

**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**

MAYRA LIZETH MAYORGA LAGUADO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

**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**

MAYRA LIZETH MAYORGA LAGUADO

**Trabajo de grado (modalidad, proyecto de investigación) para optar al título
de Ingeniero Metalúrgico**

Directores:

PAULO JOSÉ MODENESI

Doctor en Soldadura y Procesos Afines

MAURICIO RINCÓN ORTÍZ

Doctor en Ciencia y Tecnología. Mención Materiales



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios por las oportunidades que he tenido y permitirme lograr mis objetivos.

A mis padres, Hernando Mayorga Miranda y Elveny Laguado Jaimes, quienes son un ejemplo de vida para mí, por su esfuerzo, dedicación y perseverancia. Ellos me han apoyado siempre incondicionalmente en todas mis metas, dándome su amor y consejo. A ellos les debo todo.

A mi hermano Oscar Mauricio Mayorga Laguado, por su apoyo, amor, paciencia y compañía todos estos años.

A mis familiares y amigos por su apoyo y acompañamiento durante mi formación profesional y personal.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al profesor Paulo José Modenesi y al profesor Mauricio Rincón Ortiz por su dirección y acompañamiento durante el desarrollo del presente proyecto de grado.

Agradezco al Laboratorio de Metalografía y Tratamientos Térmicos de la Universidad Federal de Minas Gerais (LABMET) y al profesor Dagoberto Brandão Santos por permitirme utilizar el laboratorio para la preparación de las muestras y el desarrollo de las pruebas respectivas, así como a sus integrantes por la colaboración brindada. Igualmente agradezco a José Roberto Ferreira Neto por su cooperación.

Asimismo, doy mis agradecimientos al Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por permitirme el uso del Microscopio óptico. Agradezco además, al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander por permitirme utilizar el servicio de SEM correspondiente a la metodología de éste proyecto, especialmente a Carlos Alberto Chacón Ávila por su colaboración en la adquisición de datos del SEM.

Finalmente, doy gracias a mi familia y amigos por el apoyo incondicional que me brindaron durante mi formación profesional estos años.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. ANTECEDENTES	17
2. OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GENERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
3.1 CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA	23
3.1.1. Microscopía Óptica.	26
3.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido	27
3.2 MICRODUREZA	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	29
4.1.1. Microscopía Óptica	29
4.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido –	40
4.2 EFECTO EN LA MICRODUREZA DE LA ZONA FUNDIDA	46
5. CONCLUSIONES	48
6. RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXOS	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Microdureza promedio de la ZF (HV) de todas las muestras.	47
Tabla 2. Composición del Acero AISI SAE 1020 y del electrodo AWS A5.18 ER70S6 empleado para fabricar los cordones de soldadura. [17].	55
Tabla 3. Resultados de composición química de los espectros EDS de la Fig. 14b.	58
Tabla 4. Resultados de composición química de los espectros EDS de a) la Fig. 21b para el punto rojo, b) la Fig. 21b para el punto verde y c) la Fig. 21c para el punto amarillo. Soldadura sin aplicación SF1.	60
Tabla 5. Resultados de composición química de los espectros EDS de a) la Fig. 15a para el punto rojo, b) la Fig. 15b para el punto verde y c) la Fig. 15c para el punto amarillo. Soldadura con aplicación del compuesto CaCO ₃	61
Tabla 6. Resultados de composición química de los espectros EDS de a) la Fig. 21b para el punto rojo, b) la Fig. 21b para el punto verde y c) la Fig. 21c para el punto amarillo. Soldadura con aplicación del compuesto SiO ₂	62
Tabla 7. Datos de microdureza medidos para la muestra SF1.	63
Tabla 8. Datos de microdureza obtenidos para la SF2.	63
Tabla 9. Datos de microdureza obtenidos para la SiO ₂	64
Tabla 10. Datos de microdureza obtenidos para la KClO ₄	64

Tabla 11. Datos de microdureza obtenidos para la CaCO_365

Tabla 12. Datos de microdureza obtenidos para la Fe_2O_365

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Chapa de acero AISI SAE 1020. CF = Zona con la aplicación del compuesto (KClO_4); SF = Zona sin aplicación de compuesto.	24
Figura 2. Sección transversal del cordón de soldadura fabricado con A-GMAW y aplicación de SiO_2	26
Figura 3. Probeta sin aplicación de compuesto (SF1), luego de la etapa de pulido.	27
Figura 4. Micrografía del acero AISI SAE 1020 libre, aumento: 500X. Muestra SF1. En donde 1) PF - G y 2) PF – I.....	31
Figura 5. Micrografía del acero AISI SAE 1020 libre, aumento: 1000X. Muestra SF1	32
Figura 6. Micrografías del acero AISI SAE 1020 con aplicación de SiO_2 con 1000X de aumento. En a) se identifican FS – NA), AF y PF – G, y en b) se observan además PF – I y FS – A.	32
Figura 7. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de KClO_4 , aumento: 500X.....	34
Figura 8. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de KClO_4 , aumento: 1000X.....	35
Figura 9. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de CaCO_3 , aumento: 500X.....	36

Figura 10. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de CaCO_3 , aumento: 1000X.....	37
Figura 11. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de Fe_2O_3 , aumento: 500X. En donde 1) PF – G.....	37
Figura 12. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de Fe_2O_3 , aumento: 1000X. En donde 1) PF – G.....	38
Figura 13. Micrografías obtenidas por medio de SEM en a) SF1, b) CaCO_3 y c) SiO_2	41
Figura 14. a) Micrografía SEM de la muestra SF1 con un aumento de 4000X. b) Espectro EDS de la muestra SF1 en el punto señalado en la Fig. 14a.	42
Figura 15. a) Micrografía SEM de la muestra CaCO_3 . b) Espectro EDS de la muestra de soldadura con CaCO_3 en b) el punto rojo, c) el punto verde, d) el punto amarillo señalado en la Fig. 15a.	44
Figura 16. a) Micrografía SEM de la muestra SiO_2 con 2000X de aumento. b) Espectro EDS de la muestra de soldadura con SiO_2 en b) el punto rojo, c) el punto verde, d) el punto amarillo señalado en la Fig. 16a.....	45

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. INFORMACIÓN COMPLETA DEL MUESTREO.....	55

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA Y LA MICRODUREZA DE LA ZONA FUNDIDA DE SOLDADURAS FABRICADAS MEDIANTE EL PROCESO A-GMAW EN UN ACERO AISI/SAE 1020*

AUTORES: MAYORGA LAGUADO, MAYRA LIZETH**

PALABRAS CLAVES: A – GMAW, soldadura, microestructura, microdureza.

DESCRIPCIÓN:

El proceso GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) conocido como soldadura de arco con gas de protección y electrodo consumible es uno de los procesos más utilizados industrialmente para la unión de piezas de varios materiales. A pesar de sus características, el número de variables operacionales del proceso es elevado, por lo que la soldadura GMAW tiende a ser más difícil de controlar comparado con otros procesos. Como una alternativa para simplificar su control, mejorar y optimizar el proceso, se han desarrollado modificaciones como el proceso A-GMAW, inspirado en los resultados obtenidos con A-TIG, el cual involucra la aplicación de una fina capa de un compuesto activo (óxidos o haluros) sobre la superficie limpia del metal base, aumentando la profundidad de penetración del cordón de soldadura. El siguiente trabajo presenta una evaluación de los efectos causados por la aplicación de CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 y KClO_4 sobre la microestructura de la zona fundida y la microdureza de soldaduras de acero AISI SAE 1020 con el proceso A-GMAW. El material de prueba proviene del estudio hecho por José Roberto Ferreira en el programa de Postgrado en Ingeniería Metalúrgica, Materiales y de Minas de la UFMG. Se realizó caracterización microestructural y de microdurezas de la zona fundida de las muestras con la aplicación de los compuestos mencionados y 2 más libres. Según los resultados, las microestructuras de todas las muestras fueron similares, presentando los mismos microconstituyentes y pequeñas inclusiones de óxidos de hierro. En cuanto a la microdureza, ésta fue similar en todas las muestras considerando la desviación de los datos, la aleatoriedad de los puntos de medida y las distintas propiedades de las fases encontradas. De ésta manera, la aplicación de los compuestos evaluados no influyó de manera significativa en las propiedades microestructurales y de microdureza de las soldaduras.

* Trabajo de Grado (modalidad, proyecto de investigación)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Directores: Ph.D. Paulo José Modenesi; Ph.D. Mauricio Rincón Ortíz.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS OF WELD METAL IN WELDS MANUFACTURED THROUGH A-GMAW IN AN AISI SAE 1020 STEEL.*

AUTHORS: MAYORGA LAGUADO, MAYRA LIZETH**

KEYWORDS: A – GMAW, welding, microstructure, microhardness

DESCRIPTION: The GMAW (Gas Metal Arc Welding) process is one of the most industrially used processes for joining parts of a wide range of metals. In spite of its characteristics, the number of operational variables of the process is high, so GMAW welding tends to be more difficult to control compared to other processes. As an alternative to simplifying its control, improving and optimizing it, modifications have been developed as the A-GMAW process, inspired by the results obtained with A-TIG, which involves the application of a thin layer of an active compound (oxides or halides) on the clean surface of the base metal, increasing the depth of penetration of the weld bead. The following work presents an evaluation of the effects caused by the application of CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 and KClO_4 on the microstructure of the weld zone and the microhardness of AISI SAE 1020 steel welds with the A-GMAW process. The test material comes from the study made by José Roberto Ferreira in the Postgraduate Program in Metallurgical, Materials and Mining Engineering at UFMG. Microstructural characterization and microhardness were performed on the melt zone of six samples, four with the application of the mentioned compounds and 2 more manufactured with conventional GMAW process. According to the results, the microstructures of all the samples were similar, presenting the same microconstituents and small inclusions of possible iron oxides. As for the microhardness, this was similar in all samples considering the deviation of the values of the data, the randomness of the measurement points and the different properties of the phases found. Thus, the application of the evaluated compounds had no significant influence on the microstructural and microhardness properties of the welds.

* Degree project (modality, research project)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Advisers: Ph.D. Paulo José Modenesi; Ph.D. Mauricio Rincón Ortiz

INTRODUCCIÓN

El proceso GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), conocido también como soldadura de arco metálico con gas de protección y electrodo consumible, es uno de los procesos más utilizados a nivel mundial para la unión de diversos metales¹. No obstante, debido a que el número de variables operacionales del proceso es elevado éste tiende a ser más difícil de controlar en comparación con otros procesos como la soldadura con electrodo revestido (SMAW), motivo por el cual se han desarrollado diversas variantes para optimizar su operación y facilitar su control. Sin embargo, estas modificaciones del proceso convencional involucran equipos de alto costo y de mantenimiento complicado². De esta manera, como una posible alternativa más simple y económica para obtener un mayor control de sus variables, y a la vez, mejorar la apariencia del cordón depositado, se ha propuesto una variante del proceso GMAW conocida como A-GMAW. Éste tiene sus bases en el proceso A-TIG, en el cual se han desarrollado investigaciones sobre los efectos de la adición de una capa fina de óxidos o haluros, los cuales son depositados en la superficie del material base, observándose mejoras en la apariencia del cordón de soldadura, aumento de la profundidad de penetración, disminución de la distorsión del cordón y mejoría de sus propiedades mecánicas³. No obstante, su implementación en la soldadura GMAW no ha sido tan ampliamente explorada a pesar de ser uno de los procesos más utilizados en la industria.

¹ LINCOLN ELECTRIC. Soldadura Semiautomática con Gas de Protección (MIG - MAG). Departamento de Formación Lincoln-KD, S.A, 2005.

² KAH, Paul; SUORANTA, Ramio y MARTIKAINEN, Jukka. Advanced gas metal arc welding processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, pp. 655 - 674.

³ HUANG, Her - Yueh. Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments. *Materials and Design*, 31 (7), pp. 2404 - 2409.

Por otro lado, aunque se han llevado a cabo investigaciones en cuanto a la viabilidad del proceso A-GMAW a nivel operacional evaluando los efectos causados por la aplicación de compuestos activos, no se han realizado suficientes estudios sobre sus efectos en la microestructura del metal de soldadura y en sus propiedades mecánicas. Por lo anterior, es importante realizar un análisis de la microestructura de los cordones fabricados bajo esta variación del proceso GMAW, así como una evaluación de los valores de propiedades mecánicas tales como la microdureza, principalmente en la zona fundida (ZF), para así evaluar qué consecuencias tiene la aplicación de ciertos compuestos sobre el metal base previo a la soldadura con el proceso convencional.

1. ANTECEDENTES

El proceso GMAW se caracteriza principalmente por su alta tasa de deposición, alta productividad, su aptitud para ser operado de forma semiautomática, mecanizada o automática y por la versatilidad que tiene para soldar tanto materiales ferrosos como no ferrosos. La unión de piezas en el proceso GMAW ocurre por la formación de un arco eléctrico entre el electrodo y el metal base, lo que conlleva a la creación de un charco de fusión debido a las altas temperaturas de operación.^{4, 5, 6}

Según American Society for Metals (ASM), el tipo de transferencia de metal está determinado por la intensidad de corriente, la velocidad de alimentación del alambre, la velocidad de avance, la composición, extensión y diámetro del electrodo, el voltaje aplicado y el gas de protección^{7, 8, 9, 10}. Por otro lado, factores operativos como la corriente, el tipo de gas de protección, voltaje, velocidad de desplazamiento, extensión del electrodo e inductancia influyen conjuntamente en la calidad de la soldadura¹¹. De ésta manera, el número de variables operacionales del proceso es elevado, razón por la cual la soldadura GMAW tiende a ser más difícil de controlar. Es por esto que se han desarrollado diversas tecnologías para optimizar su operación y facilitar su control, tales como RMD™,

⁴ LINCOLN ELECTRIC. Soldadura Semiautomática con Gas de Protección (MIG - MAG). Departamento de Formación Lincoln-KD, S.A, 2005.

⁵ PIRES, J. Norberto; LOUREIRO, Altino y BÖLMSJO, Gunnar. Welding Robots Technology System Issues and Applications. Chapter 2: Welding Technology. Springer Science & Business Media, 2006, pp. 27 - 71.

⁶ OLIVA M, Carlos. Capítulo 5: Procesos de Soldadura. Inspector de Soldadura AWS QC1:2007. Instituto Chileno de Soldadura, 2007, pp. 125 - 136.

⁷ *Ibíd.*

⁸ COMMITTEE ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, Welding, Brazing, and Soldering. ASM INTERNATIONAL, 1993.

⁹ ESAB, Apostila de Soldagem MIG/MAG. [En Línea] ESAB BRASIL, 2005.

¹⁰ OZCELIK, S; MOORE, K y NAIDU, Desineni Subbaram. Chapter 2 – Gas Metal Arc Welding: Modeling de Welding Handbook, Elsevier Ltd., 2003, pp. 9 - 93. eBook ISBN: 9780080536620

¹¹ *Ibíd.*

WiseRoot™, STT™, CMT, P-GMAW, entre otros¹². Por su parte, el proceso A-GMAW surge como una posible alternativa más simple y rentable económicamente, tal que permita un mayor control del proceso, mejor apariencia del cordón y obtener un aumento en la productividad.

El proceso A – GMAW consiste en la aplicación de una fina capa de óxidos o haluros sobre la superficie limpia del metal base. La aplicación de esta capa se realiza diluyendo el compuesto en polvo en una sustancia volátil, por lo general acetona, depositando la mezcla con un cepillo de la forma más homogénea posible¹³. Los estudios sobre la aplicación de películas de compuestos activos sobre superficies metálicas en soldadura se han enfocado en los procesos de soldadura laser, soldadura por arco de plasma y TIG (pasando a ser A-TIG) principalmente. Existen diversas investigaciones en cuanto al proceso A-TIG en las cuales se ha verificado que la adición de finas capas de compuestos activos tienen un impacto positivo sobre la profundidad de penetración de la soldadura y promueven la reducción de la distorsión debida a la contracción del metal durante el enfriamiento, lo cual podría afectar las propiedades mecánicas del cordón de soldadura.^{14,15, 16}

Algunas de estas investigaciones se han enfocado en el análisis microestructural y de las propiedades mecánicas obtenidas. Así pues, un estudio comparativo de la

¹² KAH, Paul; SUORANTA, Ramio y MARTIKAINEN, Jukka. Advanced gas metal arc welding processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, pp. 655 - 674.

¹³ HUANG, Her - Yueh. Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding. Materials and Design, 31 (5), 2010, pp. 2488-2495.

¹⁴ SNOW, Heather. M. Investigation of 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.

¹⁵ NAYEE, Sanjay G y BADHEKA, Vishvesh J. Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of Dissimilar Activating Flux Assisted-Tungsten Inert Gas Welds. Journal of Manufacturing Processes, vol. 16, nº 1, 2014, pp. 137-143.

¹⁶ MODENESI, Paulo José; APOLINÁRIO, Eustáquio R y PEREIRA, Iaci M. TIG welding with single-component fluxes. Journal of Materials Processing Technology, vol. 99, nº 1-3, 2000, pp. 260-265.

microestructura y las propiedades mecánicas en cordones de soldadura de acero inoxidable ferrítico AISI 430, fabricados con A-TIG y TIG, determinó que las soldaduras fabricadas con la aplicación de SiO_2 y Fe_2O_3 tenían los mismos microconstituyentes presentes en la ZF (Zona Fundida) a los observados en las soldaduras realizadas con el proceso convencional, con la única diferencia de poseer mayor cantidad de martensita en la soldadura con SiO_2 ; asimismo, mediante Espectroscopía de dispersión de rayos X (EDS), comprobaron que la composición química del metal base y de los cordones de soldadura era similar en todas las muestras, demostrando que la presencia de éstos compuestos no representó influencia relevante en la formación de otras fases y compuestos de la ZF. Por otro lado, mediante ensayos de microdureza en el metal de soldadura, establecieron que las soldaduras fabricadas con A-TIG tenían microdurezas muy similares a las fabricadas con TIG¹⁷. Ésta última conclusión varía respecto a otras investigaciones realizadas por otro autores. Así por ejemplo, Ahmadi, E. y Ebrahimi, A.R.¹⁸, observaron incrementos en la microdureza del metal de soldadura de cordones fabricados con A-TIG en un acero inoxidable 316L, principalmente bajo la influencia de SiO_2 . De la misma forma, Huang obtuvo microdurezas superiores en cordones de soldadura fabricados mediante A-TIG en un acero inoxidable AISI 304 con la aplicación de 80% MnO_2 y 20% ZnO .¹⁹

Con base en los resultados observados en A-TIG, se han desarrollado investigaciones aplicando esta variante al proceso GMAW, ya que al ser un proceso más económico y que brinda mayor productividad, es de gran interés en diversas aplicaciones. Uno de los estudios más citados, realizado también por

¹⁷ RAMKUMARA DEVENDRANATH, K; CHANDRASEKHAR, Aditya; KUMAR SINGH, Aditya; AHUJA, Sharang; AGARWAL, Anurag; ARIVAZHAGAN, N y MAXIUMUS RABEL, Arul. 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, 2015, pp. 54-59.

¹⁸ AHMADI, Ehsan y EBRAHIMI, Alireza. 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, 2012, pp. 55-62.

¹⁹ HUANG, Her - Yueh. Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments. *Materials and Design*, 31 (7), pp. 2404 - 2409.

Huang²⁰ sobre los efectos de tres tipos de óxidos Fe₂O₃, SiO₂ y MgCO₃, aplicados sobre la superficie de un acero al carbono AISI SAE 1020 con soldadura MIG, indicaron cambios en la geometría del cordón de soldadura así como en las propiedades mecánicas, principalmente en presencia de la capa de MgCO₃, registrando un aumento de la penetración del cordón, disminución de la distorsión angular de los granos y un aumento en la microdureza y la resistencia a la tracción de la soldadura. Asimismo, Zhang, Z. D y Cao, Q. J. estudiaron el efecto de la soldadura A –GMAW en la aleación de magnesio AZ61 con la aplicación de KCl, TiO₂ y CaCl₂, observando variaciones en la penetración del cordón y en la transferencia del metal²¹. Por otro lado, una investigación realizada recientemente sobre la aplicación de 8 compuestos diferentes y mezclas de MnO y SiO₂ en un acero estructural de grado EN 1.0421, concluyó que la presencia de estos compuestos no representó una variación significativa en la microdureza y microestructura del metal de soldadura en comparación a lo observado con el proceso GMAW convencional²². A la misma conclusión llegaron otros autores²³, quienes estudiaron el efecto de la aplicación de SiO₂ sobre la soldadura de una aleación de aluminio 6082-T6 con GMAW de doble alambre, en la cual mediante análisis de Microscopía óptica (MO), Microscopía electrónica de barrido (MEB), EDS, microdurezas y ensayos de resistencia mecánica, determinaron que no hubo variación representativa entre la microestructura y las propiedades mecánicas de los cordones fabricados con o sin la aplicación de SiO₂.

A raíz de lo anterior, se puede decir que los efectos microestructurales en el metal de soldadura no están totalmente claros ante ésta modificación del proceso

²⁰ HUANG, Her - Yueh. Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding. *Materials and Design*, 31 (5), 2010, pp. 2488-2495.

²¹ ZHANG, Z.D y CAO, Q.J. Study on Metal Transfer behaviour in Metal Inert Gas Arc Welding with Activating Flux for Magnesium Alloy. *Science and Technology of Welding & Joining*, vol. 17, nº 7, 2012, pp. 550 - 555.

²² VARBAI, Balázs; KOMOS, Rita y MÁJLINGER, Kornél. Effects of Active Fluxes in Gas Metal Arc Welding. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 61, nº 1, 2016, pp. 68-73.

²³ RUAN, Y; QUI, X.M; GONG, W.B; SUN, D.Q y LI, Y.P. Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO₂ flux. *Materials and Design*, vol. 35, 2012, pp. 20-24.

convencional. No obstante, teniendo en cuenta que el proceso de soldadura modificado evaluado en este trabajo (A-GMAW) no es el mismo A-TIG y que los parámetros de operación son diferentes a los utilizados en dichos estudios para distintos materiales, se podría decir que las posibles diferencias microestructurales que se presenten bajo la aplicación de éste proceso son producidas por variaciones de corriente y voltaje, que inclusive siendo pequeñas, tendrían un efecto en la forma del arco de soldadura, lo que a su vez influiría en la orientación y formación de sus microconstituyentes debido a las velocidades de enfriamiento²⁴. En este sentido, estas variaciones serían el producto de la presencia de los compuestos aplicados en el metal base y causarían dichas alteraciones en la estabilidad del arco. Por otro lado, los efectos en la microdureza producidos por la aplicación de películas de óxidos o haluros en la superficie del metal base previo a la soldadura con GMAW, no se han podido establecer aún a pesar de los estudios llevados a cabo sobre éste proceso.

²⁴ MODENESI, Paulo José. A Química da Formação do Cordão na Soldagem TIG. Soldagem e Inspeção, vol. 18, nº 3, 2013, pp. 287-300.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la microdureza y las propiedades microestructurales de la zona fundida en soldaduras obtenidas con el proceso A-GMAW en chapas de acero de bajo carbono AISI/SAE 1020.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto de la aplicación de capas de compuestos sobre la microestructura final de los cordones de soldadura fabricados con A-GMAW.
- Identificar el efecto de la aplicación de CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 y KClO_4 en la microdureza de la zona fundida de los cordones de soldadura fabricados con el proceso A-GMAW.
- Determinar si se obtienen cambios favorables o desfavorables según futuras aplicaciones del acero, a partir de los microconstituyentes encontrados en la zona fundida.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con el propósito de alcanzar el objetivo general de éste trabajo se procedió a identificar las variaciones en la estructura de solidificación de las soldaduras y dar una descripción cualitativa de los microconstituyentes encontrados en los cordones fabricados mediante el proceso A – GMAW y GMAW. Para ello se realizó una caracterización de la microestructura de la ZF por medio de MO y MEB-EDS. Por otro lado, se realizaron ensayos de microdureza a cada una de las muestras para evaluar el efecto de cada compuesto en ésta propiedad.

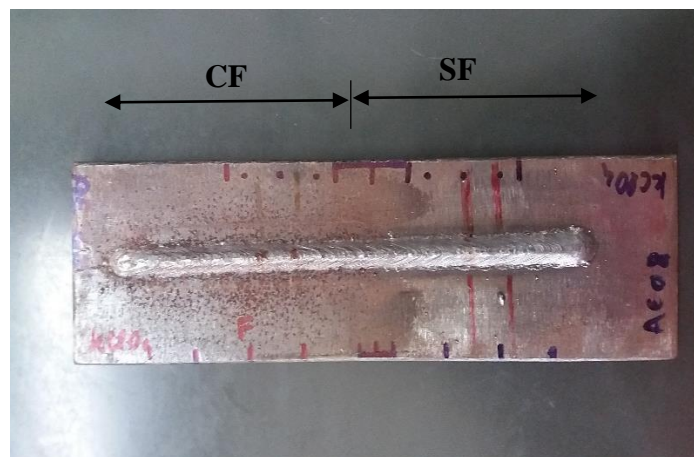
3.1 CARACTERIZACIÓN METALGRÁFICA

El material de estudio para éste trabajo proviene de cordones de soldadura producidos en la tesis de maestría de José Roberto Ferreira en el Programa de Posgrado en Ingeniería Metalúrgica, Materiales y de Minas de la Universidad Federal de Minas Gerais (Brasil), sobre la evaluación de los efectos de nueve compuestos aplicados sobre el metal base, un acero AISI SAE 1020, en el funcionamiento de la soldadura MIG/MAG usando transferencia por corto circuito. Para fines de éste trabajo de grado, se seleccionaron 4 chapas soldadas con la aplicación de CaCO_3 (carbonato de calcio), SiO_2 (dióxido de silicio), Fe_2O_3 (óxido de hierro III) y KClO_4 (perclorato de potasio), las cuales según los resultados de José Roberto Ferreira, mostraron un mayor efecto en la corriente y tensión de soldadura, en la longitud de los cordones, en el tamaño de la sección transversal del cordón de soldadura, y en el factor de corto circuito.

Una vez obtenidas las muestras se realizaron cortes en dirección transversal al cordón de soldadura de las chapas seleccionadas, las cuales tenían una longitud de 170 mm (6,7”), 51 mm (2 “) de ancho y espesor de 9,5 mm (3/8”). Se utilizó una

máquina de corte con líquido refrigerante para evitar el calentamiento de las piezas; la forma en como estas se cortaron se puede observar en la Fig. 1, en donde las marcas rojas sobre la probeta indican dónde se realizaron los cortes para obtener las muestras. Adicionalmente, se cortaron dos probetas más, libres de algún compuesto, provenientes de la zona en la que los cordones fueron fabricados bajo el proceso GMAW convencional. Estas dos probetas fueron identificadas como soldadura sin compuesto 1 y 2, o SF1 y SF2 respectivamente. De esta manera, se trabajaron 6 probetas.

Figura 1. Chapa de acero AISI SAE 1020. CF = Zona con la aplicación del compuesto ($KClO_4$); SF = Zona sin aplicación de compuesto.



Las condiciones de soldadura de todos los cuerpos de prueba seleccionados para éste trabajo fueron las mismas a fin de observar el efecto de la aplicación de cada compuesto sin interferencia de otros factores. Las condiciones fueron las siguientes:

- Voltaje: 24 V
- Tipo de Corriente: DCEP

- Electrodo AWS A5.18 ER70S6 de 1,2 mm de diámetro
- Gas de protección: 18% CO₂ – Ar
- Distancia de la boquilla de contacto a la pieza: 14 mm
- Orientación del electrodo: Perpendicular al plano de la mesa
- Velocidad de alimentación: 4 m/min
- Caudal del gas de protección: 12 L/min

Cabe resaltar que la deposición de las películas fue realizada disolviendo el compuesto de interés en forma de polvo fino con acetona, aprovechando la volatilidad de esta solución y facilitando la aplicación de cada película sobre el metal base. Éste proceso fue realizado por José Roberto Ferreira en su proyecto, y sigue los procedimientos seguidos en otros trabajos implementados en A-TIG.²⁵,

²⁶

Debido al reducido tamaño de las muestras (ver Fig.2) , fue necesario incluir cada una en un molde de resina acrílica fría a fin de facilitar la manipulación de las probetas durante el desbaste y pulido.

²⁵ FERREIRA NETO, Jose Roberto. Estudo do Efeito de Fluxos em Aspectos Operacionais da Soldagem MIG/MAG. Tesis de Maestria. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2017.

²⁶ MODENESI, Paulo José. A Química da Formação do Cordão na Soldagem TIG. Soldagem e Inspeção, vol. 18, nº 3, 2013, pp. 287-300.

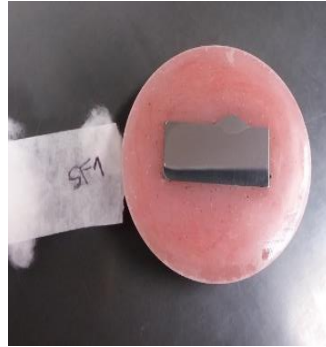
Figura 2. Sección transversal del cordón de soldadura fabricado con A-GMAW y aplicación de SiO₂



La preparación metalográfica de las piezas sigue la norma ASTM E3-01 *Standard guide for preparation of metallographic specimens*. De esta manera, para la caracterización metalográfica se utilizó papel de desbaste número 80, 120, 400, 600, 1000 y 1200. Posteriormente se utilizó alúmina como material abrasivo con granulometrías de 9, 3 y 1 μm para la fase de pulido, en donde se trabajó con paños grueso y fino a fin de obtener una superficie tipo espejo tal y como se observa en la Fig.3. Finalmente las probetas se atacaron químicamente con ácido nítrico al 2% en alcohol etílico (Nital 2%) mediante el método de inmersión durante 5 segundos, para así revelar la microestructura de la zona fundida.

3.1.1. Microscopía Óptica. La identificación de los microconstituyentes se efectuó por medio del microscopio óptico Leitz Metallux II con cámara fotográfica digital acoplada Leica DFC290. Se tomaron distintas micrografías para cada una de las muestras con amplitudes de 100X, 200X, 500X y 1000X, las cuales se visualizaron mediante el software integrado de Leica.

Figura 3. Probeta sin aplicación de compuesto (SF1), luego de la etapa de pulido.



3.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido. Se realizó el análisis morfológico de la zona fundida de tres muestras con un microscopio de electrones QUANTA FEG 650 utilizando un bombardeo de electrones con 25 kV en bajo vacío y con electrones retro dispersados (BSE) para identificar los microconstituyentes en la ZF. Para éste análisis fue necesario sobre atacar las muestras a fin se observar con mayor facilidad las fases presentes; se utilizó Nital 2%. Se tomaron micrografías con aumentos que van desde los 1000X hasta los 16000X en cada una de las probetas examinadas.

Por otro lado, se realizó análisis elemental (EDS) en ciertos puntos de las muestras para corroborar resultados encontrados en MO, respecto a óxidos y observar si la aplicación éstos compuestos había inducido cambios en la composición del metal de soldadura. Las muestras seleccionadas para el análisis mediante ésta técnica fueron SF1, y las muestras de soldadura con aplicación de SiO_2 y CaCO_3 . En éstas últimas fueron identificados pequeños óxidos distribuidos en toda la ZF, además presentaron un valor promedio de microdureza más alto. La muestra SF1 se escogió a fin de comparación.

3.2 MICRODUREZA

Se realizaron medidas de microdureza a las soldaduras sobre la zona fundida para comparar y evaluar si las propiedades mecánicas fueron modificadas por la aplicación de cada compuesto. Las mediciones se realizaron utilizando un microdurómetro MICROHARDNESS TESTER FM-700 de Future-Tech Corp, aplicando una carga de 500 gramos-fuerza durante 10 segundos para cada una de las muestras. Para cada probeta se realizaron 10 indentaciones con dos mediciones en cada punto. La selección de los puntos de medición se realizó de forma aleatoria para así obtener una media general de la microdureza en cada una de las soldaduras y comparar los resultados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

4.1.1. Microscopía Óptica. Se encontraron diversos microconstituyentes en las micrografías de la ZF tomadas para cada probeta, los cuales corresponden a la clasificación dada por IIW (International Institute of Welding) y otros autores^{27, 28}. Entre los principales constituyentes que se pueden observar en la zona fundida de soldaduras de aceros se encuentran la Ferrita Poligonal Intragranular (PF – I), Ferrita de Contorno de Grano (PF – G), Ferrita acicular (AF), Ferrita con Segunda Fase no Alineada (FS – NA), Ferrita de Segunda Fase Alineada (FS – A), Martensita (M), y Agregados de Ferrita – Carburo (FC), además de otras subclasificaciones.^{29, 30, 31}

La transformación que sufre el material durante el proceso de soldadura ocurre bajo condiciones no isotérmicas y depende tanto de la composición química del metal como de la velocidad de enfriamiento³². En la Tabla 2 disponible en los anexos, se presenta la composición química del metal base y la composición del electrodo utilizado para la soldadura³³. La microestructura inicial de las chapas de

²⁷ MODENESI, Paulo José. Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

²⁸ THEWLIS, G. Materials Perspective: Classification and quantification of microstructures in Steels. Materials Science and Technology, vol. 20, nº 2, 2004, pp. 143-160.

²⁹ MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo V; B. SANTOS, Dagoberto. Introdução à Metalurgia da soldagem. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

³⁰ BUENO, Roberto dos Santos. Análise Microestrutural de Junta Soldada de Aço Baixa Liga. Tesis de pregrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

³¹ MACIEL, T; DE ALCANTARA, N y KIMINAMI, C. Variaciones de la Microestructura y Dureza con el tiempo de enfriamiento del metal de soldadura en aceros de alta resistencia y baja aleación. Información Tecnológica, 1997, pp. 89-95.

³² LÓPEZ. M, Edgar; CAMPILLO. I, Bernardo Fabian; GARNICA. G, Pedro; VERGARA.H, Héctor Javier. Efecto del calor aportado por soldadura en un acero microaleado. En: XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM (22-27, septiembre, Hidalgo). 2013. p.701-707.

³³ FERREIRA NETO, Jose Roberto. Estudo do Efeito de Fluxos em Aspectos Operacionais da Soldagem MIG/MAG. Tesis de Maestria. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2017.

metal base concuerda con la del acero AISI SAE 1020. Así pues, se observan zonas claras identificadas como ferrita y zonas oscuras correspondientes a láminas de perlita tal y como se presenta en la micrografía de la Fig. 17 dispuesta en los anexos.

En las muestras evaluadas con y sin aplicación de compuestos se observó la formación de granos columnares como producto del rápido enfriamiento sufrido por el metal, esto se observa en la Fig.18 de los anexos para cada muestra. Dichos granos se forman debido a nucleación heterogénea alrededor de inclusiones presentes en el baño de soldadura, por efecto de los bordes de grano de austenita o a partir del límite de la ZF – ZAC (Zona afectada por el calor), el cual actuaría como una pared imaginaria que separa el metal líquido del sólido.

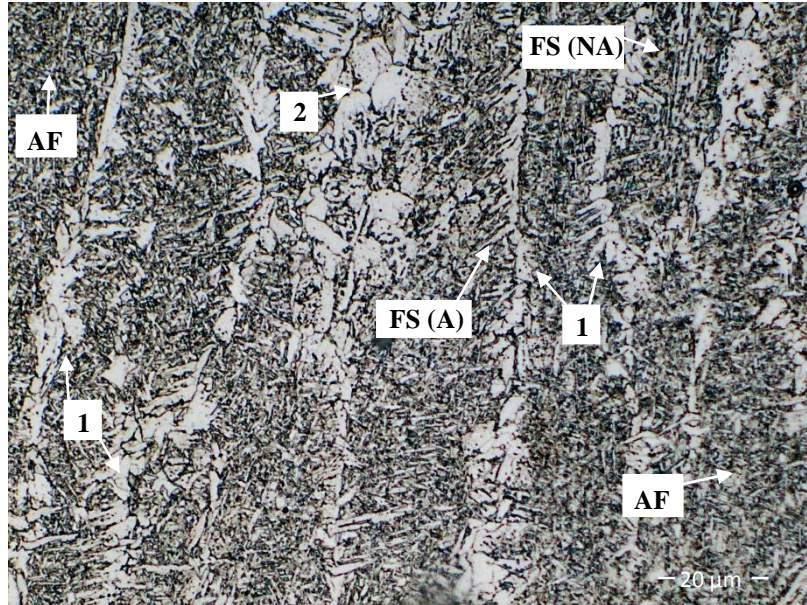
La distribución de las fases depende de la composición química del baño de fusión y de su forma. En éste caso la forma del baño es diferente en cada uno de los cordones de soldadura producidos con la aplicación de compuestos. Lo anterior se ha verificado en diferentes investigaciones en las que se concluye que los cordones fabricados con A-TIG y A-GMAW, presentan cordones un poco más estrechos y profundos como consecuencia de la inversión del flujo de metal (pasando a ser de afuera hacia adentro); esto es explicado por el efecto Marangoni en el charco metálico^{34, 35, 36}. Esto influye además en el direccionamiento del crecimiento de los granos durante el enfriamiento del metal, determinando así qué tan distorsionada se vuelve la microestructura durante la solidificación y qué microconstituyentes se podrían formar.

³⁴ HUANG, Her - Yueh. Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding. *Materials and Design*, 31 (5), 2010, pp. 2488-2495.

³⁵ WANG, Xinxin; HUANG, Jiankang; HUANG, Yong; FAN, Ding; GUO, Yanning. Investigation of heat transfer and fluid flow in activating TIG welding by numerical modeling. *Applied Thermal Engineering*. Noviembre, 2016. Vol. 113, pp. 27-35.

³⁶ MADURAIMUTHU, Velu; VASUDEVAN, M; MUTHUPANDI, V; BHADURI, A Y JAYAKUMAR, J. Effect of Activated Flux on the Microstructure, Mechanical Properties, and Residual Stresses of Modified 9Cr-1Mo Steel Weld Joints. *Metallurgical and Materials Transactions B*. Febrero 2012. Vol. 43B, pp. 123-132.

Figura 4. Micrografía del acero AISI SAE 1020 libre, aumento: 500X. Muestra SF1.
En donde 1) PF - G y 2) PF - I



Para el caso de las soldaduras fabricadas con el proceso convencional, en las Fig. 4, 5 y 19 (Fig. 19 en los anexos) se observa la formación de vetas de ferrita de contorno de grano (PF – G) en la estructura de granos columnares de austenita (A) previamente presentes. Asimismo se identifica la presencia de (PF – I), formada en el interior de los granos de austenita transformados. Se observan además regiones de ferrita con segunda fase alineada (FS – A) creciendo a partir PF – G y regiones de ferrita con segunda fase no alineada (FS – NA). Por su parte, se identifica ferrita acicular (AF) principalmente en la Fig. 5, caracterizada por pequeños granos de ferrita de forma lenticular y orientada al azar. Éste último microconstituyente es la fase matriz de la microestructura en la ZF.

Figura 5. Micrografía del acero AISI SAE 1020 libre, aumento: 1000X. Muestra SF1

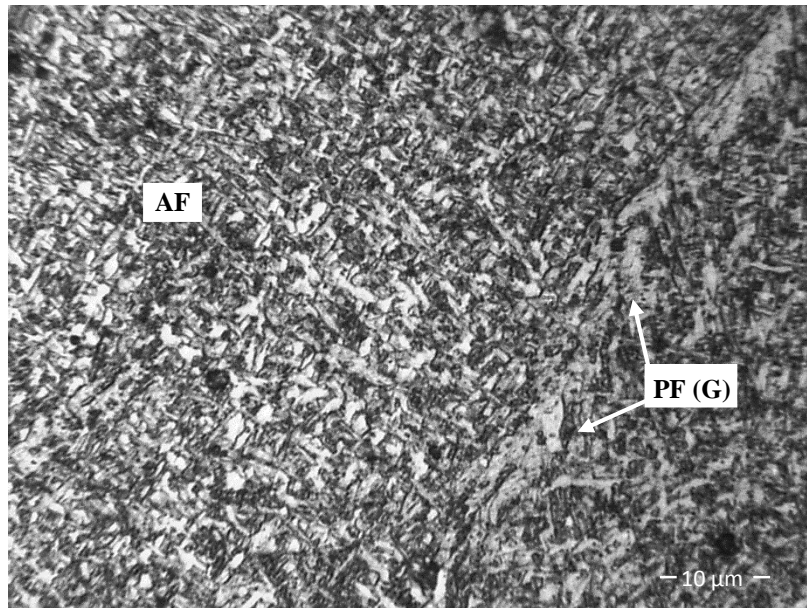


Figura 6. Micrografías del acero AISI SAE 1020 con aplicación de SiO₂ con 1000X de aumento. En a) se identifican FS – NA), AF y PF – G, y en b) se observan además PF – I y FS – A.

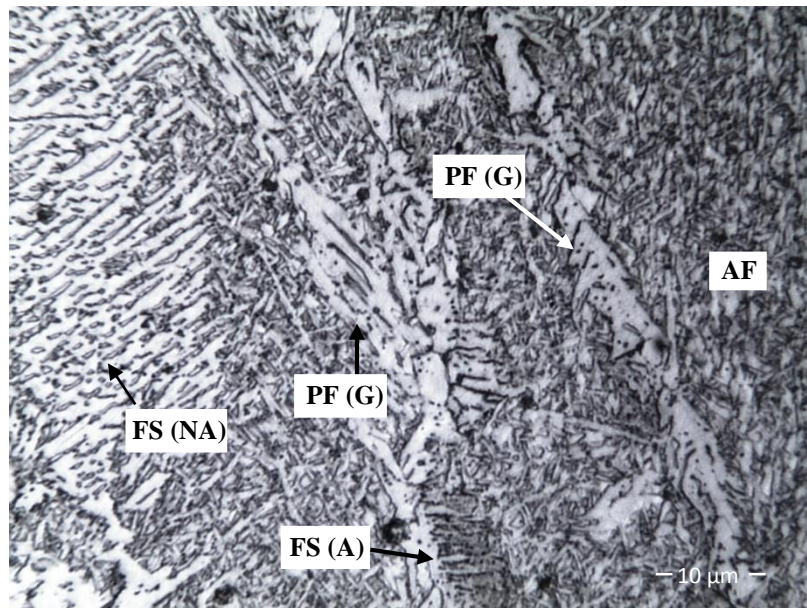
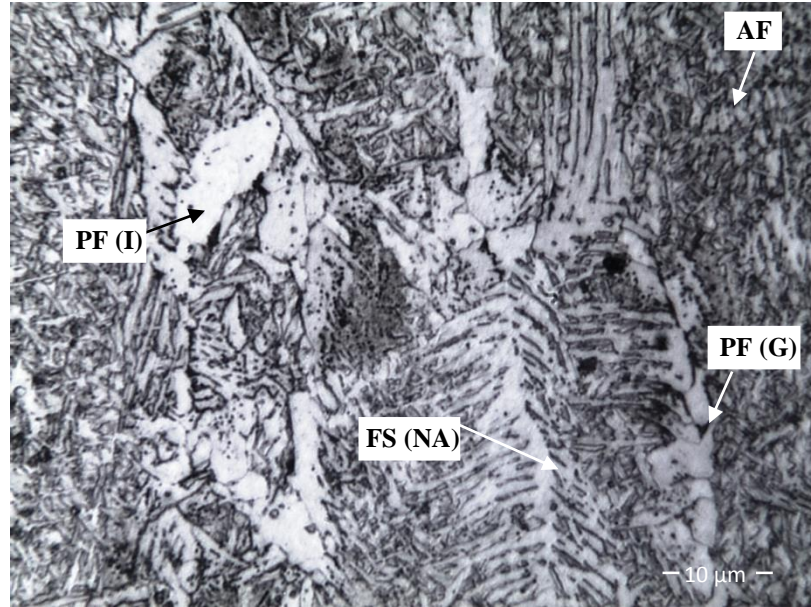


Figura 6. Continúa...

a)



b)

En las Fig.20.a, 20.b (disponible en los anexos) y Fig.6.a y 6.b se identifica la presencia de los microconstituyentes AF, FS – A, FS – NA y PF – G, siendo los microconstituyentes más comunes presentados en la estructura del cordón fabricado con aplicación de una capa de SiO₂ al metal base. Además se observó, aunque con dificultad, la presencia de granos de PF – I. Por otro lado, no se identificó la formación de Martensita o del constituyente de Austenita-Martensita (AM). También, al igual que en la muestra sin compuesto, la matriz corresponde a AF. En comparación con lo observado en la microestructura de las muestras SF1 y SF2, los microconstituyentes FS – NA y FS – A se presentan con mayor frecuencia en éste caso. Asimismo, en las Fig. 20 y 6 se observa la presencia de pequeñas inclusiones que por su forma se intuye que son óxidos.

Por otro lado, en las Fig. 7 y 8 se observa el efecto de la aplicación de KClO_4 en la microestructura de la ZF. Se identificaron los microconstituyentes PF – G, FS – A, FS – NA y AF, mientras que la fase PF – I aunque se observó, no se identificaba con facilidad. Asimismo, en la Fig. 8 se puede identificar que la matriz corresponde a la fase AF al igual que en la microestructura sin los compuestos utilizados. Por otra parte, a diferencia de lo observado en SF1 y SF2, se observa la presencia de óxidos distribuidos ampliamente en la ZF.

Figura 7. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de KClO_4 , aumento: 500X.

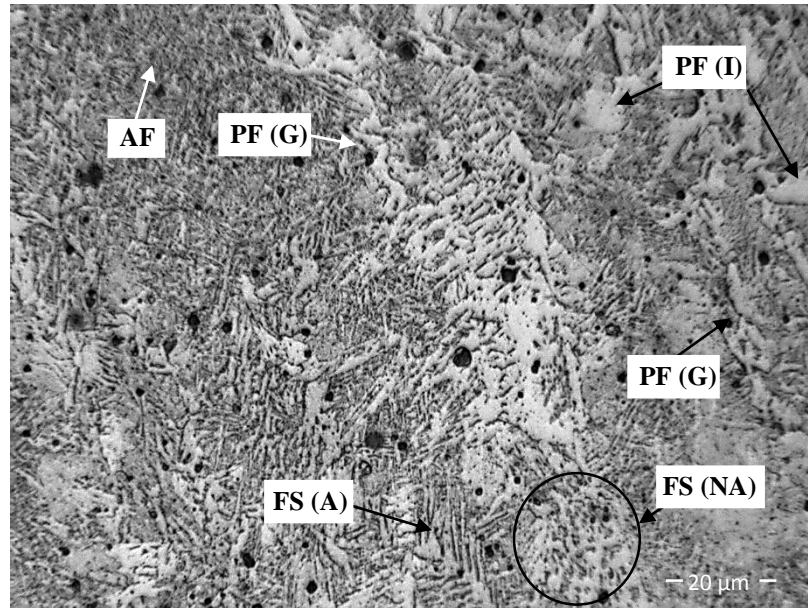
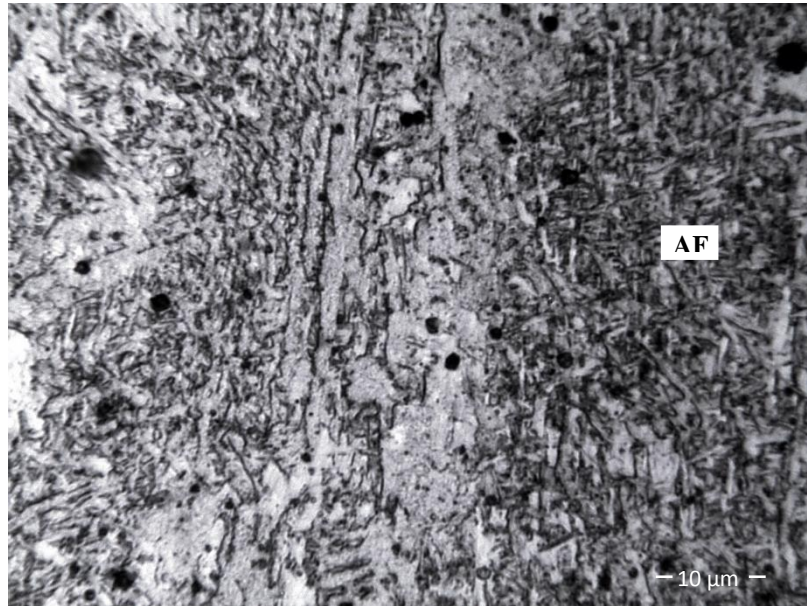


Figura 8. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de KClO_4 , aumento: 1000X.



En el caso de la muestra de acero con la aplicación de CaCO_3 se visualizan también pequeñas inclusiones distribuidas homogéneamente en la microestructura del metal de soldadura pero en mayor cantidad a comparación de las demás muestras de soldadura fabricadas con A-GMAW. En las Fig. 9 y 10 se observa principalmente la presencia de FS – A creciendo a partir de FP – G con placas muy finas de ferrita que se asemejan a Ferrita Widmanstätten. También, se identifica la formación de pequeños granos de PF – I ubicados dentro de los granos columnares formados (Fig.10). Por otra parte, se evidencia una matriz de AF al igual que en la microestructura observada en la ZF de SF1 y SF2.

Finalmente, las Fig. 11 y 12 muestran la microestructura de la ZF de las probetas fabricadas con la aplicación de Fe_2O_3 previo a la soldadura. La presencia de PF – G es evidente en estas micrografías con la formación del constituyente a lo largo de los contornos de grano existentes previamente, a partir de los cuales se observan además placas de FS – A y el microconstituyente FS – NA. Igualmente,

se presenta la formación de AF como matriz de la microestructura del metal fundido. La presencia de óxidos también se percibe para las soldaduras fabricadas con aplicación de éste compuesto.

Figura 9. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de CaCO_3 , aumento: 500X.

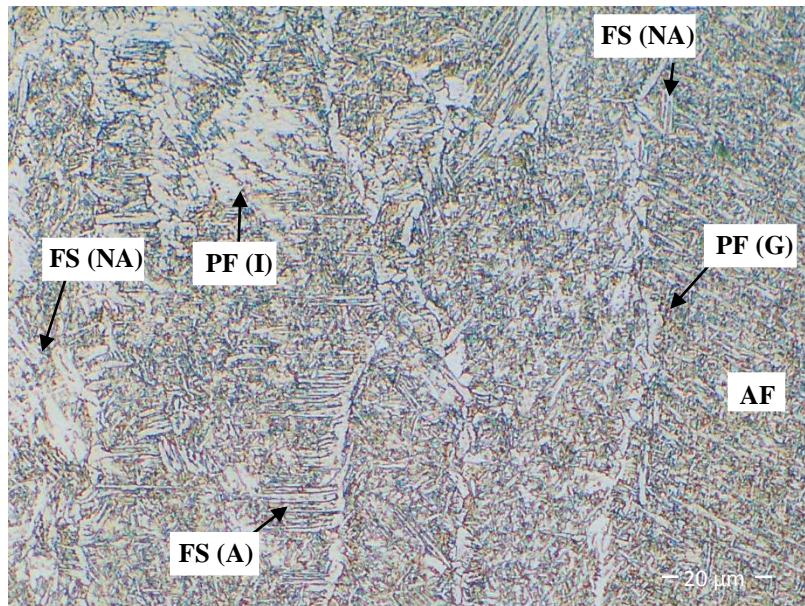


Figura 10. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de CaCO_3 , aumento: 1000X

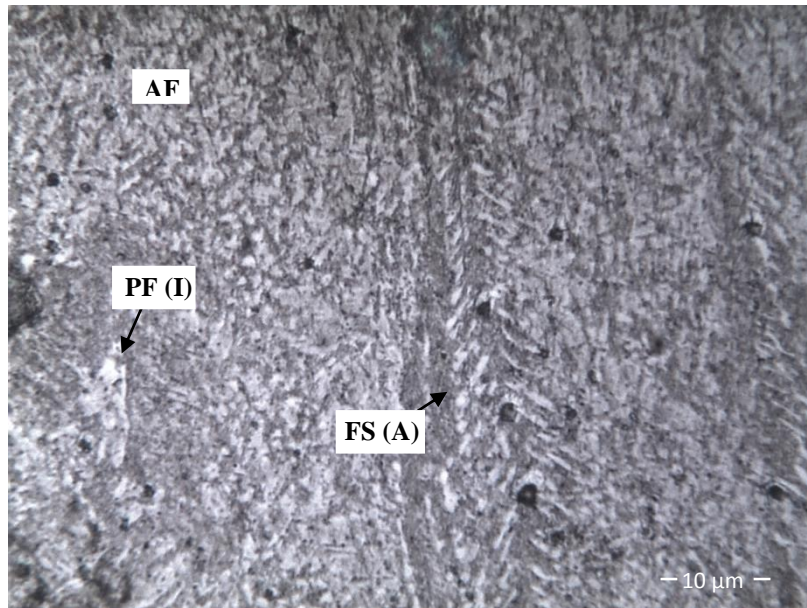


Figura 11. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de Fe_2O_3 , aumento: 500X. En donde 1) PF – G.

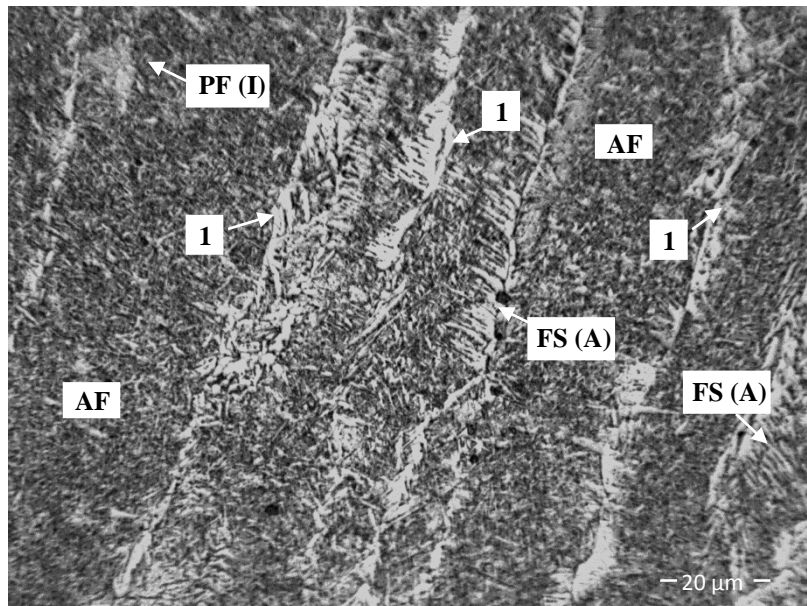
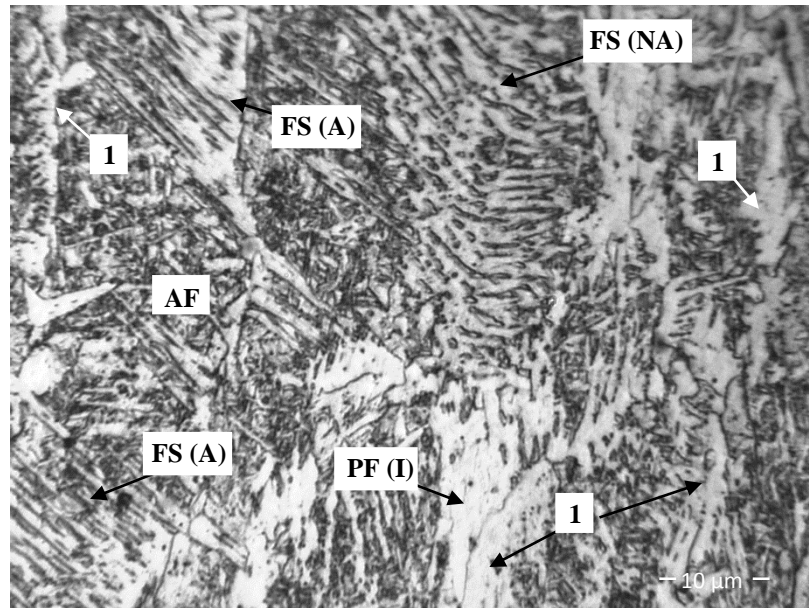


Figura 12. Micrografía del acero AISI SAE 1020 con aplicación de Fe_2O_3 , aumento: 1000X. En donde 1) PF – G.



De ésta manera, a partir de lo observado en las micrografías anteriores, los microconstituyentes presentes en cada una de las soldaduras realizadas con la aplicación de CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 y KClO_4 sobre la superficie del metal base, corresponden a los mismos encontrados en la microestructura de las soldaduras sin aplicación de compuesto, SF1 y SF2.

En ese sentido, se observó la fase PF – G en todas las muestras, la cual se forma entre 800°C y 850°C de temperatura, siendo una de las primeras en formarse durante la transformación de la austenita. Como se describió anteriormente, ésta fase se caracteriza por crecer a lo largo de los contornos de grano, razón por la cual su aparición representa una desventaja en soldaduras que requieran buena resistencia a la fractura³⁷. Otro microconstituyente encontrado en todas las

³⁷ MACIEL, T; DE ALCANTARA, N., & KIMINAMI, C. Variaciones de la Microestructura y Dureza con el tiempo de enfriamiento del metal de soldadura en aceros de alta resistencia y baja aleación. Información Tecnológica, 1997, pp. 89-95.

muestras aunque con menos frecuencia, fue la PF – I con granos no equiaxiales que se forman en el mismo rango de temperaturas que la PF – G y con bajas velocidades de enfriamiento. A partir de la PF – G se observó además el microconstituyente FS – A, formado por el mecanismo de cizallamiento durante la transformación de la austenita. Según su apariencia, ésta fase posee una subclasificación dada por IIW, pasando a ser FS – SP cuando su apariencia es similar a la de Ferrita Widmanstätten, FS – UP y FS – LB cuando se asemeja a Bainita superior o Bainita inferior respectivamente³⁸. En el caso de las micrografías evaluadas se observó la presencia de FS – A con finas agujas laterales de ferrita, es decir FS – SP en cada una de las micrografías tomadas. Dicha microestructura es característica de contenidos de carbono inferiores al 0,4% y bajas velocidades de enfriamiento a comparación de FS – UP y FS – LB; debido a su morfología de agujas éste microconstituyente es riesgoso si se presenta en soldaduras que requieran buena tenacidad³⁹. Por otro lado, se observó el microconstituyente FS – NA en todas las microestructuras siendo menos visible su formación en las soldaduras con aplicación de CaCO₃ y KClO₄. Ésta fase se presenta como granos de ferrita con granos de ferrita acicular o pequeñas láminas de cementita en su interior, constituyendo una forma poco común de Bainita^{40, 41}. Ésta pudo haber sido sustituida por más zonas con AF para el caso de CaCO₃, lo cual podría deberse a leves incrementos en la velocidad de enfriamiento.

Por otro lado, la presencia de AF se identificó como la mayor fase formada en cada muestra evaluada. Ésta fase se forma a bajas temperaturas (500°C – 560°C) y tal como se observó en las micrografías, presenta una microestructura de pequeños granos de ferrita con forma lenticular desalineados y situados al interior

³⁸ THEWLIS, G. Materials Perspective: Classification and quantification of microstructures in Steels. Materials Science and Technology, vol. 20, nº 2, 2004, pp. 143-160.

³⁹ MODENESI, Paulo José. Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

⁴⁰ THEWLIS, G. Materials Perspective: Classification and quantification of microstructures in Steels. Op. Cit., pp.143-160.

⁴¹ MODENESI, Paulo José. Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Op. Cit.

de los granos de austenita⁴². Su formación es causada por la nucleación heterogénea en sitios con irregularidades, inclusiones o imperfecciones en el grano de austenita. A diferencia de los demás constituyentes encontrados, ésta fase concedería al metal de soldadura buena tenacidad y límite de fluencia.⁴³

Por otra parte, no se observó la formación de martensita (M), agregados de ferrita – carburo (FC) o del microconstituyente Austenita – Martensita (AM), los cuales no corresponderían a lo que se podrían encontrar en la ZF de un acero de bajo carbono como el AISI SAE 1020. La formación de dichas fases requeriría un mayor contenido de carbono en el acero, así como altas velocidades de enfriamiento o presencia de elementos aleantes⁴⁴. Por otro lado, de acuerdo con las imágenes presentadas se puede decir que los cordones fabricados con A-GMAW tienden a presentar aún más las fases FS – A y FS – NA en comparación con las micrografías observadas para los cordones fabricados con GMAW, mientras que la PF – G es bastante común en todas las muestras.

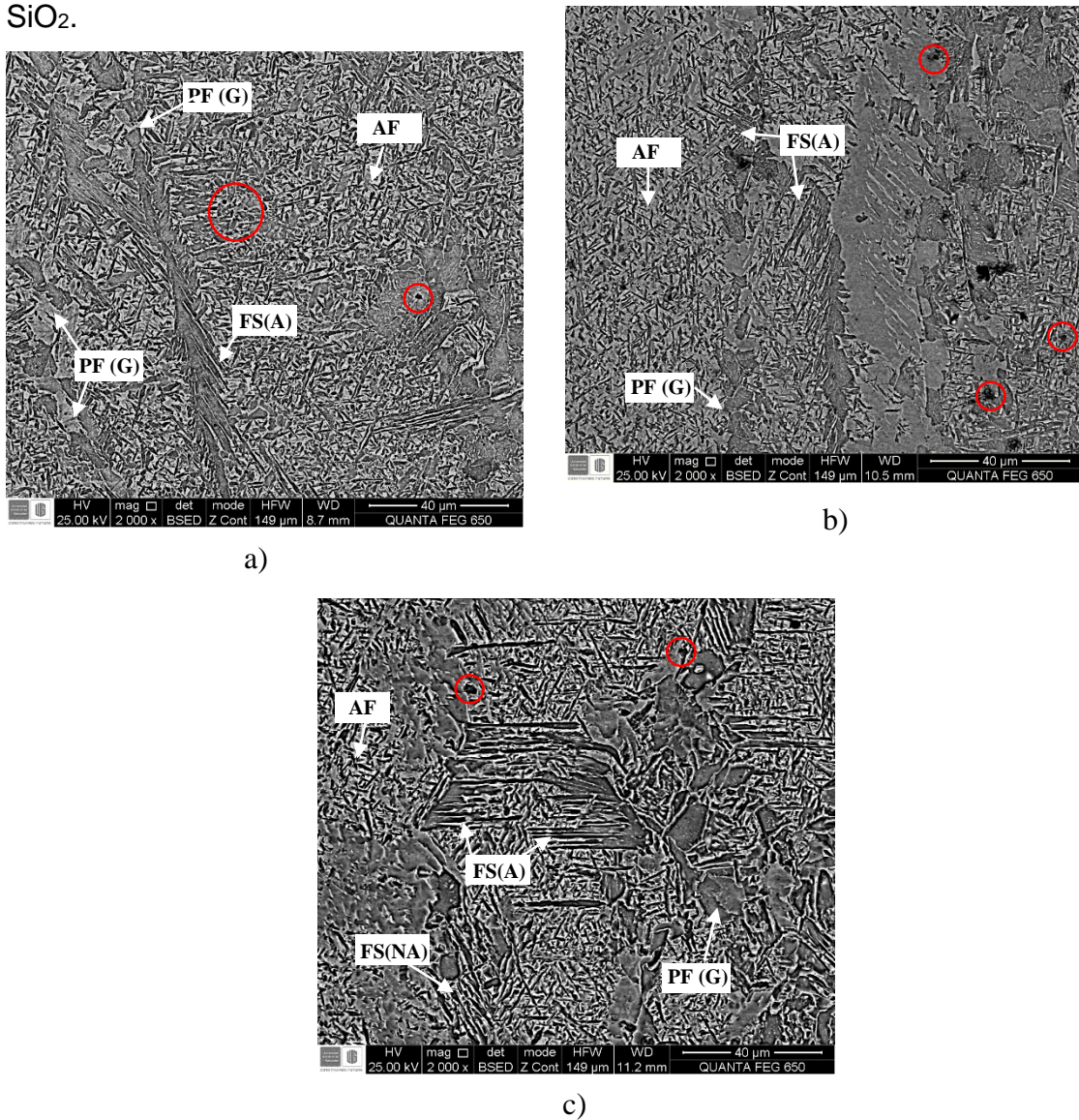
4.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido – Espectroscopía de dispersión de Rayos X. A partir de las microestructuras evaluadas con el Microscopio óptico, se seleccionaron las muestras SF1 y las muestras con aplicación de CaCO₃ y SiO₂. Los resultados obtenidos con ésta técnica corroboraron lo encontrado en las micrografías de éstas muestras, verificándose la formación de cada uno de los microconstituyentes mencionados para cada probeta en donde la fase AF constituye la matriz de la estructura de la ZF.

⁴² *Ibíd.*

⁴³ MACIEL, T; DE ALCANTARA, N y KIMINAMI, C. Variaciones de la Microestructura y Dureza con el tiempo de enfriamiento del metal de soldadura en aceros de alta resistencia y baja aleación. Información Tecnológica, 1997, pp. 89-95.

⁴⁴ VIEIRA DE ARAÚJO, Marcia Regina. Caracterização Microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural. Tesis de Maestría em Ingeniería Mecánica. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

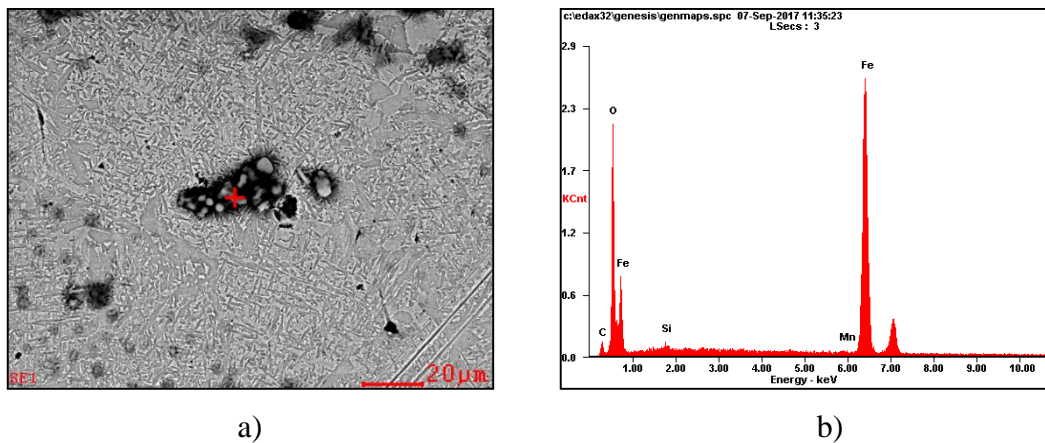
Figura 13. Micrografías obtenidas por medio de SEM en a) SF1, b) CaCO₃ y c) SiO₂.



De ésta manera tal y como se muestra en la Fig. 13 se observaron láminas finas de FS – A de tipo (FS – SP), collares de PF – G delimitando los granos de austenita previos, así como la fase FS – NA. Por otro lado, se corroboró mediante SEM la presencia de pequeños óxidos en las muestras con SiO₂ y CaCO₃, los cuales también fueron observados en las micrografías con MO. Por otra parte, como se observa en la Fig.13a se identificaron también pequeños óxidos

distribuidos en la muestra SF1, aunque a diferencia de los observados en las micrografías para CaCO_3 y SiO_2 éstos se ven de menor tamaño y en menor cantidad. Dichos óxidos están encerrados en rojo en las micrografías presentadas para cada muestra en la Fig. 13.

Figura 14. a) Micrografía SEM de la muestra SF1 con un aumento de 4000X. b) Espectro EDS de la muestra SF1 en el punto señalado en la Fig. 14a.



Adicionalmente, en la Fig. 14 se observa a mayores aumentos uno de los óxidos presentes en la microestructura de la ZF de la muestra SF1. Según los resultados de EDS dispuestos en la Fig. 14b, se observa que la composición química en el punto señalado sugiere que ésta inclusión correspondería a óxido de hierro. (En la Tabla 3 dispuesta en los anexos se presentan los valores de composición del espectro de la Fig.14b).

El control de factores operativos como la corriente, el voltaje, el tipo de gas de protección, la velocidad de desplazamiento, junto con el ciclo térmico del proceso determinan el tipo de microestructuras que se obtendrán tanto en la ZF como en la ZAC. Como se ha dicho anteriormente, estas microestructuras sufren contracciones en condiciones no isotérmicas y su formación se ve afectada por la

presencia de inclusiones y la orientación de los granos de austenita en el enfriamiento⁴⁵.

En ese sentido, la formación de estas inclusiones de óxidos se debe principalmente a las altas temperaturas del proceso, que además de producir transformaciones morfológicas y cambios de volumen, generan reacciones químicas entre los elementos dispuestos en el baño metálico y el gas de protección o entre el metal de soldadura y la escoria⁴⁶. Por otro lado, en la zona de almacenamiento del metal base se debería asegurar el aislamiento a la humedad para así evitar la oxidación del material, considerando que los óxidos fueron identificados tanto en las muestras sin aplicación de compuestos como en las fabricadas con la aplicación de éstos.

Por otro lado, la Fig. 21a (disponible en los anexos) muestra la señalización de distintas fases en la micrografía de la muestra SF1. El punto rojo se ubica sobre AF, el verde sobre granos de PF – G y el amarillo sobre la fase FS – A. Como se puede observar en los espectros presentados, la composición química de las fases muestra que la fase FS – A, contendría mayor concentración de C en comparación con los demás microconstituyentes evaluados en dichos puntos, razón por la cual, cualitativamente hablando, ésta fase tendría una mayor dureza respecto a las otras. Otros elementos como Si y Mn, permanecen con valores muy similares entre los tres microconstituyentes. (En la Tabla 4 se presentan los valores de composición en cada uno de los puntos señalados).

En la Fig. 15 se observa una micrografía de uno de los precipitados encontrados en la ZF de la muestra de soldadura con CaCO_3 . Como se puede observar en la Fig. 15b, fue en ésta muestra donde la presencia de éstos precipitados fue más visible. Éstos se intuyen como óxidos según el espectro mostrado en la Fig. 15b

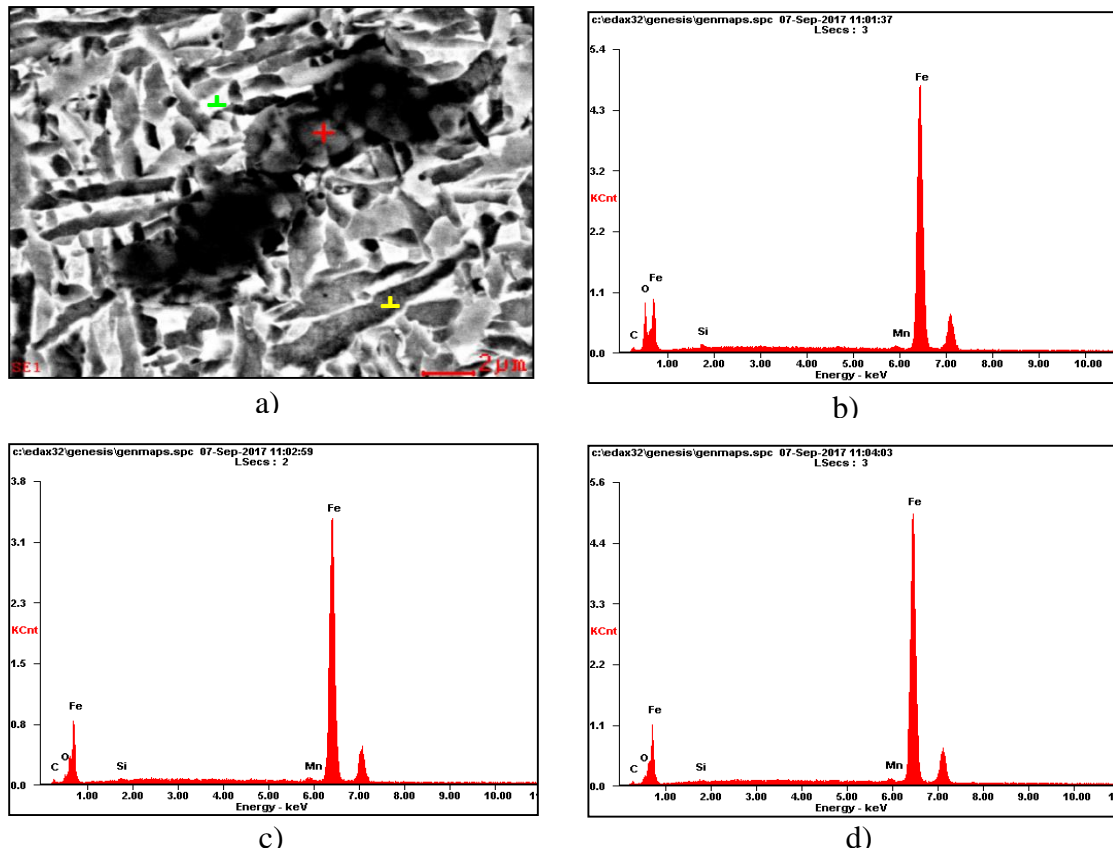
⁴⁵ COMMITTEE ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, Welding, Brazing, and Soldering. ASM INTERNATIONAL, 1993.

⁴⁶ *Ibíd.*

para el punto rojo, en el cual hay mayor cantidad de oxígeno y hierro (En la Tabla 5 se presentan los valores de composición en cada uno de los puntos señalados). Según los resultados de EDS, en la composición química para cada uno de los puntos señalados en la Fig. 15a no se identificaron elementos distintos a los encontrados en la muestra SF1.

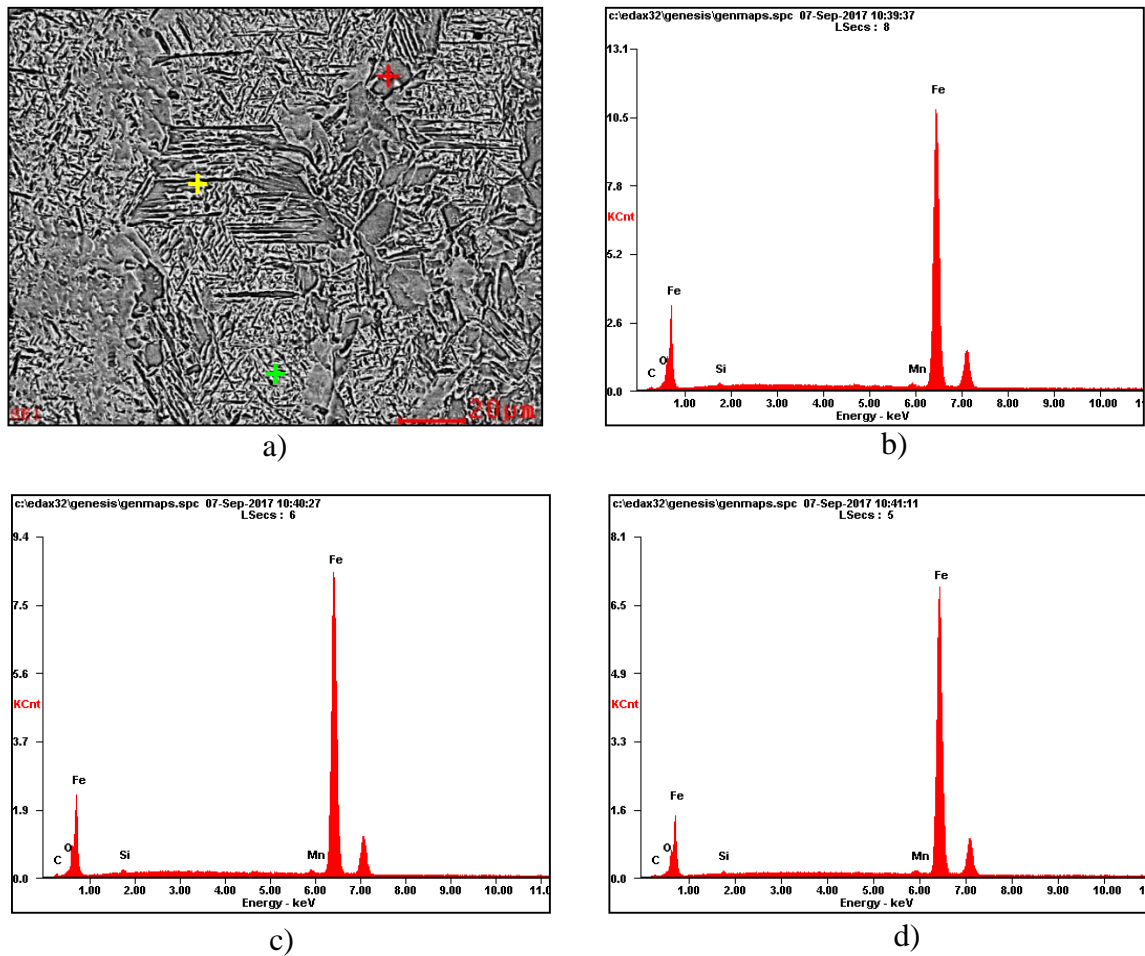
Por lo tanto, la mayor concentración de oxígeno en el punto rojo indicaría la presencia de óxido de hierro. Por otro lado en el caso de estas probetas, la mayor cantidad de óxidos observados podría favorecer la formación de AF, proveyendo más sitios de nucleación para ésta fase. Por su parte, en la Fig. 21 se observan los resultados obtenidos para la muestra con aplicación de SiO₂.

Figura 15. a) Micrografía SEM de la muestra CaCO₃. b) Espectro EDS de la muestra de soldadura con CaCO₃ en b) el punto rojo, c) el punto verde, d) el punto amarillo señalado en la Fig. 15a.



Al igual que en la muestra con CaCO_3 , no se detectó la presencia de elementos distintos a los encontrados para la muestra fabricada con el proceso convencional. Tampoco se observó un incremento en la cantidad del elemento Si en ninguno de los puntos señalados en la Fig. 16a en comparación a los valores detectados en la muestra SF1. (Los resultados de composición química para cada punto se presentan en la Tabla 6 disponible en los anexos).

Figura 16. a) Micrografía SEM de la muestra SiO_2 con 2000X de aumento. b) Espectro EDS de la muestra de soldadura con SiO_2 en b) el punto rojo, c) el punto verde, d) el punto amarillo señalado en la Fig. 16a.



Lo anterior significa que la aplicación de películas de compuestos activos como los utilizados, no altera la composición química del metal de soldadura por lo que las fases formadas no están favorecidas o influenciadas por la presencia de los compuestos aplicados al metal base. De ésta manera, no se añaden nuevos elementos al metal, por lo tanto las transformaciones sufridas durante la soldadura dependen de las variables operacionales utilizadas y del ciclo térmico del proceso.⁴⁷

4.2 EFECTO EN LA MICRODUREZA DE LA ZONA FUNDIDA

De acuerdo a los resultados obtenidos para cada probeta (Ver Tablas 7– 12 en anexos), se observa que los valores de microdureza de los cordones de soldadura fabricados con A-GMAW no presentan diferencias significativas en relación a los datos obtenidos para las soldaduras fabricadas con el proceso convencional. Cabe resaltar que la mayor variación se observa en los resultados obtenidos con los compuestos de SiO_2 y CaCO_3 respecto a las durezas medidas en la muestra SF1, tal y como se presenta en la Tabla 1. No obstante, considerando que el valor promedio para la segunda probeta sin compuestos aplicados (SF2), presentó un valor más elevado con respecto a SF1, se podría decir que las microdurezas registradas para las demás probetas fueron muy similares a los obtenidos en las muestras fabricadas bajo el proceso GMAW.

⁴⁷ ALMENARA, Minerva Dorta; VIDAL, Jorge; MATEO, Antonio; FARGAS, Gemma y CAMEJO, Franklin. Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldaduras a tope de un Acero Inoxidable Dúplex 2205. DYNA, 2011, pp. 206-215.

Tabla 1. Microdureza promedio de la ZF (HV) de todas las muestras.

Tipo de Compuesto	Microdureza promedio (HV)	Desviación estándar
SF 1	233	5
SF 2	248	11
SiO ₂	255	19
KClO ₄	228	8
CaCO ₃	258	15
Fe ₂ O ₃	250	9

De ésta manera, las variaciones encontradas para estas mediciones se deben a que todas las muestras de soldadura presentaban varios microconstituyentes con distintas características entre sí. Por otro lado, se presume que la presencia de los óxidos influenció en las mediciones, no siendo determinante para establecer si una muestra tuvo mayor dureza que otra, considerando la aleatoriedad de las mediciones. Razón por la cual la muestra de KClO₄ tendría menor HV a pesar de que también se observaron óxidos en sus micrografías. Por lo anterior, la forma en la que se realizó el ensayo conllevó a que los valores de microdureza fueran más distantes de un punto de medida a otro.

5. CONCLUSIONES

El efecto causado por la aplicación de los compuestos CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 y KClO_4 no representó diferencias significativas en la microestructura de la ZF con respecto a lo encontrado en las muestras SF1 y SF2.

El efecto de la aplicación de CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 y KClO_4 sobre la microdureza en ZF de las muestras evaluadas fue mínimo, considerando la desviación estándar de los datos tomados.

Debido a que los microconstituyentes encontrados en todas las muestras fueron los mismos, no habría cambios significativos en las propiedades mecánicas de los cordones fabricados con A-GMAW respecto a los obtenidos con el proceso convencional. No obstante, si hubiera habido cambios, la formación del microconstituyente AF sería la idónea para aplicaciones que requieran mejores propiedades mecánicas de resistencia y tenacidad. Por otra parte, la presencia de óxidos encontrados en todas las muestras es desfavorable para la soldadura ya que actúan como concentradores de esfuerzos, pudiendo favorecer la fractura frágil del cordón de soldadura.

Por consiguiente, la microdureza y la microestructura en la ZF de soldaduras fabricadas con A-GMAW bajo las condiciones de operación en las que fueron obtenidas éstas muestras, no son grandemente afectadas por la aplicación de los compuestos activos aplicados.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un análisis cuantitativo de los microconstituyentes para establecer el porcentaje en el que cada uno se formó teniendo en cuenta las mismas condiciones de operación y preparación en la fabricación de las soldaduras.

Se recomienda evaluar la microestructura de la ZF y microdureza en soldaduras fabricadas con la aplicación de los mismos compuestos pero con diferentes parámetros de operación, por ejemplo bajo otro mecanismo de transferencia, para así verificar su efecto bajo otras condiciones de trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

AHMADI, Ehsan y EBRAHIMI, Alireza. 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, 2012, pp. 55-62.

ALMENARA, Minerva Dorta, *et al.* Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldaduras a tope de un Acero Inoxidable Dúplex 2205. *DYNA*, 2011, pp. 206-215.

BUENO, Roberto dos Santos. Análise Microestrutural de Junta Soldada de Aço Baixa Liga. Tesis de pregrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

COMMITTEE ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, Welding, Brazing, and Soldering. ASM INTERNATIONAL, 1993.

ESAB, Apostila de Soldagem MIG/MAG. [En Línea] ESAB BRASIL, 2005.

FERREIRA NETO, José Roberto. Estudo do Efeito de Fluxos em Aspectos Operacionais da Soldagem MIG/MAG. Tesis de Maestria. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2017.

HUANG, Her - Yueh. Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding. *Materials and Design*, 31 (5), 2010, pp. 2488-2495.

HUANG, Her - Yueh. Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments. *Materials and Design*, 31 (7), pp. 2404 - 2409.

KAH, Paul; SUORANTA, Ramio y MARTIKAINEN, Jukka. Advanced gas metal arc welding processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, pp. 655 - 674.

LINCOLN ELECTRIC. Soldadura Semiautomática con Gas de Protección (MIG - MAG). Departamento de Formación Lincoln-KD, S.A, 2005.

LÓPEZ. M, Edgar; CAMPILLO. I, Bernardo Fabian; GARNICA. G, Pedro; VERGARA.H, Héctor Javier. Efecto del calor aportado por soldadura en un acero microaleado. En: XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM (22-27, septiembre, Hidalgo). 2013. p.701-707.

MACIEL, T; DE ALCANTARA, N y KIMINAMI, C. Variaciones de la Microestructura y Dureza con el tiempo de enfriamiento del metal de soldadura en aceros de alta resistencia y baja aleación. Información Tecnológica, 1997, pp. 89-95.

MADURAIMUTHU, Velu, et al. Effect of activated flux on the microstructure, mechanical properties, and residual stresses of modified 9Cr-1Mo steel weld joints. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, vol. 43, no 1, p. 123-132.

MODENESI, Paulo José. A Química da Formação do Cordão na Soldagem TIG. Soldagem e Inspeção, vol. 18, nº 3, 2013, pp. 287-300.

MODENESI, Paulo José. Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

MODENESI, Paulo José; APOLINÁRIO, Eustáquio R y PEREIRA, Iaci M. TIG welding with single-component fluxes. Journal of Materials Processing Technology, vol. 99, nº 1-3, 2000, pp. 260-265.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo V; B. SANTOS, Dagoberto. Introdução à Metalurgia da soldagem. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

NAYEE, Sanjay G y BADHEKA, Vishvesh J. Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of Dissimilar Activating Flux Assisted-Tungsten Inert Gas Welds. Journal of Manufacturing Processes, vol. 16, nº 1, 2014, pp. 137-143.

OLIVA M, Carlos. Capítulo 5: Procesos de Soldadura. Inspector de Soldadura AWS QC1:2007. Instituto Chileno de Soldadura, 2007, pp. 125 - 136.

OZCELIK, S; MOORE, K y NAIDU, Desineni Subbaram. Chapter 2 – Gas Metal Arc Welding: Modeling de Welding Handbook, Elsevier Ltd., 2003, pp. 9 - 93. eBook ISBN: 9780080536620

PIRES, J. Norberto; LOUREIRO, Altino y BÖLMSJO, Gunnar. Welding Robots Technology System Issues and Applications. Chapter 2: Welding Technology. Springer Science & Business Media, 2006, pp. 27 - 71.

RAMKUMAR, K. Devendranath, *et al.* 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, 2015, vol. 20, pp. 54-59.

RUAN, Y., *et al.* Mechanical properties and microstructures of 6082-T6 joint welded by twin wire metal inert gas arc welding with the SiO₂ flux. Materials & Design, 2012, vol. 35, p. 20-24.

SNOW, Heather. M. Investigation of 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.

THEWLIS, G. Materials Perspective: Classification and quantification of microstructures in Steels. Materials Science and Technology, vol. 20, nº 2, 2004, pp. 143-160.

VARBAI, Balázs; KOMOS, Rita y MÁJLINGER, Kornél. Effects of Active Fluxes in Gas Metal Arc Welding. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, vol. 61, nº 1, 2016, pp. 68-73.

VIEIRA DE ARAÚJO, Marcia Regina. Caracterização Microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural. Tesis de Maestría em Ingeniería Mecánica. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

WANG, Xinxin, et al. Investigation of heat transfer and fluid flow in activating TIG welding by numerical modeling. Applied Thermal Engineering, 2017, vol. 113, p. 27-35.

ZHANG, Z.D y CAO, Q.J. Study on Metal Transfer behaviour in Metal Inert Gas Arc Welding with Activating Flux for Magnesium Alloy. Science and Technology of Welding & Joining, vol. 17, nº 7, 2012, pp. 550 - 555.

ANEXOS

ANEXO A. INFORMACIÓN COMPLETA DEL MUESTREO

Composición del electrodo AWS A5.18 ER70S6 y del Acero AISI SAE 1020, empleados en la fabricación los cordones de soldadura.

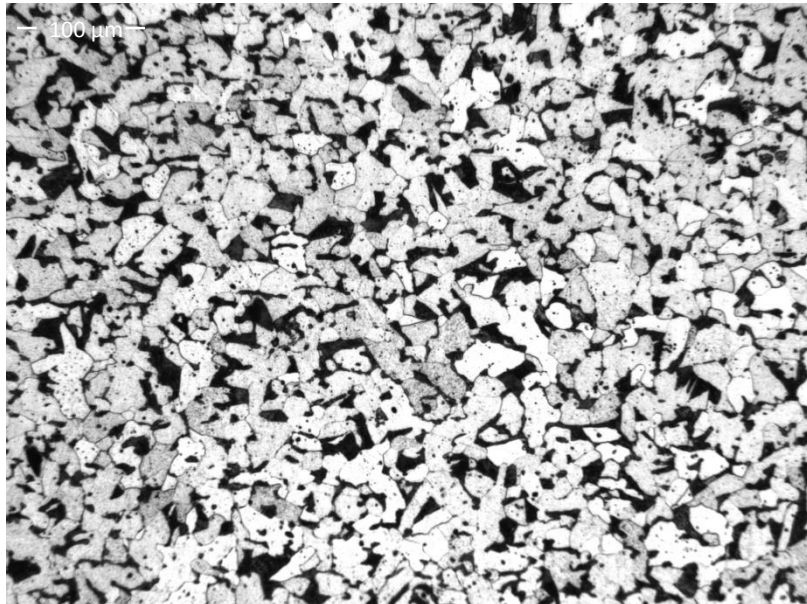
Composición del alambre - electrodo AWS A5.18 ER70S6

%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
0,086	1,57	0,86	0,012	0,014	0,016	0,019	0,006	0,018

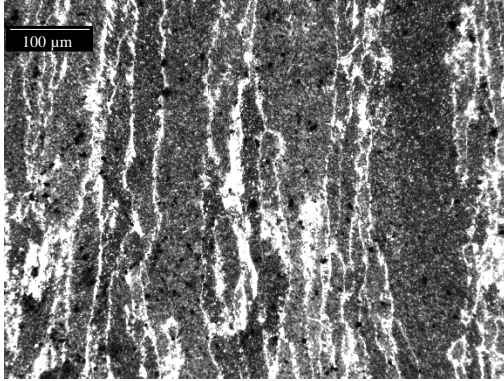
Composición del acero AISI SAE 1020

%C	%Mn	%P	%S	%Si
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,04	0,05	0,15 – 0,30

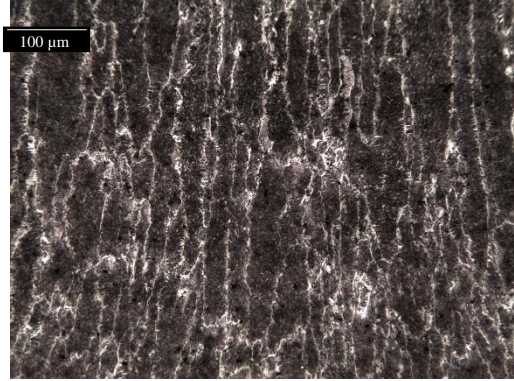
Micrografía del metal base utilizado, un acero AISI SAE 1020. Aumento: 200X



Micrografías de la ZF de las muestras a) SF1, b) SF2, y las muestras con aplicación de c) CaCO_3 , d) KClO_4 , e) Fe_2O_3 y f) SiO_2 , en las cuales se observan los granos columnares formados en esta zona.



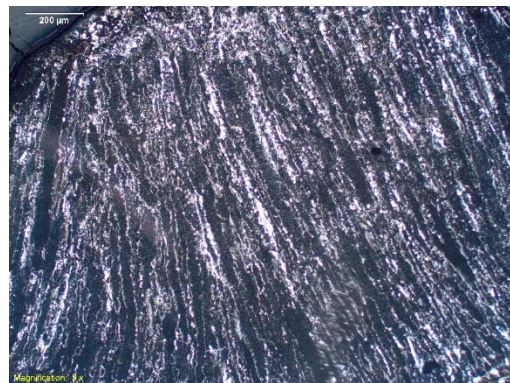
a) SF1 - Aumento: 100X



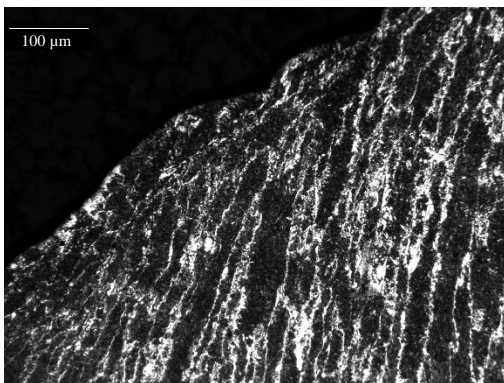
b) SF2 - Aumento: 100X



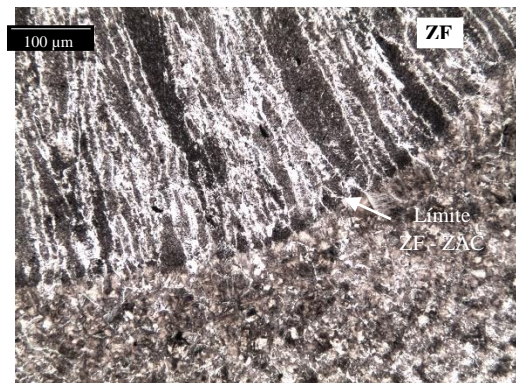
c) CaCO_3 - Aumento: 50X



d) KClO_4 - Aumento: 50X

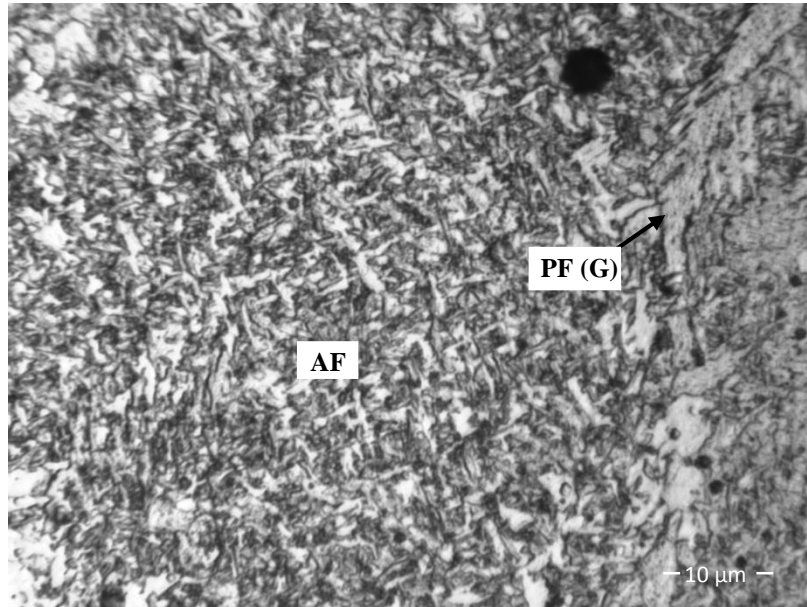


e) Fe_2O_3 - Aumento: 100X

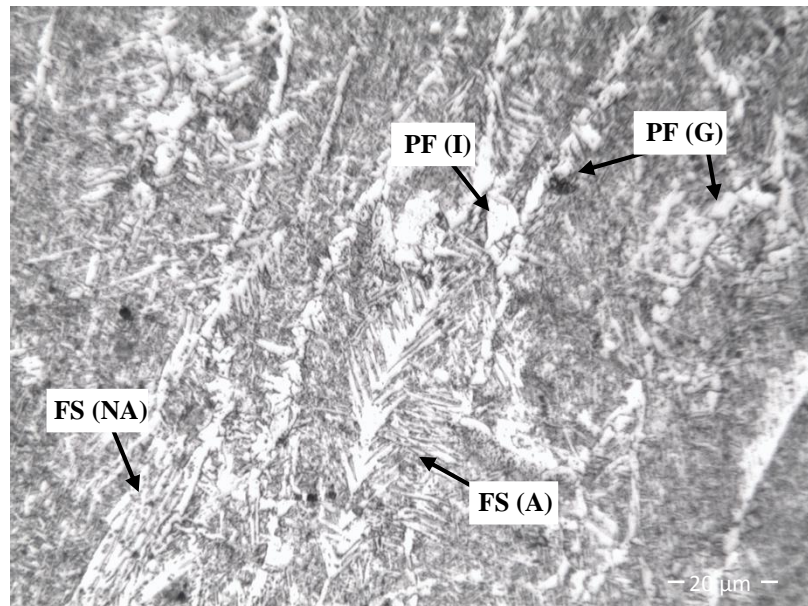


d) SiO_2 - Aumento: 100X

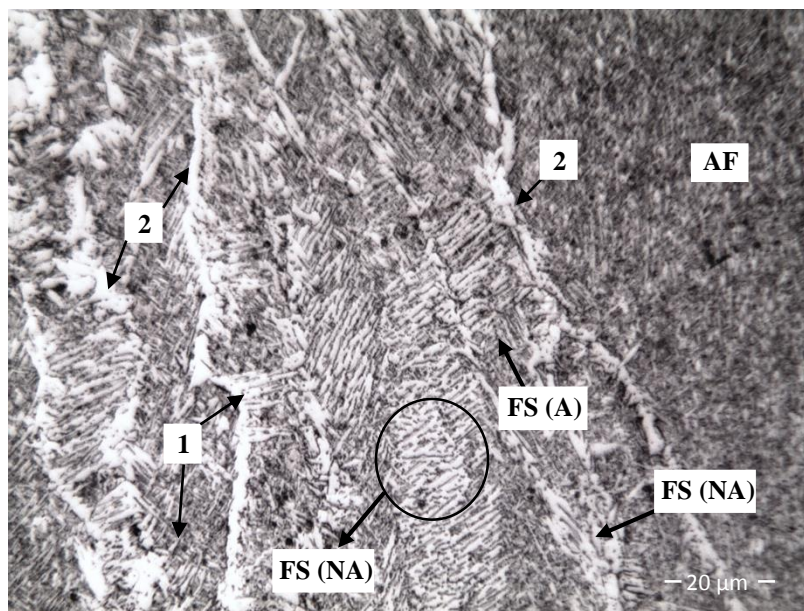
Micrografía del acero AISI SAE 1020 libre, aumento: 1000X. Muestra SF2.



Micrografías del acero AISI SAE 1020 con aplicación de SiO₂ con 500X de aumento. En a) se identifican FS – A y PF – G, y en b) Se observan: 1) FS – A, 2) FP – G y 3) AF.



a)

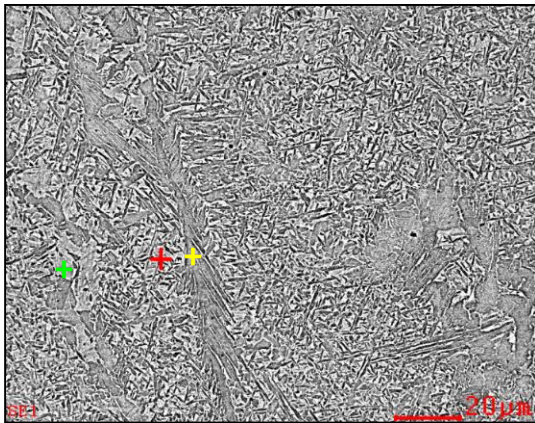


b)

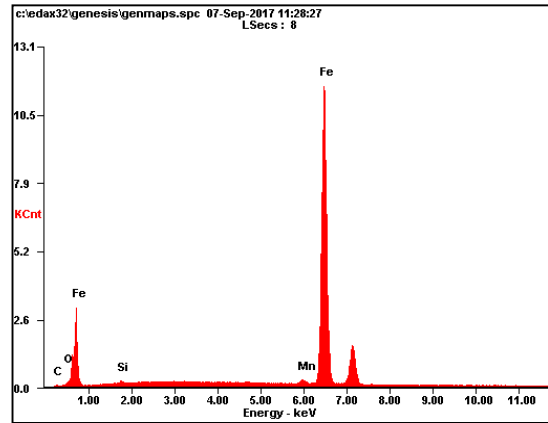
Resultados de composición química de los espectros EDS de la Fig. 14b.

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
CK	05,68	13,67
OK	28,93	52,24
SiK	00,52	00,54
MnK	00,30	00,16
FeK	64,57	33,40

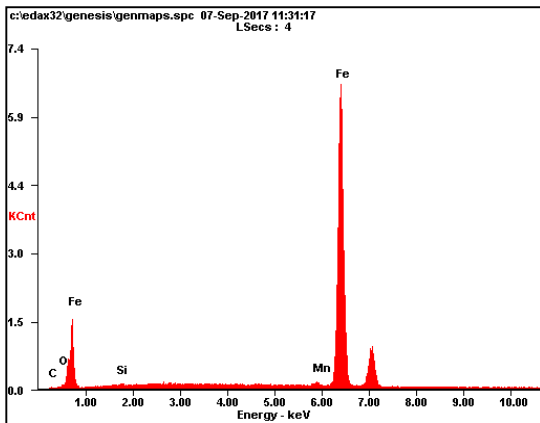
a) Micrografía SEM de la muestra SF1 con 2000X de aumento. b) Espectro EDS de la muestra de soldadura con SF1 en b) el punto rojo, c) el punto verde, d) el punto amarillo señalado en la Fig. 21a.



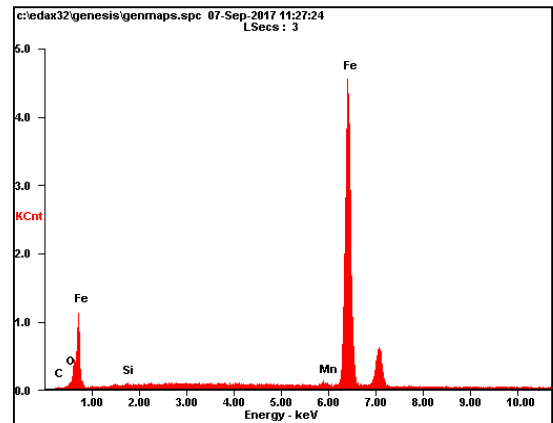
a)



b)



c)



d)

Resultados de composición química de los espectros EDS de a) la Fig. 21b para el punto rojo, b) la Fig. 21b para el punto verde y c) la Fig. 21c para el punto amarillo. Soldadura sin aplicación SF1.

a)

Elemento	Wt%	At%
CK	00,89	03,89
OK	00,98	03,23
SiK	00,78	01,45
MnK	01,18	01,13
FeK	96,16	90,31

b)

Elemento	Wt%	At%
CK	00,78	03,42
OK	00,79	02,63
SiK	00,66	01,24
MnK	01,09	01,06
FeK	96,68	91,65

c)

Elemento	Wt%	At%
CK	01,01	04,41
OK	01,07	03,49
SiK	00,52	00,97
MnK	01,20	01,14
FeK	96,19	89,99

Resultados de composición química de los espectros EDS de a) la Fig. 15a para el punto rojo, b) la Fig. 15b para el punto verde y c) la Fig. 15c para el punto amarillo. Soldadura con aplicación del compuesto CaCO_3 .

a)

Elemento	Wt%	At%
CK	03,02	10,48
OK	08,93	23,27
SiK	00,70	01,04
MnK	01,04	00,79
FeK	86,31	64,42

b)

Elemento	Wt%	At%
CK	02,91	11,72
OK	01,75	05,28
SiK	00,51	00,88
MnK	01,21	01,07
FeK	93,62	81,06

c)

Elemento	Wt%	At%
CK	02,74	11,11
OK	01,63	04,98
SiK	00,44	00,76
MnK	01,19	01,05
FeK	94,01	82,10

Resultados de composición química de los espectros EDS de a) la Fig. 21b para el punto rojo, b) la Fig. 21b para el punto verde y c) la Fig. 21c para el punto amarillo. Soldadura con aplicación del compuesto SiO₂.

a)

Elemento	Wt%	At%
CK	01,80	07,59
OK	01,19	03,75
SiK	00,88	01,58
MnK	01,15	01,06
FeK	96,98	86,01

b)

Elemento	Wt%	At%
CK	01,53	06,50
OK	01,19	03,79
SiK	00,71	01,29
MnK	01,20	01,12
FeK	95,38	87,30

c)

Elemento	Wt%	At%
CK	01,40	06,03
OK	00,94	03,03
SiK	00,65	01,19
MnK	01,30	01,22
FeK	96,71	88,52

NOTA: Los valores resaltados en rojo en las Tablas 7 – 12 indican el valor máximo y mínimo de microdureza medido en cada una de las probetas evaluadas.

Datos de microdureza medidos para la muestra SF1.

SF 1			
# Prueba	M1	M2	Promedio
1	234,5	236,6	235,55
2	239,8	242,8	241,3
3	229,2	231	230,1
4	231,7	230,7	231,2
5	223,1	223,1	223,1
6	230,2	238,4	234,3
7	236,9	238,2	237,55
8	235,5	226	230,75
9	231,4	238	234,7
10	234,4	233,8	234,1
Microdureza Promedio			233
Desviación Estándar			5
Error Estándar			1,548

Datos de microdureza obtenidos para la SF2.

SF 2			
# Prueba	M1	M2	Promedio
1	234,1	235,8	234,95
2	247,8	247,6	247,7
3	242,5	243,5	243
4	258,8	259,7	259,25
5	263,8	263,2	263,5
6	264,7	264,2	264,45
7	240	242,5	241,25
8	249	244	246,5
9	245	243	244
10	233,2	235,9	234,55
Microdureza Promedio			248
Desviación Estándar			11
Error Estándar			3,460

Datos de microdureza obtenidos para

Compuesto: SiO₂			
# Prueba	M1	M2	Promedio
1	245,5	249,5	247,5
2	251,1	255,8	253,5
3	247,5	245,8	246,7
4	234,5	235,3	234,9
5	242	242,7	242,4
6	267,4	264,1	265,8
7	298,8	304,7	301,8
8	249	255	252,0
9	265,4	262,1	263,8
10	244	246	245,0
Microdureza Promedio			255
Desviación Estándar			19
Error Estándar			5,942

la SiO₂.

Datos de microdureza obtenidos para
la KClO₄

Compuesto: KClO₄			
# Prueba	M1	M2	Promedio
1	229,1	228	228,55
2	227,2	229	228,1
3	220,6	217,3	218,95

4	242,1	233,5	237,8
5	237,1	236,6	236,85
6	229,7	230,5	230,1
7	215,4	218,8	217,1
8	232,4	235,9	234,15
9	218,7	214	216,35
10	229,5	226,3	227,9
Microdureza Promedio			228
Desviación Estándar			8
Error Estándar			2,475

Datos de microdureza obtenidos para la CaCO_3 .

Compuesto: CaCO_3			
# Prueba	M1	M2	Promedio
1	242,1	248,1	245,1
2	239,9	242,1	241
3	243,6	241,9	242,75
4	255,2	257,8	256,5
5	268,4	271,9	270,15
6	271,2	268,1	269,65
7	249,2	251,3	250,25
8	283,9	286,7	285,3
9	248,9	251,8	250,35
10	267,4	275,5	271,45
Microdureza Promedio			258
Desviación Estándar			15
Error Estándar			4,734

Datos de microdureza obtenidos para

Compuesto: Fe_2O_3			
# Prueba	M1	M2	Promedio
1	242,2	244,6	243,4
2	240,9	242,7	241,8
3	245,3	248,8	247,05
4	248,4	246,3	247,35
5	257,4	242,2	249,8
6	260,5	264,8	262,65
7	248,6	245,6	247,1
8	236,8	240	238,4
9	254	253,9	253,95
10	270,3	264,4	267,35
Microdureza Promedio			250
Desviación Estándar			9
Error Estándar			2,879

la Fe_2O_3 .