la morfología del cordón, a medida que se aumentan los valores de corriente se mantiene el ancho del cordón, sin embargo, la penetración se reduce.

Comparando la penetración que se presenta en la Fig. 1 con el CaCO_3 y el SiO_2 es mayor la del SiO_2 , debido a que la interacción entre el flux y la atmósfera protectora disminuye en pequeña medida la fusión del electrodo, lo cual se refleja en una longitud de arco menor y evita el retraso en la caída de la gota, lo que conlleva a tener una buena penetración. Con la aplicación del CaCO_3 ocurre lo contrario ⁴.

25. Pesach, D., & Marmur, A. Marangoni effects in the spreading of liquid mixtures on a solid. *Langmuir*, pp. 519-524, 1987.
26. LINCOLN ELECTRIC, Gas Metal Arc Welding. Cleveland, OH, U.S.A: Lincoln Global Inc. 2014.

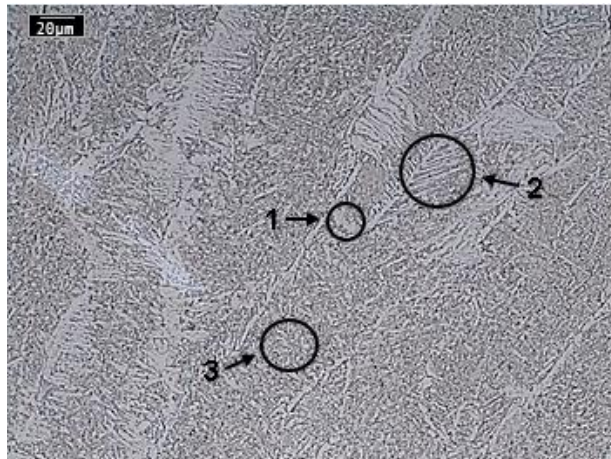
Figura 1. Macrografía de los perfiles de los cordones de soldadura.

	SIN FLUX	CaCO ₃	SiO ₂
TRANSFERENCIA GLOBULAR 190 [A]			
TRANSFERENCIA GLOBULAR PRÓXIMO A LA REGIÓN DE TRANSICIÓN 210 [A]			
TRANSFERENCIA SPRAY 230 [A]			

4.2. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.

Con objeto de conocer las diferentes fases que están presentes en este tipo de soldaduras, se analizó mediante microscopía óptica, a 500X, una muestra de referencia correspondiente al modo de transferencia globular, 190 [A], sin aplicación de flux como se muestra en la Fig. 2.

Figura 2. Micrografía óptica a 500X, del baño fundido de la soldadura sin flux y con transferencia globular.



Se puede observar que la microestructura de esta muestra está constituida por diferentes tipos de ferrita; i) la ferrita alotriomórfica, identificada con el número 1, es una fase que se forma con menores subenfriamientos es decir se da a altas temperaturas; ésta nuclea en el límite de grano austenítico y crece a lo largo del mismo a una velocidad superior a como lo hace en dirección normal al plano de frontera ²⁷. ii) La ferrita Widmanstatten, como lo indica el número 2, es un tipo de ferrita que nuclea en los límites de grano y luego crece dentro del grano. Se da en procesos en donde las temperaturas son muy altas, a su vez los enfriamientos rápidos lo que hace que los cristales de ferrita una vez hayan nucleado tiendan a crecer en forma de agujas o placas alineadas ²⁸. iii) Ferrita acicular como lo indica el número 3, se forma en el interior de los granos austeníticos originales mediante la nucleación directa de las inclusiones, lo que da como resultado agujas de ferrita cortas orientadas al azar con una apariencia de “tejido de cesta”. La formación de esta ocurre en un intervalo de temperatura de 500-560°C ²⁹.

4.2.1. Influencia del tipo de flux activo; CaCO₃, SiO₂.

Para todas las condiciones se observaron los tres tipos de ferrita: alotriomórfica, Widmanstatten y acicular. Sin embargo, estas varían en cuanto a cantidad.

En la Fig. 3 se presentan las micrografías ópticas a diferentes aumentos, 200X y 500X de las muestras soldadas sin y con los dos tipos de flux y transferencia globular. En la Fig. 3a y 3d la ferrita alotriomórfica es abundante ya que cuenta con sitios numerosos y bien distribuidos donde puede ocurrir su formación. Se observa la presencia de ferrita acicular en gran proporción, también es posible encontrar ferrita Widmanstatten. Para el caso de transferencia globular con aplicación de CaCO₃ (Fig. 3b y 3e) la ferrita alotriomórfica es menor en comparación a las micrografías sin aplicación de flux y con aplicación de SiO₂, se empieza a notar un incremento de ferrita Widmanstatten y la ferrita acicular disminuye. En la soldadura con aplicación de SiO₂ (Fig. 3c y 3f) se observa una estructura con gran cantidad de ferrita acicular, a su vez ferrita alotriomórfica algo masiva y gruesa. La ferrita Widmanstatten es menor con relación a la aplicación de CaCO₃.

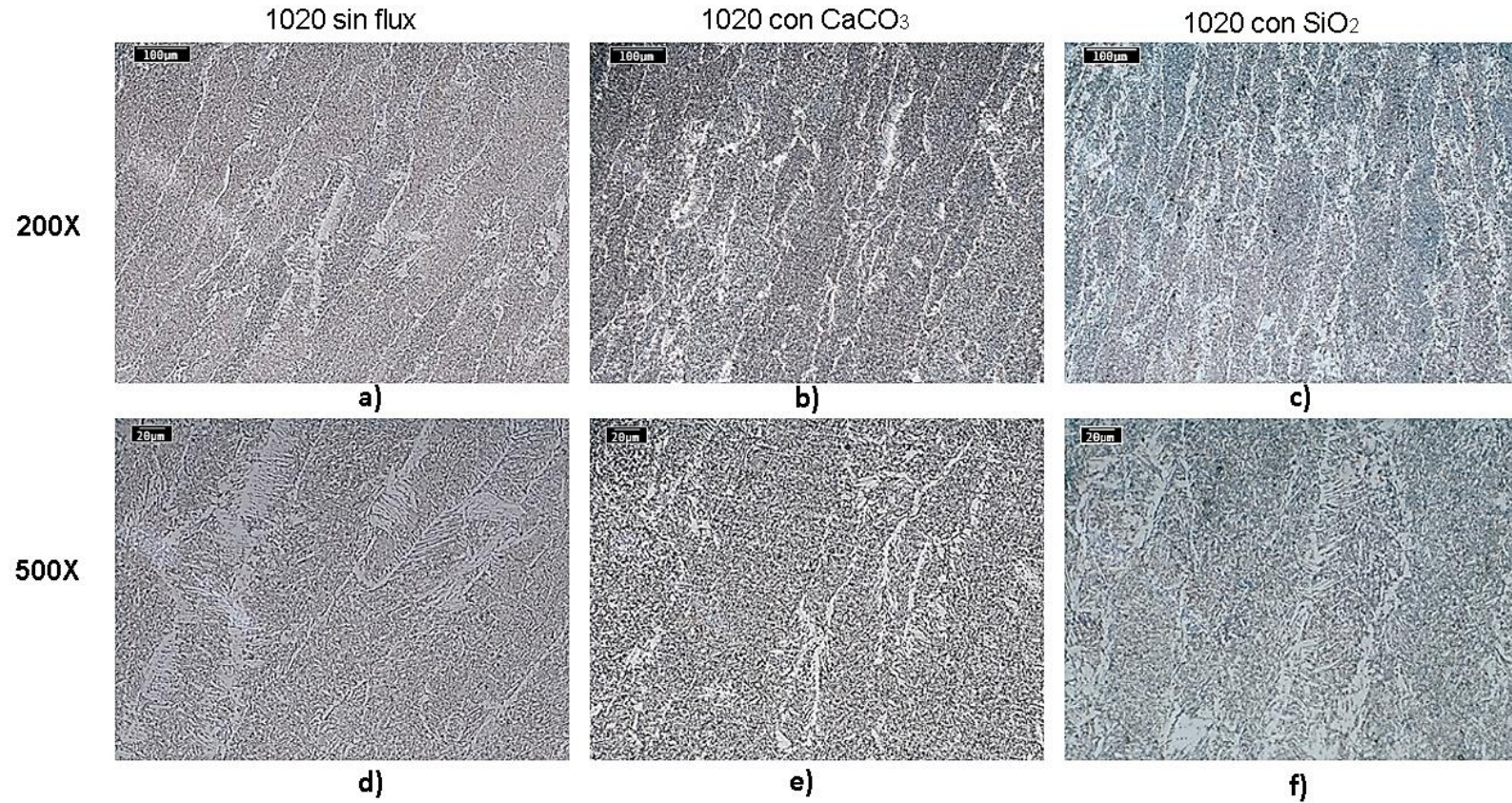
27. Capdevila, C; Garcia, F;Garcia, C. Modelling of isothermal formation of allotriomorphic ferrite transformation at temperatures below the eutectoid in a medium carbon microalloyed Steel, pp 509-518, 2001.

28. Ohmori, Y., Ohtsubo, H., Jung, Y. C., Okaguchi, S., & Ohtani, H. Morphology of bainite and widmanstätten ferrite. Metallurgical and Materials Transactions A, pp. 1981-1989, 1994.

29. Bhadeshia, Harshad Kumar Dharamshi Hansraj; Honeycombe, Robert William Kerr, Steels: microstructure and properties (3rd edición), Butterworth-Heinemann, pp. 155, 2006.

Figura 3. Micrográficas ópticas del acero AISI SAE 1020 soldado con transferencia globular. Aumento: 200X. a) Sin flux b) CaCO_3 c) SiO_2 . Aumento: 500X. d) Sin flux e) CaCO_3 f) SiO_2 .

TRANSFERENCIA GLOBULAR



En la Fig. 4 se presentan las micrografías ópticas a diferentes aumentos, 200X y 500X de las muestras soldadas sin y con los dos tipos de flux y transferencia globular próxima a la región de transición.

En la Fig. 4a y 4d se observa ferrita Widmanstätten abundante y ferrita acicular distribuida de manera uniforme, de igual forma la ferrita alotriomórfica presente es numerosa, por tal razón la estructura presenta un carácter masivo.

Para el caso de transferencia globular próxima a la región de transición y con aplicación de CaCO_3 (Fig. 4b y 4e) se observa un incremento de la ferrita Widmanstätten presente, la ferrita alotriomórfica y ferrita acicular tienden a disminuir con la aplicación del CaCO_3 .

En la micrografía con aplicación de SiO_2 (Fig. 4c y 4f) se observa una ferrita Widmanstätten no tan abundante como la de la aplicación de CaCO_3 , la ferrita alotriomórfica y acicular se observan en mayor cantidad que la ferrita Widmanstätten lo cual da un carácter masivo a la microestructura.

En la Fig. 5 se presentan las micrografías ópticas a diferentes aumentos, 200X y 500X de las muestras soldadas sin y con los dos tipos de flux y transferencia spray. La micrografía sin aplicación de flux con transferencia spray (Fig. 5a y 5d) muestra una ferrita acicular y alotriomórfica menos abundante en comparación a los modos de transferencia anteriores, la ferrita Widmanstätten es mayor con relación a los otros tipos de ferrita.

En la Fig. 5b y 5e se muestra una estructura fina es decir con grandes cantidades de ferrita Widmanstätten y poca presencia de ferrita alotriomórfica y acicular. En la soldadura con transferencia spray y aplicación de SiO_2 (Fig. 5c y 5f) se observa la presencia de ferrita alotriomórfica de manera masiva y gruesa, de igual forma hay ferrita acicular. En esta micrografía la formación de ferrita Widmanstätten no se evidencia de forma clara.

Figura 4. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 soldado con transferencia globular próxima a la región de transición. Aumento: 200X. a) Sin flux b) CaCO_3 c) SiO_2 . Aumento: 500X. d) Sin flux e) CaCO_3 f) SiO_2 .

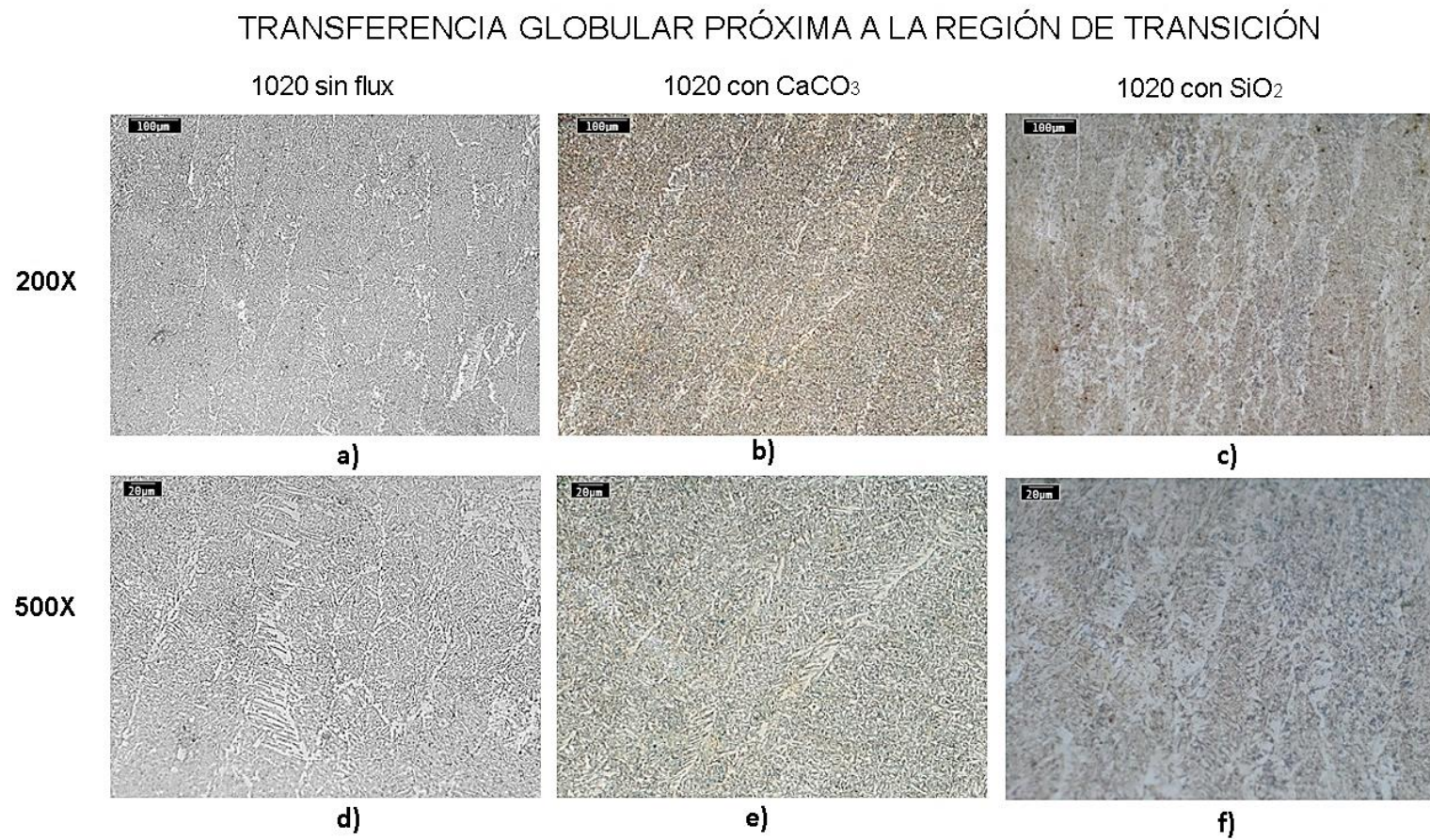
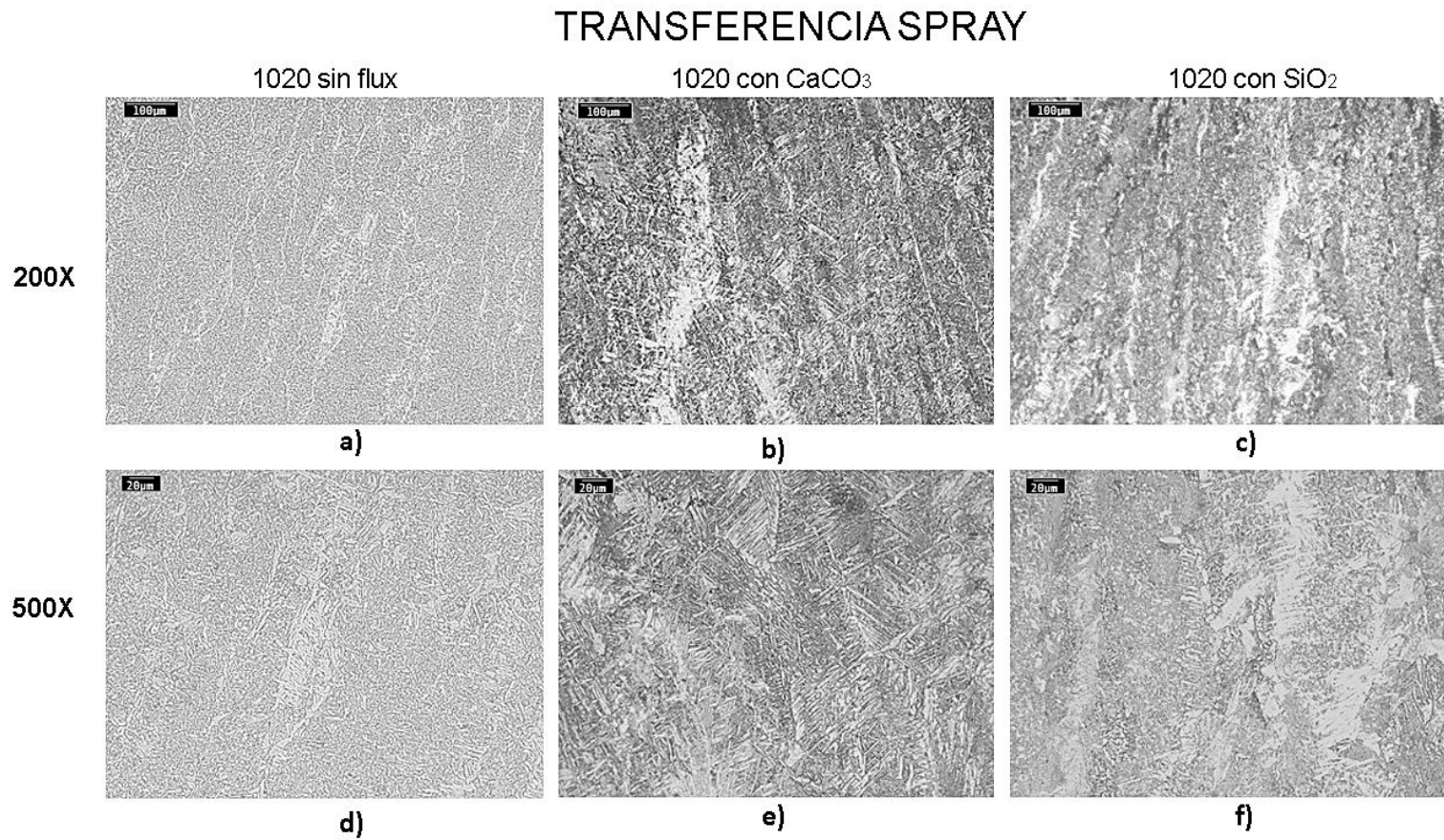


Figura 5. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 soldado con transferencia spray. Aumento: 200X. a) Sin flux b) CaCO_3 c) SiO_2 . Aumento: 500X. d) Sin flux e) CaCO_3 f) SiO_2 .



Mediante las imágenes observadas para cada modo de transferencia teniendo en cuenta la aplicación o no aplicación de flux se pudo establecer cierta variación. La soldadura con estructura más fina y delgada, es decir con presencia abundante de ferrita Widmanstätten y posiblemente de perlita fue la de aplicación de CaCO_3 , debido a enfriamientos rápidos en los que el intervalo de formación de ferrita se ve restringido y se da paso a la formación de perlita fina, de igual forma se cierra la posibilidad que ocurran procesos difusivos. En el caso de las muestras con SiO_2 y sin flux presentan una ferrita alotrópica masiva y gruesa, es decir producto de enfriamientos lentos y procesos de difusión que le permite expandirse en el grano. Según la literatura ³⁰ se puede dar una variación en las velocidades de enfriamiento dependiendo del compuesto aplicado, ya que cada uno de ellos tiene entalpías de formación diferentes. A mayor entalpia de formación se necesita mayor energía para el rompimiento de los enlaces de los compuestos, una vez disociados los elementos estos buscan regresar a su estado inicial de enlace perdiendo energía potencial y aportando calor al sistema, lo que produce un aumento de temperatura del proceso generando un enfriamiento rápido. Cabe mencionar que el CaCO_3 tiene una entalpia de formación de $-1207,6 \text{ KJ/mol}$ y el SiO_2 de -851 KJ/mol ³¹. Por lo tanto, el enfriamiento más lento se presenta con la aplicación del compuesto SiO_2 .

4.2.2. Influencia del modo de transferencia; globular, globular próximo a la región de transición, spray.

Los modos de transferencia resultan de la variación en los valores de corriente que se aplica en el proceso de soldadura. Estos a su vez influyen en las características microestructurales y por ende en las propiedades mecánicas de la soldadura. En la Fig. 6 se presentan las micrografías ópticas a diferentes aumentos, 200X y 500X de las muestras soldadas con los diferentes modos de transferencia y sin aplicación de flux.

30. Gersten, J. I., y Smith, F. W. La física y la química de los materiales. Nueva York: Wiley, pp. 417-418, 2001.

31. Borgogno, F. G. Compendio de propiedades: tabla de entalpía de formación, energía libre de Gibbs y entropía de formación de compuestos inorgánicos. Neuquén, Argentina, 2010.

Figura 6. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 sin aplicación de flux. Aumento: 200X. a) Transferencia globular b) globular próxima a la región de transición c) Transferencia spray. Aumento: 500X. d) Transferencia globular e) globular próxima a la región de transición f) Transferencia spray.

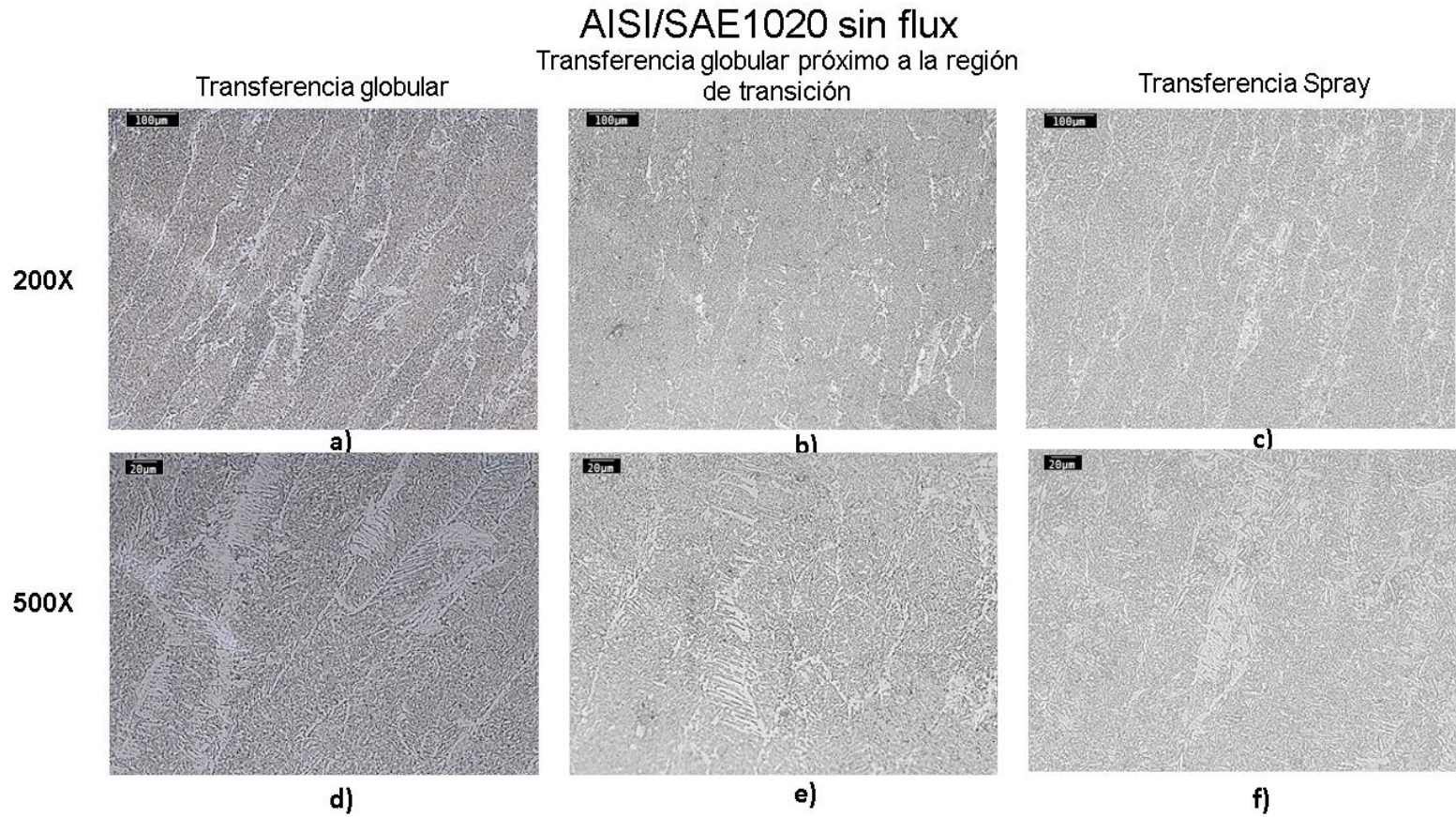


Fig. 6a y 6d se observa la formación de ferrita alotriomórfica en los límites de grano con una distribución uniforme, de igual forma hay presencia de ferrita Widmanstätten y acicular. La soldadura con modo de transferencia globular próxima a la región de transición (Fig. 6b y 6e) muestra una ferrita alotriomórfica más reducida en cantidad en comparación a la de transferencia globular, la ferrita Widmanstätten observada es más numerosa por esta razón se ve una estructura menos masiva. En la Fig. 6c y 6f se evidencia gran cantidad de ferrita Widmanstätten, además está bien distribuida y tiene una forma fina, la ferrita alotriomórfica es muy reducida en cuanto a los procesos de transferencia previos.

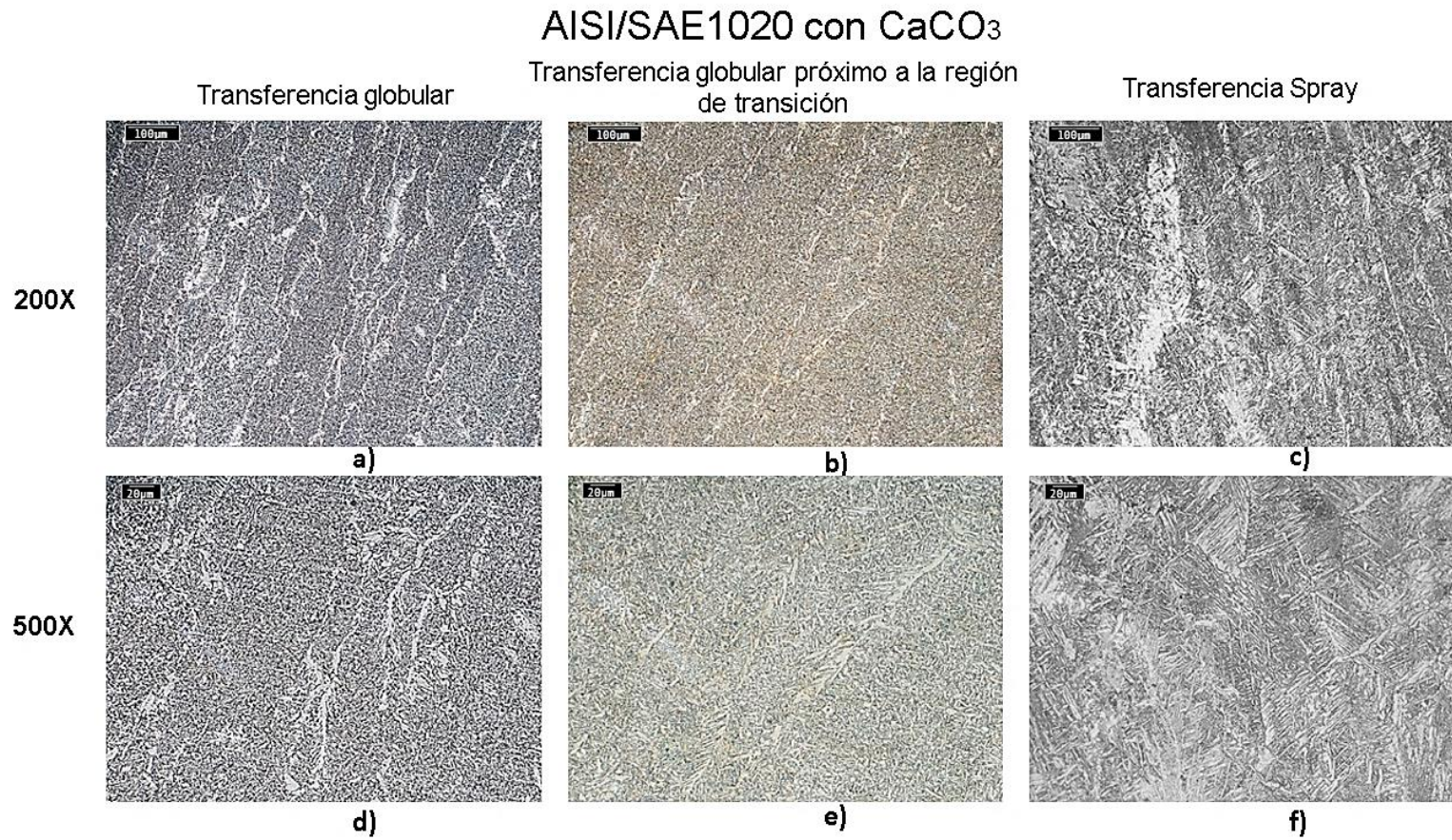
En la Fig. 7 se presentan las micrografías ópticas a diferentes aumentos, 200X y 500X de las muestras soldadas con los diferentes modos de transferencia y con aplicación de CaCO_3 .

En la Fig. 7a y 7d se observa ferrita alotriomórfica a lo largo de los límites de grano, ésta es numerosa y abarca una gran zona de la micrografía. La ferrita Widmanstätten presente se encuentra en mínima cantidad y la ferrita acicular está distribuida de manera uniforme en toda la microestructura, mostrando un carácter masivo.

En las micrografías del proceso de transferencia globular próxima a la región de transición (Fig. 7b y 7e), la ferrita alotriomórfica se encuentra en pequeña cantidad. Por el contrario, la ferrita Widmanstätten empieza a ser más notoria y la ferrita acicular menos abundante. La microestructura se muestra más fina en comparación al mecanismo de transferencia globular.

La soldadura con transferencia spray (Fig. 7c y 7f) muestra una estructura muy fina por lo que se entiende una presencia muy notoria y significativa de ferrita Widmanstätten y posiblemente contenido de perlita fina. La ferrita alotriomórfica y la ferrita acicular se ven en menos cantidad en comparación a los modos de transferencia globular.

Figura 7. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 con aplicación de CaCO_3 . Aumento: 200X. a) Transferencia globular b) globular próxima a la región de transición c) Transferencia spray. Aumento: 500X. d) Transferencia globular e) globular próxima a la región de transición f) Transferencia spray.

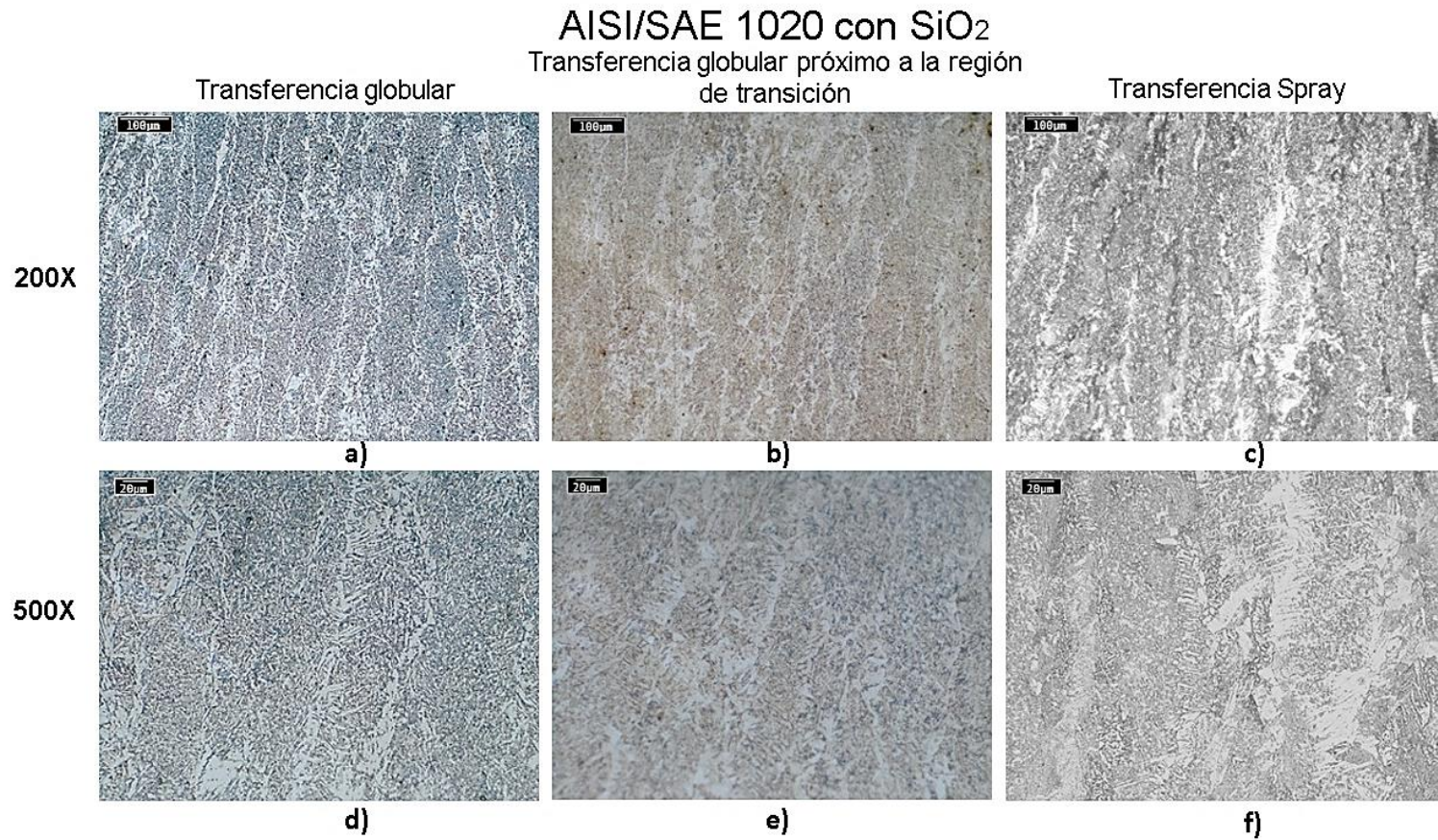


En la Fig. 8 se presentan las micrografías ópticas a diferentes aumentos, 200X y 500X de las muestras soldadas con los diferentes modos de transferencia y con aplicación de SiO₂. Las micrografías del modo de transferencia globular con aplicación de SiO₂ (Fig. 8a y 8d) se observa una gran presencia de ferrita alotriomórfica en los límites de grano. La ferrita acicular existente está en gran cantidad, dándole un carácter masivo a la estructura, la ferrita Widmanstatten se encuentra en mínima cantidad. La Fig. 8b y 8e muestra una estructura de ferrita acicular abundante, de igual forma empieza a notarse muy levemente la ferrita Widmanstatten. La ferrita alotriomórfica se reduce con respecto a la transferencia globular anteriormente analizada. Con el modo de transferencia spray (Fig. 8c y 8f) se evidencia ferrita widmanstatten con una morfología no tan clara. La ferrita alotriomórfica es abundante y presenta un carácter masivo y grueso. La ferrita acicular está distribuida de manera uniforme.

En las micrografías observadas con o sin la aplicación de flux teniendo en cuenta variaciones en los valores de corriente, fue posible analizar que, al variar la temperatura del proceso, varían las velocidades de enfriamiento lo cual juega un papel importante en la microestructura de la soldadura. Para la transferencia globular la cual presenta menor corriente se da el desprendimiento de la gota cuando el diámetro de ésta es mayor que el diámetro del electrodo es decir el proceso está dominado por fuerzas gravitacionales, lo que conlleva a tener un volumen y peso de la gota mayor de tal forma tener un enfriamiento lento. Para el modo de transferencia globular próxima a la región de transición se da un enfriamiento mucho más rápido que el de transferencia globular.

En el caso de transferencia spray se tiene una mejor estabilidad de arco, de esta forma la caída de las gotas se da en un menor tiempo y en forma de rocío, lo que permite que la masa depositada esté dispersa y se enfríe de manera más rápida. Por tal razón la velocidad de enfriamiento para este tipo de transferencia es mayor a la de los dos modos de transferencia anteriormente mencionados, esto se traduce en microestructuras más finas y delgadas.

Figura 8. Micrografías ópticas del acero AISI SAE 1020 con aplicación de SiO₂. Aumento: 200X. a) Transferencia globular b) globular próxima a la región de transición c) Transferencia spray. Aumento: 500X. d) Transferencia globular e) globular próxima a la región de transición f) Transferencia spray.



En conclusión, el aumento en los valores de corriente incrementa la temperatura del proceso, lo que permite tener velocidades de enfriamiento elevadas y por ende microestructuras finas.

4.2.3. Análisis microestructural mediante SEM y EDS.

Luego de realizar el análisis con el microscopio óptico se utilizó microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de dispersión de rayos X (EDS) con el fin de verificar la presencia de cada uno de los microconstituyentes en las soldaduras.

En la Fig. 9 se pueden observar las variaciones en la microestructura que se presentan al adicionar compuestos en un acero AISI/SAE 1020 en un proceso de soldadura GMAW. En las diferentes microestructuras se muestra la presencia relativamente abundante de ferrita Widmanstätten, es decir una estructura fina y delgada debido a que el mecanismo de transferencia que acoge estas soldaduras es el spray.

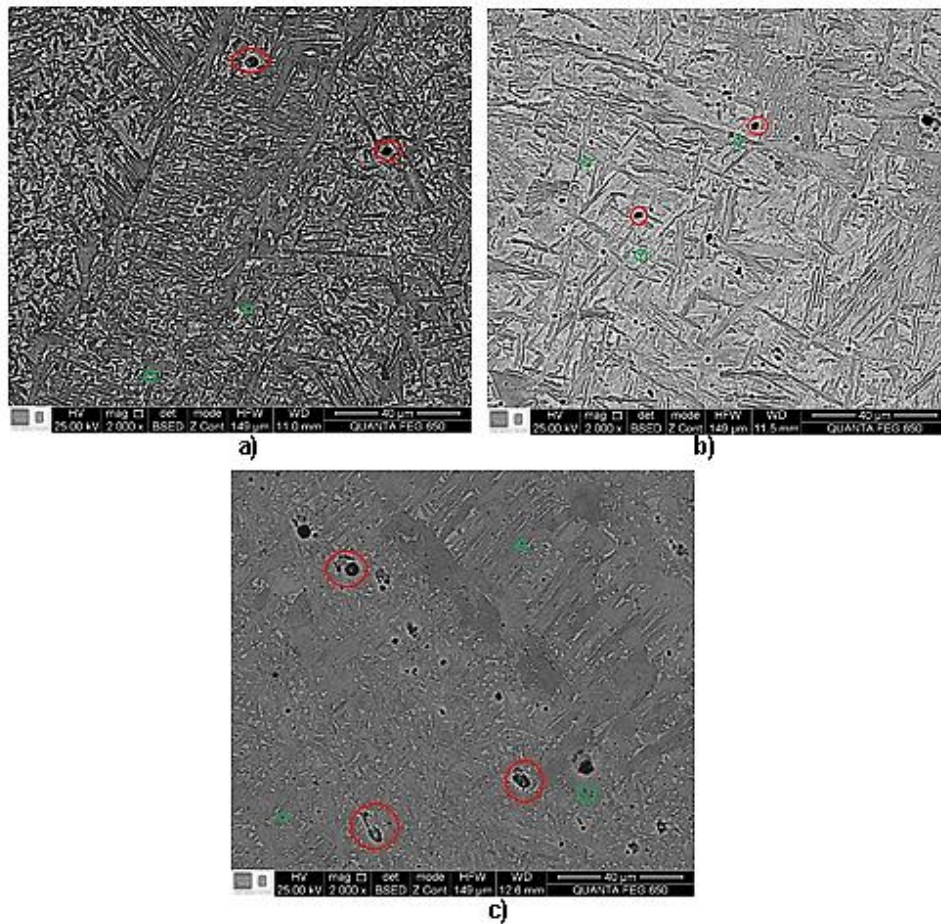
Sin embargo, la Fig. 9b es la soldadura que presenta una estructura más fina, delgada y bien distribuida debido a las altas temperaturas del proceso y a su vez en las elevadas velocidades de enfriamiento.

Es posible mencionar que en las micrografías se observan manchas (indicadas de color rojo) producto de problemas en la preparación de las muestras y puntos negros (indicadas de color verde) resultantes del proceso de solidificación del metal líquido en la soldadura, haciendo referencia a porosidades mínimas.

Con el uso de espectroscopia de dispersión de rayos X fue posible obtener los porcentajes de composición química en diferentes puntos evaluados en las muestras con aplicación de CaCO_3 (Ver anexo A y B) y SiO_2 (Ver anexo C y D). Atendiendo lo anterior se puede verificar que no hay presencia de óxidos de calcio en la soldadura de CaCO_3 . No obstante, en el caso de la muestra de SiO_2 si existen pequeños silicatos ya que el contenido de silicio se incrementa de manera considerable. La distribución de inclusiones juega un papel importante en las

transformaciones de fase del metal de soldadura, ya que sirven como sitios intragranulares para la formación de ferrita acicular ³², lo cual se muestra en las micrografías con aplicación de SiO₂.

Figura 9. Micrografías electrónicas del acero AISI/SAE 1020 soldado obtenidas por medio de SEM a 2000x a) sin flux con transferencia spray, b) CaCO₃ con transferencia spray y c) SiO₂ con transferencia spray.



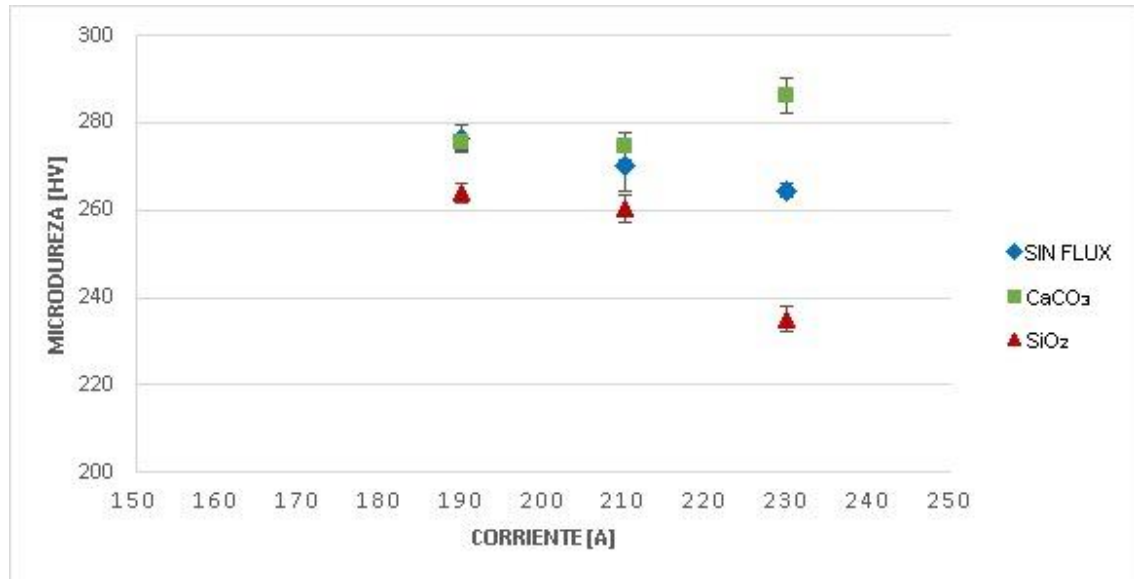
4.3. EFECTO EN LA MICRODUREZA DE LA ZONA FUNDIDA.

A continuación, se presentará una gráfica que reúne todos los datos obtenidos de la prueba de microdureza para cada una de las muestras teniendo claro el efecto conjunto de dos variables, la aplicación de compuestos de SiO₂ y CaCO₃ y los

32. Bott, I. S., De Rissone, N. M. R., & Surian, E. Efecto de la wolastonita sobre las inclusiones del metal depositado por electrodos rutilicos. Información Tecnológica Vol. 12, No. 1, pp. 91-100, 2001.

modos de transferencia globular, 190 [A], globular próxima a la región de transición, 210 [A] y spray, 230 [A].

Figura 10. Gráfico resumen de los datos obtenidos mediante prueba de microdureza para las soldaduras estudiadas.



Como se puede observar en la Fig. 10 las muestras que presentan mayores valores de microdureza son las que tienen aplicación de CaCO₃; los menores valores en esta prueba los presentan las soldaduras con aplicación de SiO₂. Por otro lado, las muestras sin aplicación de compuestos presentan una microdureza cercana a las del CaCO₃ con transferencia globular y globular próxima a la región de transición. Se puede también observar que, en los modos de transferencia globular, 190 [A] y globular próxima a la región de transición, 210 [A], los datos se mantienen en un mismo rango (no se manifestó una variación apreciable en los valores de microdureza), a diferencia de la transferencia spray, 230 [A] en la cual se evidencian cambios significativos, debido a la forma en cómo se deposita la gota, las altas temperaturas del proceso y a su vez elevadas velocidades de enfriamiento y la variación en las entalpías de formación de cada uno de los flux (SiO₂ y CaCO₃).

Analizando y comparando los datos obtenidos en las pruebas de microdureza y las micrografías de las soldaduras, se puede decir que existe coherencia, ya que en estructuras más finas y delgadas se presentan valores de microdureza altos, a diferencia de las estructuras masivas y gruesas que son un poco más blandas. De igual forma los cambios significativos mostrados en el modo de transferencia spray, nos permite verificar que es el mecanismo con mayor incidencia en la microestructura de un material.

5. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas con respecto a los efectos de los flux activos sobre las características microestructurales finales de la zona fundida producida mediante proceso de soldadura GMAW con transferencia spray y globular en un acero AISI/SAE 1020:

1. El efecto causado por la aplicación de flux de SiO_2 y CaCO_3 no representa la aparición de nuevos microconstituyentes en relación al proceso GMAW convencional, tan sólo muestra variación en la forma, tamaño y distribución de los mismos.
2. Al realizar el análisis microestructural se llegó a la conclusión de que el modo de transferencia juega un papel importante en la microestructura final de la zona fundida, ya que con el incremento de los valores de corriente se obtienen microestructuras más finas y delgadas.
3. Considerando la influencia de la microestructura en las propiedades mecánicas del material, se concluyó que la aplicación de CaCO_3 incrementa los valores de microdureza a diferencia del SiO_2 . Debido a que con la aplicación de CaCO_3 se obtuvo una microestructura más fina.

6. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda mantener las muestras de soldadura en una atmósfera controlada con el fin de evitar la formación de óxidos por la humedad del ambiente.
2. Se recomienda evaluar las características microestructurales y microdureza de la zona fundida en soldaduras fabricadas con aplicación de compuestos de Fe_2O_3 y KClO_4 y bajo el modo de transferencia spray y globular, con el fin de complementar los estudios realizados con la técnica A-GMAW.
3. Se sugiere hacer un análisis microestructural y de microdureza de la zona afectada por el calor a las muestras estudiadas en este proyecto de investigación, con el fin de establecer diferencias en relación a la zona fundida.

BIBLIOGRAFÍA

Abson D J, Dolby R E and Hart P H M H, "The role of nonmetallic inclusions in ferrite nucleation in carbon steel weld metals", In: Trends in Steels and Consumables for Welding. Proceedings, International Conference, London, 13-16 nov.1978. Publ: Abington, Cambridge CB1 6AL; The Welding Institute; 1979.

Askeland, D. R, y Wright, W.J. Lo esencial de la ciencia e ingeniería de materiales. Aprendizaje Cengage. 2013.

Callister Jr, W.D. & Rethwisch, D. G. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales: un enfoque integrado. John Wiley & Sons. 2012.

De Salazar, J. G., Ureña, A., Villauriz, E., Manzanedo, S., & Barrena, I. Soldadura TIG y MIG de las aleaciones de aluminio 6061 y 7020. Estudios microestructurales y de propiedades mecánicas. Revista de Metalurgia, 34(Extra), 276-280. 1998.

López, E., Campillo, B., Garnica, P., Vergara, H., Efecto del calor aportado por soldadura en un acero microaleado, Memorias del XIX Congreso Internacional Anual De La SOMIM 25 al 27 de septiembre, 2013 Pachuca, Hidalgo, México. 2013.

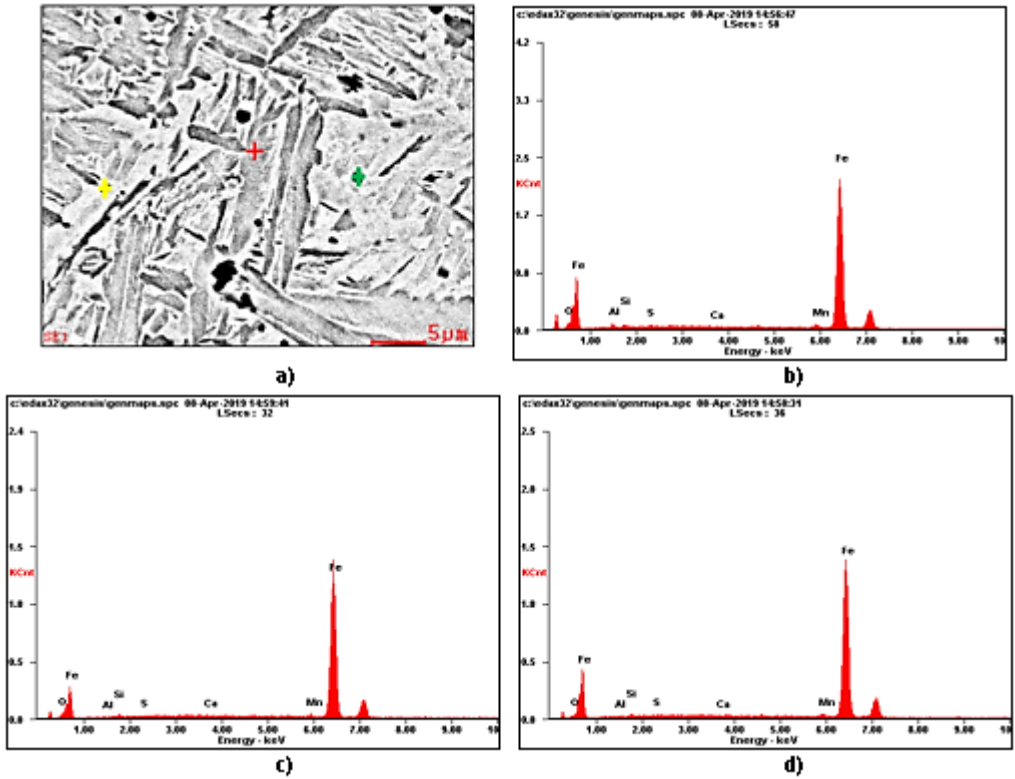
Olivaresa, E. G., Díazb, V. V., Toledob, R. H., & Calderóna, R. M. Influencia de los parámetros operacionales del proceso de soldadura MIG/MAG con transferencia metálica por Corto-Circuito. In: Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica COCIM 2010, At Pucon, Chile, noviembre. 2010.

Smith, W. F., Hashem, J. y Prakash, R. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 5e (En Unidades SI). Educación de McGraw-Hill. 1990.

Yang J. R and Bhadeshia, H K D H, "Thermodynamics of the acicular ferrite transformation in weld metals", In Advances in Welding Science and Technology, Proc. Int. Conf. on Trends in Welding Research, Gatlinburg, U.S.A., 18–22 May 1986, Editor S A David, 187-191.

ANEXOS

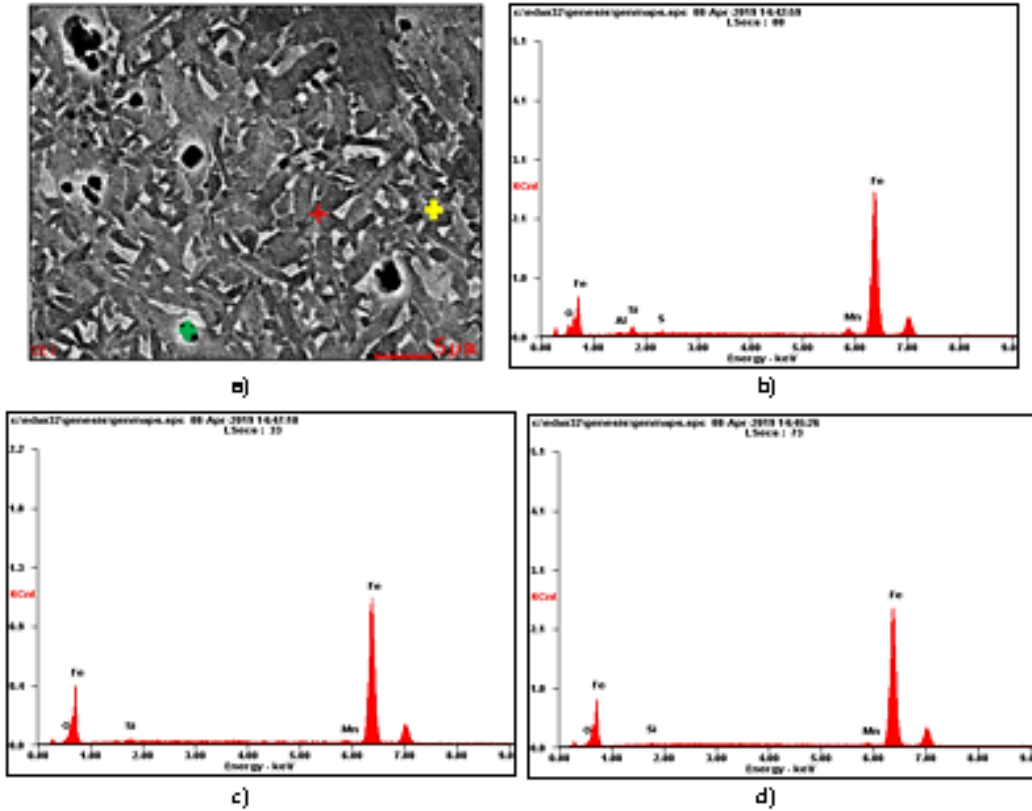
Anexo A. Micrografía obtenida por SEM y Espectro EDS de la muestra CaCO_3 , a) Micrografía SEM de la muestra con CaCO_3 a 2000X, b) Espectro EDS en el punto rojo, c) Espectro EDS el punto verde y d) Espectro EDS el punto amarillo.



Anexo B. Tablas de composición química de los espectros EDS de la muestra CaCO_3 (Anexo A), a) para el punto rojo, b) para el punto verde y c) para el punto amarillo.

a)			b)			c)		
Elemento	Wt%	At%	Elemento	Wt%	At%	Elemento	Wt%	At%
OK	02.18	06.89	OK	01.91	06.25	OK	01.52	04.97
AlK	01.84	03.50	AlK	00.27	00.53	AlK	00.74	01.44
SiK	00.99	01.81	SiK	01.05	01.96	SiK	01.35	02.52
SK	00.45	00.72	SK	00.43	00.70	SK	00.62	01.01
CaK	00.12	00.16	CaK	00.37	00.48	CaK	00.62	00.81
MnK	01.78	01.66	MnK	01.47	01.41	MnK	01.96	01.87
FeK	92.64	85.17	FeK	94.50	88.67	FeK	93.19	87.38

Anexo C. Micrografía obtenida por SEM y Espectro EDS de la muestra SiO₂, a) Micrografía SEM de la muestra con SiO₂ a 2000X, b) Espectro EDS en el punto rojo, c) Espectro EDS el punto verde y d) Espectro EDS el punto amarillo.



Anexo D. Tablas de composición química de los espectros EDS de la muestra SiO₂(Anexo C), a) para el punto rojo, b) para el punto verde y c) para el punto amarillo.

a)			b)			c)		
Elemento	Wt%	At%	Elemento	Wt%	At%	Elemento	Wt%	At%
OK	03.98	12.16	OK	01.77	05.83	OK	01.53	05.09
SiK	02.93	05.09	SiK	01.49	02.80	SiK	00.95	01.80
MnK	03.29	02.93	MnK	01.69	01.62	MnK	01.35	01.31
FeK	88.29	77.26	FeK	95.05	89.75	FeK	96.17	91.79

Anexo E. Resultados obtenidos prueba microdureza para las muestras sin flux (Tabla a), con aplicación de flux CaCO_3 (Tabla b) y SiO_2 (Tabla c), en los modos de transferencia globular, globular próxima a la región de transición y spray.

Tabla a. Datos de microdureza para la muestra sin flux, a) transferencia globular, b) transferencia globular próxima a la región de transición y c) transferencia spray.

	a)	b)	c)
#Prueba	[HV]	[HV]	[HV]
1	276	262	263
2	279	268	263
3	271	279	267
4	279	274	264
5	277	267	265
Microdureza promedio	276,4	270	264,4
Desviación estándar	± 2,93	± 5,89	± 1,49

Tabla b. Datos de microdureza para la muestra con CaCO_3 , a) transferencia globular, b) transferencia globular próxima a la región de transición y c) transferencia spray.

	a)	b)	c)
#Prueba	[HV]	[HV]	[HV]
1	274	272	286
2	273	280	284
3	275	275	289
4	276	271	279
5	279	275	292
Microdureza promedio	275,4	274,6	286
Desviación estándar	± 2,05	± 3,13	± 4,11

Tabla c. Datos de microdureza para la muestra con SiO₂, a) transferencia globular, b) transferencia globular próxima a la región de transición y c) transferencia spray.

	a)	b)	c)
#Prueba	[HV]	[HV]	[HV]
1	263	259	235
2	264	265	232
3	265	258	233
4	261	256	234
5	267	264	241
Microdureza promedio	264	260,4	235
Desviación estándar	± 2	± 3,49	± 3,16

Anexo F. Valores de las diagonales de las huellas de microdureza para las muestras con modo de transferencia spray con aplicación de CaCO₃ (Tabla a) y SiO₂ (Tabla b).

Tabla a. medidas de diagonales de las huellas de microdureza para las muestras con modo de transferencia spray con aplicación de CaCO₃.

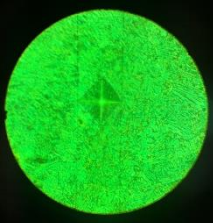
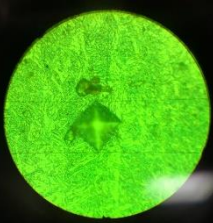
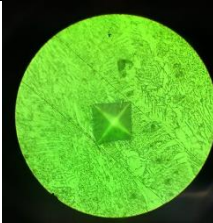
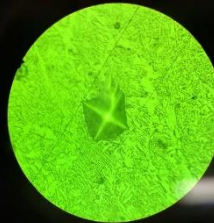
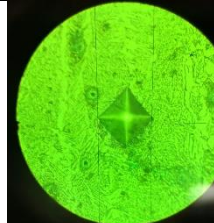
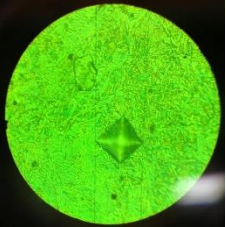
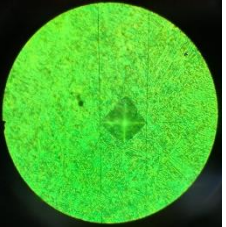
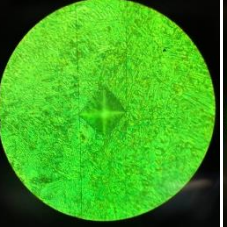
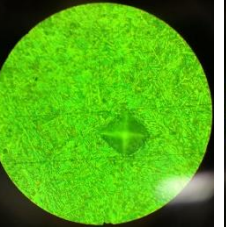
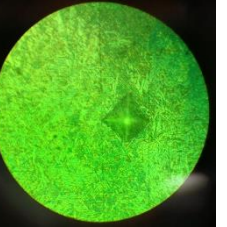
				
D₁ = 2,328 [μm]	D₁ = 2,234 [μm]	D₁ = 2,213 [μm]	D₁ = 2,199 [μm]	D₁ = 2,244 [μm]
D₂ = 2,321 [μm]	D₂ = 2,191 [μm]	D₂ = 2,301 [μm]	D₂ = 2,305 [μm]	D₂ = 2,245 [μm]

Tabla b. medidas de diagonales de las huellas de microdureza para las muestras con modo de transferencia spray con aplicación de SiO₂.

				
D₁ = 2,585 [μm]	D₁ = 2,734 [μm]	D₁ = 2,637 [μm]	D₁ = 2,555 [μm]	D₁ = 2,692 [μm]
D₂ = 2,596 [μm]	D₂ = 2,661 [μm]	D₂ = 2,701 [μm]	D₂ = 2,692 [μm]	D₂ = 2,557 [μm]