

**EFFECTOS DE LOS FLUX ACTIVOS SOBRE SOLDADURAS GMAW
APLICADAS A UN ACERO AISI/SAE 1020**

CRISTHIAN HARLEY MADARIAGA ROSAS

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

2018

**EFFECTOS DE LOS FLUX ACTIVOS SOBRE SOLDADURAS GMAW
APLICADAS A UN ACERO AISI/SAE 1020**

CRISTHIAN HARLEY MADARIAGA ROSAS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

DIRECTORES

PAULO JOSÉ MODENESI

Doctor en Ingeniería de soldadura

MAURICIO RINCÓN ORTÍZ

PhD. en Ingeniería de corrosión

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

2018

DEDICATORIA

A Dios, por todas las oportunidades y bendiciones dadas, por su misericordia y su constante acompañamiento y protección.

A mis padres Nubia Stella Rosas Noriega y Luis Cediél Madariaga Pino, quienes son mi motor, mis amigos y quienes han dado todo de sí, para que yo pueda lograr mis aspiraciones. En ellos encuentro todo el amor y apoyo que una persona pueda tener. A ellos mi infinita gratitud.

A mis abuelos Carmen Elena (Q.E.P.D.), Ilva Rosa, Luis José y Bonifacio, por ese gran amor brindado. Así como a mi madrina Betty López y el resto de mis familiares de quienes recibo muestras de amor y apoyo constante.

A mi amiga Karen Guerrero y su familia por su continuo acompañamiento y motivación, así como por hacerme sentir un miembro más de su núcleo familiar.

A mis amigos y todas aquellas personas que han dejado una semilla en mi formación personal y profesional. Que han estado ahí para brindarme su apoyo en situaciones adversas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, quien es mi sustento y compañía en todo momento, quien puso las oportunidades y personas adecuadas para hacer de este proyecto una realidad. Así como a mis padres quienes me apoyan incondicionalmente en la realización de todas mis metas y sueños.

Igualmente, a los profesores Paulo José Modenesi y Mauricio Rincón Ortiz, por haber depositado su confianza en mí y por la dedicación con que me brindaron sus orientaciones para lograr un buen desarrollo del presente trabajo.

Agradezco también al Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación de la Universidad Federal de Minas Gerais, en cabeza del profesor Alexandre Queiroz Bracarense, por permitirme utilizar las instalaciones para la realización de las pruebas de soldadura, así como a quienes trabajaban en éste, por su colaboración y acogimiento. De igual modo al Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS por dejarme culminar la preparación de las muestras metalográficas allí.

Así mismo, doy mis sinceros agradecimientos a mis colegas, Leandro Brito Gonçalves, Luana Batista Araújo, Mauricio Uribe y Matheus Azevedo, por la ayuda brindada en el desarrollo de este proyecto, por todo el conocimiento compartido y por la amistad creada en medio de éste.

Finalmente doy gracias a toda mi familia y amigos, que me han acompañado en cada uno de los años de mi formación profesional y por todos los momentos vividos en este tiempo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. ANTECEDENTES	15
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	21
3.1 MATERIALES	21
3.2 EQUIPOS UTILIZADOS	22
3.3 OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS SOLDADAS	24
3.3.1 Ensayos preliminares para el ajuste de los parámetros y equipos.	24
3.3.2 Preparación de las chapas	25
3.3.2.1 Ejecución de las soldaduras	26
3.3.2.2 Preparación de los cordones de soldadura para el análisis metalográfico	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1 RECOLECCIÓN DE SEÑALES EMITIDAS EN LAS VARIABLES DEL PROCESO GMAW.	28
4.2 ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LOS FLUX, EN LA MORFOLOGÍA DEL CORDÓN DE SOLDADURA	38
4.3 ANÁLISIS VISUAL DEL ARCO ELÉCTRICO.	42
5. CONCLUSIONES	44
6. RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	51

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diseño de la proyección de arco eléctrico.	23
Figura 2. Pasos en la aplicación del flux: (A) Chapa limpia; (B) Dispositivo de corte de la máscara adhesiva; (C) Aplicación de la cinta en la chapa; (D) Deposición del flux; (E) Chapa terminada con el flux esparcido.	26
Figura 3. Oscilograma de corto-circuito.	29
Figura 4. Oscilograma de tensión emitido por el programa SINAL, para 210 [A] en GMAW convencional.	32
Figura 5. Oscilogramas comparativos del proceso GMAW convencional y el A-GMAW	34
Figura 6. Variación de la velocidad de alimentación del electrodo en el proceso GMAW convencional.	36
Figura 7. Gráfico comparativo de la longitud de arco eléctrico de los procesos GMAW convencional y A-GMAW.....	36
Figura 8. Gráfico comparativo de la variación de velocidad de los procesos GMAW convencional y A-GMAW.....	37
Figura 9. Macrografía de los perfiles de los cordones de soldadura.....	39
Figura 10. Gráfico comparativo de la variación del ancho del cordón respecto al proceso GMAW convencional y A-GMAW.....	39
Figura 11. Gráfico comparativo de la penetración de las soldaduras en el proceso GMAW convencional y A-GMAW.....	41
Figura 12. Gráfico comparativo del refuerzo de la soldadura en el proceso GMAW convencional y A-GMAW.....	42
Figura 13. Captura del arco eléctrico proyectado en el proceso GMAW convencional y A-GMAW con CaCO ₃ a una corriente de 190 [A].	43

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Fórmula para el tiempo de corto circuito	28
Ecuación 2. Fórmula para el Factor de corto circuito	28
Ecuación 3. Fórmula para el área del perfil de la Zona Fundida.....	40

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Dimensiones de la chapa metálica utilizada. [16].....	51
Anexo B. Composición química del alambre-electro AWS A5.18 - ER70S6. [24]..	52
Anexo C. Montaje del sistema de operacional. Adaptación: Propia.....	53
Anexo D. Parámetros fijos del proceso de soldadura A-GMAW.....	54
Anexo E. Divisiones de corte del cordón de soldadura de 230[A] sin flux.	55
Anexo F. Divisiones de corte del cordón de soldadura de 230[A] con flux de SiO ₂	56
Anexo G. Valores de las señales del proceso GMAW convencional.	57
Anexo H. Valores de las señales del proceso A-GMAW con flux SiO ₂	58
Anexo I. Valores de las señales del proceso A-GMAW con flux de CaCO ₃	59
Anexo J. Oscilogramas secuenciales del proceso de soldadura GMAW convencional (170[A] a 240[A]).....	60
Anexo K. Datos de la morfología de los cordones de soldadura.....	63

RESUMEN

TÍTULO: EFECTOS DE LOS FLUX ACTIVOS SOBRE SOLDADURAS GMAW APLICADAS A UN ACERO AISI/SAE 1020*

AUTORES: Madariaga Rosas, Cristhian Harley**

PALABRAS CLAVES: A – GMAW; Flux activo; Tensión; Soldadura.

DESCRIPCIÓN:

GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) es un proceso de soldadura con arco eléctrico que produce la fusión localizada de metales por medio de un electrodo consumible (alambre) y la pieza de trabajo, con una protección gaseosa que evita contaminación del charco de fundición, generando así un cordón limpio, sin escoria. Es uno de los procesos más utilizados en la industria por la gran variedad de metales que se pueden soldar, por su fácil utilización y automatización, lo que le da un excelente nivel de productividad y versatilidad. Una variante de este proceso, aun poco estudiada, es el A-GMAW (*Active flux Gas Metal Arc Welding*), que consiste en la adición de una fina capa de óxidos o haluros en polvo, el cual ha presentado resultados muy interesantes en el proceso TIG y se ha demostrado que dependiendo el tipo de flux aplicado al metal a soldar, puede generar modificaciones operacionales respecto a los parámetros involucrados y cambios morfológicos en el cordón. El presente trabajo consiste en una evaluación de los efectos causados por la aplicación de flux de CaCO_3 y SiO_2 sobre la morfología del cordón, los parámetros operacionales y la estabilidad del proceso, en unas soldaduras GMAW aplicadas sobre un acero AISI/SAE 120. Para esto se utilizó una fuente de soldadura operada en modo corriente constante y se hicieron ensayos pre-liminares donde se determinaron los valores de los parámetros a utilizar, los cuales se mantuvieron constantes durante todo el transcurso del trabajo. Los resultados obtenidos demostraron que los flux de CaCO_3 y SiO_2 , si tienen influencia en cambios morfológicos como la penetración de la soldadura, e igualmente se observaron alteraciones en los modos de transferencia que gobernaban cada una de las soldaduras, así como en su estabilidad.

* Proyecto de grado

** 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: EFFECTS OF ACTIVE FLUX ON GMAW WELDING APPLIED TO A STEEL AISI/SAE 1020*

AUTHORS: Rosas Madariaga, Harley Cristhian**

KEYWORDS: A - GMAW; Flux active; Voltage; Welding.

DESCRIPTION

GMAW (Gas Metal Arc Welding) is an electric arc welding process that produces the localized fusion of metals by means of a consumable electrode and the work piece with a gaseous protection that avoids the contamination of the melting pool, thus generating a cord clean, without slag. It is one of the most used processes in the industry for the wide variety of metals that can be welded, for its easy use and automation, which gives an excellent level of productivity and versatility. A variant of this process, still little studied, is the A-GMAW (Active Gas Metal Arc Welding flux) consisting of the addition of a thin layer of oxides or halides powder, which has presented very interesting results in the TIG process and has been shown that depending on the type flux has applied to metal welding, can generate operational modifications to the parameters involved and morphological changes in the cord. This study is an assessment of the effects caused by the application of flux of CaCO_3 and SiO_2 on the morphology of the bead, operating parameters and process stability, in GMAW welds applied to a steel AISI/SAE 120. For this, a welding source operated in constant current mode was used and pre-liminal tests were carried out where the values of the parameters to be used were determined, which were kept constant throughout the course of the work. The results showed that the flux of CaCO_3 and SiO_2 , if they have influence on morphologic changes such as weld penetration, and also changes in the transfer modes governing each of the welds they were observed as well as its stability.

* Degree 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

GMAW (del inglés Gas Metal Arc Welding) o MIG/MAG (del inglés Metal Inert Gas/Metal Active Gas) es un proceso de soldadura con arco eléctrico que produce la fusión localizada de metales por medio de un electrodo consumible (alambre) y la pieza de trabajo, con una protección gaseosa que evita contaminación del charco de fundición, generando así un cordón limpio, sin escoria. Es uno de los procesos más utilizados en la industria por sus grandes ventajas en comparación a otros procesos, consiguiendo realizarse largos cordones gracias a su alimentación continua y mayores tasas de deposición; al igual que una elevada penetración en modos de transferencia como la spray¹. Estas características son acompañadas de una fácil utilización y automatización, lo que le da un excelente nivel de productividad y versatilidad. Sin embargo, tiene algunas limitaciones y dificultades, como la necesidad de controlar el gran número de variables (tipo de gas protector, diámetro y material del alambre-electrodo, y valores de la tensión o corriente, entre muchos más), que pueden generar inestabilidad en el proceso cuando no son ajustadas y controladas adecuadamente. Algunos métodos utilizados para reducir esta deficiencia, incluyen la aplicación de sistemas de control eléctrico y/o mecánico para monitorear y controlar la intensidad de corriente durante la transferencia metálica²; pero esto eleva los costos del proceso. Por eso, últimamente se viene estudiando la utilización de flux activos previos a la aplicación del cordón, el cual muestra mejoras significativas en sus resultados como aumento en la penetración,

¹ QUEIROZ BRACARENSE A., "Gas Metal Arc Welding 2.2.," Infosolda, 2003. [Online]. Available: <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/423-gas-metal-arc-welding.html>. [Accessed: 09-Jun-2018].

² COSTA T. F., FILHO E. B., AREVALO H. D. H., and OLIVEIRA VILARINHO L., "Avaliação de processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único," Soldag. e Insp., vol. 17, no. 4, pp. 356–368, 2012

reducción de la contracción y distorsión, además de poder afectar las características operacionales del proceso^{3 4}.

Después de investigar sobre los resultados que se han obtenido con la implementación de flux activos, en este trabajo se busca evaluar y analizar los efectos de diferentes tipos de flux aplicados sobre el metal base, en las características operacionales de la soldadura GMAW de un acero al carbono AISI/SAE1020 con modo de transferencia spray y globular.

³ HUANG H.-Y., "Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding," Mater. Des. v. 31, pp. 2488–2495, 2010

⁴ FERREIRA NETO J. R., BAHIA LOPES P., APOLINÁRIO E. R., and MODENESI P. J., "Uma avaliação da soldagem MIG/MAG com fluxos," An. do XLII CONSOLDA – Congr. Nac. SOLDAGEM, Belo Horizonte, Assoc. Bras. Soldag., 2016

1. ANTECEDENTES

El GMAW es un proceso de soldadura mediante el cual, el metal de aporte es transferido al metal base en forma de gotas. Se considera este de gran complejidad, porque envuelve un elevado número de variables, como lo son la velocidad de alimentación, la velocidad de avance, la intensidad de corriente, el voltaje, el diámetro de electrodo, el gas protector, la distancia del tubo de contacto, entre otros. Este proceso según su ajuste puede dar como resultado diferentes mecanismos de transferencia metálica, que están relacionados con el rendimiento en que se deposita la gota de metal en el charco de fusión⁵. Debido a esto, es que los parámetros despiertan gran interés en ser investigados a fondo, para determinar los efectos e influencia de cada uno de ellos sobre el cordón de soldadura y sus propiedades, puesto que cada tipo de transferencia influye en la estabilidad operacional del arco^{6 7}.

Son muchos los modos de transferencia que de este proceso se desprenden, lo que llevó al Instituto Internacional de Soldadura (IIW), a clasificarlos en grupos, como "transferencia metálica natural" y "transferencia metálica controlada"^{8 9 10 11}. El primer grupo mencionado, es el de mayor relevancia y al que muchos autores se refieren, puesto que es en éste dónde se encuentran los métodos básicos que

⁵ 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

⁶ MODENESI P. J., Física do Arco Elétrico Soldagem I. Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012

⁷ 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

⁸ SCOTTI A., PONOMAREV V., and LUCAS W., Op. Cit

⁹ MODENESI P. J., Op. Cit

¹⁰ MODENESI P. J. and QUEIROZ BRACARENSE A., Op. Cit

¹¹ 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.

ocurren de forma natural, sin necesidad de ningún otro control de parámetros adaptativos. En este conjunto de métodos se encuentra una subdivisión, la primera de ellas relaciona los modos que rigen su transferencia de la gota por contacto, al haber un choque del electrodo con la gota aun en crecimiento, y el metal base. Mientras que la segunda muestra una deposición de las gotas en “vuelo libre” hacia el charco de soldadura. Es este último sub-grupo el estudiado, en este trabajo¹².

En la transferencia por vuelo libre, las gotas se desprenden del alambre cuando finalmente las fuerzas de origen magnético y gravitatorias superan a la fuerza asociada con la tensión superficial (se alcanza un diámetro de gota crítico). Cuando son las fuerzas gravitacionales quienes dominan el proceso, se tienen modos de **transferencia “globular”**, tanto puros como repelidos, en donde el diámetro de la gota es mayor que el diámetro del alambre electrodo, lo que genera un mayor peso, que acaba por el desprendimiento de la gota dominada por la fuerza ya mencionada.

Otro mecanismo es la **transferencia por “spray”**, también conocida como transferencia por rocío, es la más indicada desde el punto de vista de estabilidad del arco. Se considera este mecanismo el más llamativo por ser la transferencia de mayor energía del proceso, dando como resultado altas penetraciones, debido a que hay una mayor transferencia de calor por medio de las gotas, las cuales alcanzan temperaturas de hasta 2600K, y éste se transporta al metal base por convección, lo que genera una mayor penetración.

Como se mencionó anteriormente, el gas de protección juega un papel importante para lograr el tipo de transferencia, así como la forma en que penetra el metal. Es por esto que se utilizan mezclas binarias que contienen argón + 1-5% de oxígeno, que crea un perfil de penetración profundo y que se conoce como perfil en dedo (*finger shape*), o argón + CO₂, donde los niveles de CO₂ son 18% o menos, que

¹² Ibíd.

proporcionan un tipo más redondeado de penetración. Se usa argón como gas base por tener una viscosidad cinemática sustancialmente mayor que otros gases, por lo que el argón impulsa la corriente de gotas de manera más efectiva. De igual modo se hace uso del CO₂ siempre que se quiere una mayor fusión del metal base; altas velocidades de soldadura y bajos costos en el proceso. Es por esto que la morfología del cordón guarda estrecha relación con el tipo de gas utilizado^{13 14 15}.

Debido al elevado número de variables envueltas e interrelacionadas entre sí, en estos procesos, el establecimiento de unas buenas condiciones de soldadura para una determinada aplicación no es fácil, pudiendo existir diferentes soluciones. Frecuentemente, las condiciones de soldadura son seleccionadas de una forma empírica, con base en experiencia práctica, y a veces, auxiliada con ensayos previos¹⁶ [7]. De este modo una buena elección y control de los parámetros es vital para el éxito del proceso. Por ésta razón hoy en día se abren líneas de investigación que buscan un mayor control de los resultados finales; a través, de la utilización de flux activos en la soldadura GMAW.

Esta variante del proceso GMAW, es conocida como A-GMAW (del inglés Active Flux Gas Metal Arc Welding) y consiste en la adición de una fina capa de óxidos o halógenos sobre el metal base a soldar. No obstante, es una aplicación nueva y poco explorada para este tipo de soldadura, pues sus bases radican en el proceso A-TIG (variante del proceso GTAW), en donde las investigaciones han sido mayores

¹³ MODENESI P. J. and QUEIROZ BRACARENSE A., Op. Cit

¹⁴ ASM INTERNATIONAL, METALS HANDBOOK - WELDING BRAZING AND SOLDERING, VOL. 6. 1993.

¹⁵ LINCOLN ELECTRIC, Gas Metal Arc Welding. Cleveland, OH, U.S.A: Lincoln Global Inc., 2014.

¹⁶ MODENESI P. J. and QUEIROZ BRACARENSE A., Op. Cit

y se han encontrado efectos repetitivos en la morfología del cordón, tanto en apariencia, como en ancho y profundidad^{17 18 19 20}.

Con la utilización de flux activos en el proceso y sus notables cambios en la morfología, han nacido teorías, muchas de ellas basadas en los resultados obtenidos en los procesos A-TIG, que tratan de explicar el mecanismo de actuación de dichos flux. Donde han tomado fuerza dos de ellas ^{21 22 23 24 25 26 27}:

- La constricción del arco eléctrico debido a las reacciones con el flux causando un aumento de la densidad de energía.
- Alteraciones en los movimientos convectivos dentro del charco de fusión en función de variaciones en la tensión superficial (efecto Marangoni).

Huang²⁸ [3] fue uno de los primeros investigadores que implementó esta técnica para el proceso GMAW. En este estudio se utilizó como flux activos el óxido de Hierro III (Fe_2O_3), dióxido de silicio (SiO_2) y carbonato de magnesio (MgCO_3) en un acero al carbono AISI/SAE 1020. Según él, dichos flux además de aumentar el área de la sección transversal del cordón y su penetración, promovieron otros efectos como una mayor resistencia a la tracción de la junta. Del mismo modo, el autor

¹⁷ HUANG H.-Y., Op. Cit.

¹⁸ BRITO L., Análise da influência dos fluxos SiO_2 e CaCO_3 sobre a geometria do cordão em soldagem A-GMAW (Dissertação de Pregrado). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

¹⁹ MODENESI P. J., "A química da formação do cordão na soldagem TIG," Soldag. e Insp., vol. 18, no. 3, pp. 287–300, 2013

²⁰ MODENESI P. J., APOLINÁRIO E. R., and PEREIRA I. M., "TIG welding with single-component fluxes," J. Mater. Process. Technol., vol. 99, no. 1, pp. 260–265, 2000

²¹ HUANG H.-Y., Op. Cit.

²² BRITO L., Op. Cit.

²³ MODENESI P. J., Op. Cit.

²⁴ FAN D., ZHANG R., GU Y., and USHIO M., "Effect of Flux on A-TIG Welding of Mild Steels," Trans. JWRI, vol. 30, pp. 35–40, 2001

²⁵ GOIS LUCIANO DE AZEVEDO A., FERRARESI V. A., and PEREIRA FARIAS J., "uma revisão sobre o processo de soldagem A-TIG," 16° POSMEC. FEMEC/UFU, 2006.

²⁶ HOWSE D. and LUCAS W., "Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding," Sci. Technol. Weld. Join., vol. 5, no. 3, pp. 189–193, Jun. 2000

²⁷ PATEL K. R., CHOUDHARY A. B., and PATEL T. M., "Parametric optimization of gas metal arc welding process using activated flux on en 8 by taguchi method : A Review," pp. 1–6, 2014.

²⁸ HUANG H.-Y., Op. Cit.

observó una reducción de la distorsión angular con aplicación de flux activos en relación a la soldadura obtenida con el proceso GMAW convencional.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los efectos generados por los flux activos en el proceso de soldadura GMAW de un acero AISI/SAE 1020.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorear y valorar las señales emitidas de las variables del proceso GMAW por medio de un sistema computacional (programa SINAL), capturadas a través de un equipo de adquisición de datos (SAP V4).
- Identificar y evaluar los efectos ocasionados por los flux (SiO_2 y CaCO_3) aplicados sobre el metal base en las características operacionales de la soldadura GMAW con fuente operando en corriente continua y modo de transferencia spray y globular de un acero al carbono AISI/SAE1020.
- Determinar comparativamente las diferencias en la morfología de los cordones de las soldaduras obtenidas en los ensayos con flux y sin flux.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este proceso metodológico tuvo varias etapas, las cuales fueron realizadas entre los laboratorios de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) en Brasil y los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, de la Universidad Industrial de Santander (UIS). La primera de estas etapas consistió en la caracterización y análisis granulométrico de los flux a utilizar, se prepararon las probetas y se realizaron los ensayos de soldadura. Posteriormente el corte de dichas probetas soldadas. Para finalmente realizar la preparación y análisis metalográfico.

3.1 MATERIALES

El material de las probetas utilizadas fue un acero al carbono AISI/SAE 1020, el cual está clasificado como un acero de bajo carbono. Las chapas tienen unas dimensiones finales de 50 mm de ancho, 170 mm de largo, 9,5 mm de alto y sin ningún tipo de bisel o chaflán (Anexo A). Para este proceso de soldadura fue requerido un alambre-electrodo AWS A5.18 - ER70S6, con un diámetro de 1,2 mm (Anexo B).

El carbonato de calcio (CaCO_3) y el óxido de silicio (SiO_2) empleados en este proyecto como flux activos tuvieron una granulometría ajustada < malla 200. Los anteriores Flux se escogieron por no ser higroscópicos y por ser compuestos generalmente usados en la fabricación de los electrodos revestidos²⁹.

²⁹ FERREIRA NETO J. R., Estudo do efeito de fluxos em aspectos operacionais da soldagem mig/mag (DISSERTAÇÃO DE MESTRADO). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

En el transcurso de este proyecto fue necesario la utilización de materiales consumibles como: discos de corte, acetona de pureza analítica (para la deposición del flux en el metal base), algodón, papel aluminio, cinta adhesiva, resina epoxi y un catalizador (para el montaje de las muestras metalográficas), Papel abrasivo de diferente granulometría, alcohol etílico, alúmina de 2 y 5 micras (μm), y ácido nítrico al 2% en alcohol etílico (nital 2%).

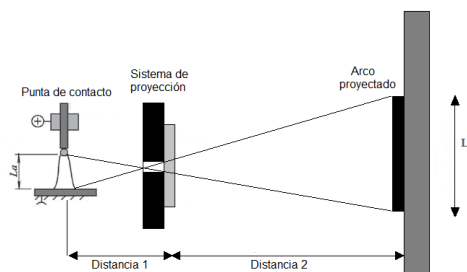
3.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Para llevar a cabo la ejecución de las soldaduras, se utilizó una fuente que cuenta con la capacidad de seleccionar diferentes opciones de operación para el proceso GMAW, tales como tensión constante, corriente constante y corriente pulsada. El proceso de alimentación estuvo acompañado de un alimentador de alambre-electrodo, quien efectuó esta operación de forma automática. Enviando el alambre por una torcha, y un bico (punta o tubo de contacto) de cobre con un orificio de 1,2 mm de diámetro. Dicha torcha fue ajustada de forma estática a la estructura donde se efectuaron las soldaduras. Para verificar que el flujo de gas protector se mantuviera constante se empleó un medidor de flujo para Ar-CO₂.

En cuanto al posicionamiento y desplazamiento de las chapas metálicas, éstas fueron ajustadas a una placa con la ayuda de unos pernos, a fin de evitar algún movimiento de la chapa durante el proceso. Esta placa y los pernos también contribuyeron a la disipación de calor generado en las probetas soldadas. Este montaje fue posicionado sobre una base móvil prensada por medio de un brazo metálico con un controlador de velocidad. Para la deposición del flux en las chapas metálicas, primero fue necesario hacer el pesaje de las cantidades estipuladas, para ello se requirió una balanza analítica digital.

Con el fin de alcanzar uno de los objetivos planteados, se hizo un diseño donde se requería de la proyección del arco en abierto, para observar su comportamiento y longitud en el momento del proceso de soldadura A-GMAW, en comparación con la GMAW. De modo que para cumplir con este esquema se necesitó desarrollar un mecanismo de proyección y ampliación del arco, para lo cual se usó una placa de MDF, a la que se le hizo un agujero en el centro de 3 cm de diámetro. En el lado externo del agujero (tomando como dirección, del arco en abierto hacia la pantalla de proyección), se posicionó una lente biconvexa y al lado contrario una placa de vidrio con un papel filtro, para la reducción de la intensidad luminosa. Dicha placa se ajustó dentro de un armazón metálico, en donde con ayuda de unos pernos se lograba desplazar la placa verticalmente para la regulación de la altura de proyección. Este armazón a su vez, fue colocado sobre dos listones metálicos soldados a la estructura, permitiendo así, un desplazamiento horizontal de la placa de proyección, para así ajustar el foco y tamaño de ampliación. Finalmente se obtiene una proyección del arco, con una ampliación de aproximadamente 12X del tamaño real de la longitud del arco, generando así un mayor control y análisis en la variación de dicho parámetro respecto a la transferencia metálica en curso³⁰. Ver Figura 1. (Ver montaje completo en Anexo C)

Figura 1. Diseño de la proyección de arco eléctrico.



Fuente: Tomada y adaptada de Brito.: BRITO L., Análise da influência dos fluxos SiO_2 e CaO sobre a geometria do cordão em soldagem A-GMAW (Dissertação de Pregrado). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

³⁰ BRITO L., Op. Cit.

La recolección de las señales eléctricas del proceso de soldaduras, se realizó a través de un sistema de adquisición de datos, con una tasa de 5000 Hz (tasa máxima obtenida por el equipo). El sistema escogido permitía la recolección simultánea de la tensión, corriente de soldadura y velocidad de alimentación. El procesamiento de los datos adquiridos se desarrolló por medio del software PROGRAMA SINAL³¹, elaborado por el LRSS^{32 33}.

Para cumplir con el análisis morfológico de los cordones realizados, se necesitó inicialmente un calibrador, así como una cortadora metalográfica, de donde se obtuvieron las probetas metalográficas que pasaron por el proceso de desbaste, para finalmente realizar un registro macrográfico con ayuda de una cámara profesional. Estos registros fotográficos fueron procesados en el software ImageJ.

3.3 OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS SOLDADAS

3.3.1 Ensayos preliminares para el ajuste de los parámetros y equipos. Para obtener los parámetros de referencia finales con los que se realizaron las soldaduras, primero fue necesario ensayar el funcionamiento de los equipos y ajustar todos los detalles. Basándonos en la literatura, se hizo un primer ensayo del proceso GMAW con la fuente en modo de corriente continua y haciendo un barrido desde 150 Amperios [A] y aumentando de 10 [A], hasta llegar a 250 [A], en donde después de estos ensayos preliminares, se pudo definir las variables fijas a utilizar, su influencia en el proceso y los valores de corriente con los que se realizaron las soldaduras con flux activos, para cada tipo de transferencia metálica. En respuesta a estas variables mencionadas anteriormente, el equipo operó con valores de

³¹ LRSS and Modenesi P. J., "Manual Programa Sinal." Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017

³² BRITO L., Op. Cit.

³³ ARAÚJO BATISTA L., Soldagem MIG / MAG com fluxo ativo do aço inoxidável austenítico AISI 304L (DISSERTAÇÃO DE MESTRADO). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018

velocidad de alimentación y tensión necesarios. Todos los parámetros fijos se consignaron en el Anexo D, los cuales se verificaban antes de empezar cada prueba.

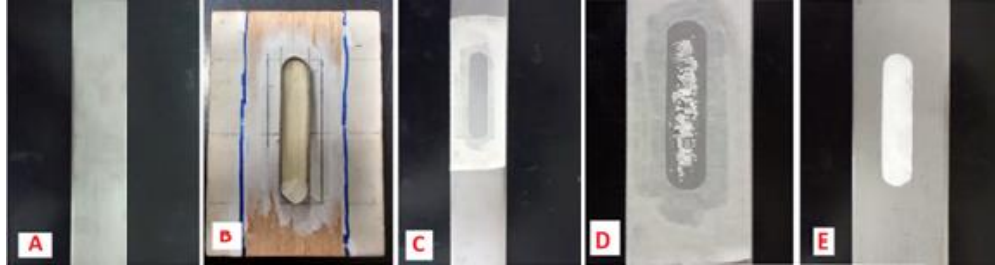
Para la obtención de la longitud de arco deseada, se tuvo que ajustar la velocidad de alimentación, variando la diferencia de potencial de referencia, en cuanto se monitoreaba la longitud del arco en la pantalla de proyección, hasta llegar al valor ya establecido como fijo. Cuando la longitud del arco eléctrico encontrada se hacía igual al valor pre-establecido, se iniciaba la recolección de las señales de corriente, diferencia de potencial y velocidad de alimentación, con el sistema digital de adquisición de datos.

3.3.2 Preparación de las chapas. Para la deposición del flux en los cuerpos de prueba, se utilizó como referencia lo realizado en otros estudios similares^{34 35}. Luego de tener limpia la superficie de la chapa, se procedió a delimitar la zona donde iría depositado el flux. Para esto fue necesario una cinta adhesiva, que se hacía pasar por un dispositivo de corte y el cual nos aseguraba que las áreas delimitadas serían iguales en cualquier chapa. Así se llevaba la cinta adhesiva hasta la placa metálica, donde se pegaba, dejando un área de 1000 mm² sin cubrir, sobre la cual se depositaría los flux en seco y luego con ayuda de unas gotas de acetona y una espátula, se esparcía homogéneamente por toda el área demarcada. Una vez evaporada la acetona, era retirada la cinta adhesiva y se volvía a limpiar la superficie donde estuvo adherida dicha zona enmascarada. La cantidad de flux ya estaba previamente fijada y pesada. Esta correspondía a 0,1 g de flux para cada prueba, el cual daba como resultado una densidad de 100 g/m² de flux en el área delimitada. En la Figura 2, se evidencian los pases descritos anteriormente.

³⁴ FERREIRA NETO J. R.,

³⁵ COLEN NETO P., Efeito da concentração do fluxo na soldagem atig de aço inoxidável austenítico (dissertação de mestrado). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012

Figura 2. Pasos en la aplicación del flux: (A) Chapa limpia; (B) Dispositivo de corte de la máscara adhesiva; (C) Aplicación de la cinta en la chapa; (D) Deposición del flux; (E) Chapa terminada con el flux esparcido.



Fuente: Tomada y adaptada de BRITO L., Análise da influência dos fluxos SiO_2 e CaO_3 sobre a geometria do cordão em soldagem A-GMAW (Dissertação de Pregrado). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017

3.3.2.1 Ejecución de las soldaduras. En la ejecución de las soldaduras sin flux se volvió hacer un barrido ya preestablecido, desde un valor de corriente de 170 [A] hasta 240 [A]. Desde el mismo instante en el que iniciaba el proceso de soldadura, se empezaba con la recolección de las señales; así mismo se realizaba el ajuste en la velocidad de alimentación, a través de la tensión de referencia y con el fin de ajustar la longitud del arco a 6mm. Una vez conseguido este valor, se tomaba registro del tiempo y se dejaba que el proceso continuara solo.

Para las soldaduras con flux, se mantuvo el mismo procedimiento, con la única diferencia de que el ajuste de la longitud del arco, se realizaba segundos antes de que el arco eléctrico entrara en la zona con flux. Para esto, las chapas eran posicionadas de forma que el arco abriera en la zona sin flux; y una vez ya adentro de la capa de flux, la velocidad de alimentación no fue ajustada de nuevo, con el objetivo de observar las posibles variaciones en la longitud del arco eléctrico. Cabe aclarar que la realización de cada ensayo, tanto con y sin flux, se desarrolló en secuencia aleatoria y en duplicado.

3.3.2.2 Preparación de los cordones de soldadura para el análisis metalográfico. Una vez finalizados los procesos de soldadura se seleccionaron las probetas a ser cortadas. Estas fueron, una de cada dos obtenidas por GMAW convencional, de los mismos valores de corriente que los usados en A-GMAW, y todas las obtenidas en el proceso A-GMAW. A dichas muestras se les realizó un corte en dirección transversal al cordón de soldadura, todos estos en la misma posición de la chapa. En el Anexo E y F se ilustra la forma y posición en que fueron cortadas las chapas. Luego del corte y debido al reducido tamaño de las muestras, fue necesario incluir cada una de ellas y con ayuda de un molde en una resina acrílica fría, a fin de facilitar la manipulación de las probetas durante el desbaste, así como de asegurar unas caras completamente planas en dichas muestras.

Para la obtención de las macrografías se siguió la norma ASTM E3-01³⁶, haciéndose pasar todas las muestras por papel de desbaste número 80, 120, 180, 220, 400 y 600, para luego ser atacadas químicamente con Nital al 2% mediante el método de inmersión, durante aproximadamente 10 segundos, hasta que se alcanzara a observar el perfil del cordón de soldadura a simple vista. Inmediatamente se realizaron unas tomas fotográficas con una cámara digital. Esta cámara se encontraba posicionada a la misma distancia para todas las tomas, a fin de mantener una misma escala y dimensiones de la imagen.

³⁶ ASTM International, E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA, USA, 2017

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RECOLECCIÓN DE SEÑALES EMITIDAS EN LAS VARIABLES DEL PROCESO GMAW.

Para mayor facilidad en el estudio de estas señales, se ordenaron ascendentemente respecto con la corriente utilizada en cada operación y se obtuvo una relación para cada una de éstas, con las variables dependientes del proceso, y así se consiguió el valor de la media (\bar{X}), su desviación estándar (S), tiempo de corto-circuito (t_{cc}) y factor de corto-circuito (Fcc). Este último indica el porcentaje de la duración en que el electrodo permanece haciendo contacto con el charco de fusión, durante un ciclo de la transferencia y se toma como un índice de estabilidad del corto-circuito. Para la obtención de los valores de t_{cc} y Fcc, se utilizaron las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente. En la figura 3 se hace una ilustración de las variables que comprenden la Ecuación 1³⁷ 38..

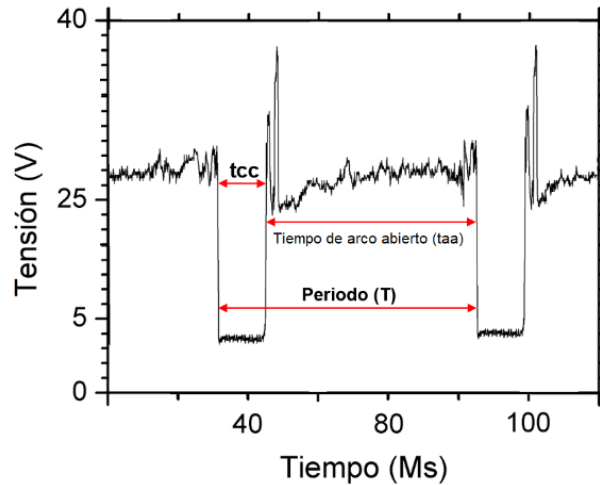
$$t_{cc} = T - t_{aa} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$F_{cc} = \frac{t_{cc}}{T} * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

³⁷ ARAÚJO BATISTA L.,

³⁸ MODENESI P. J., MONTEIRO M. C., SANTANA I. J., and PEREIRA J. P., "Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito," Soldag. Inspeção, vol. 16, no. 1, pp. 12–21, 2011

Figura 3. Oscilograma de corto-circuito.



En la tabla del Anexo G, se muestran los datos obtenidos del programa SINAL, por medio de las señales recolectadas de las soldaduras del proceso GMAW convencional, emitidas en forma de oscilogramas (Ver en Anexo J) por este programa. Después del análisis de los oscilogramas y de los valores obtenidos de esta tabla, se pudo ver que para el valor de 170 amperios [A], hay una clara presencia de transferencia por corto circuito; esto no quiere decir que este proceso no se encuentre acompañado de metal transferido por vuelo libre, el cual tendría lugar entre un corto y el suceso del siguiente (arco en abierto). Observando el valor de Fcc obtenido (4,7%) y comparándolo con el alcanzado en un proceso de corto-circuito realizado por Ferreira Neto³⁹, quien consiguió un valor de 8,6% con el mismo material base utilizado en este trabajo, da cierto respaldo a lo planteado anteriormente, teniendo en cuenta que la distancia del tubo de contacto utilizada en este trabajo es mucho mayor a la utilizada por Ferreira, lo que jugaría un papel muy importante, ya que es mayor el desplazamiento que realiza el alambre electrodo, así como mayor la tensión del sistema, lo que puede terminar en un desprendimiento de las gotas antes de ocasionarse un corto. Por esto mismo, fue en éste valor de corriente donde se presentó la mayor reducción en la tensión

³⁹ FERREIRA NETO J. R., BAHIA LOPES P., APOLINÁRIO E. R., and MODENESI P. J., Op. Cit.

promedia del arco, ya que, al presentarse corto circuito en el sistema, la longitud del arco disminuye hasta que el electrodo choca con la placa metálica, lo que genera una disminución significativa en el valor promedio de este potencial.

Para el valor de 180 [A], se evidenció una disminución en el Fcc, en comparación con el presentado en 170 [A], lo que indica un aumento en la transferencia metálica por vuelo libre, que se deduce es de tipo globular. Siguiendo, con una corriente de 190 [A], encontramos un proceso gobernado por una transferencia de tipo globular con un Fcc muy cercano a cero, tal que, en el rango analizado de 10 segundos en promedio, el programa SINAL solo detectó 12 eventos que etiquetó como cortos, pero que se podrían asociar con un diámetro de gota muy grande y un desprendimiento de la misma aún muy lento, que deja como resultado un contacto con el charco de fusión antes de ésta desprenderse por completo del electrodo. Este valor se tomó como uno de los tres a utilizar en las soldaduras con el proceso A-GMAW, teniendo en cuenta que se buscaba un valor levemente por encima de condiciones con corto-circuito, uno en globular próximo a la región de transición (globular-spray), y uno de tipo spray, que se evidencian en el Anexo G resaltados de color amarillo.

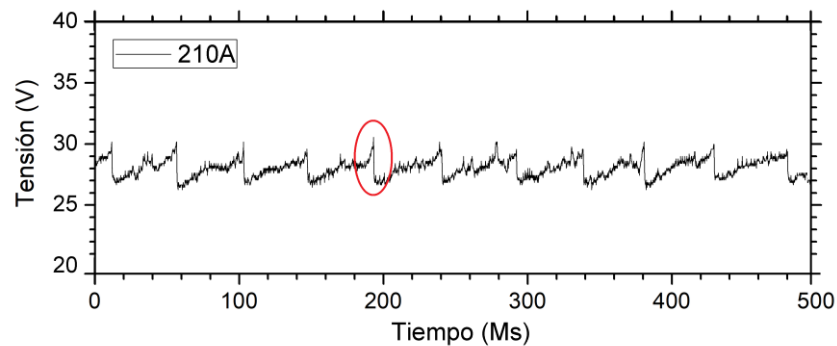
Al remitirse al Anexo J, se puede ver cómo con el aumento de la corriente, la tensión se va comportando cada vez más estable, esto debido al tipo de transferencia que se va presentando, pues a medida que el metal va dejando de transferirse por contacto con el pozo de fusión y comienza el desprendimiento de gotas, que con el incremento de la corriente se van haciendo cada vez más pequeñas y con una mayor velocidad de deposición, va generando que la longitud del arco se torne más constante, debido a que la punta del electrodo no alcanza a desplazarse hasta el charco de fusión, cuando ya ésta se ha fundido (aumento en la velocidad de fusión) y esto se refleja en una tensión más estable, que podemos comprobar con la disminución del desvío estándar (S) de la tensión, mostrado en el Anexo G.

Para tener una mayor certeza de qué tipo de transferencia se estaba llevando a cabo en cada una de las corrientes, se analizaron varios aspectos durante y después del proceso; entre los analizados durante el proceso estuvieron la proyección del arco, con el que podíamos ver qué tan estable se hacía la longitud del mismo, lo que nos servía de referencia; al igual que el sonido emitido por cada soldadura, que se asociaba a los predeterminados para cada tipo de transferencia. Otro método indirecto utilizado después del proceso, fue el análisis de los oscilogramas tanto estadísticamente (representado en los Anexos G, H y I), como por observación del mismo gráfico, para lo cual se tuvo en cuenta lo expuesto por Modenesi y Herschel B⁴⁰ ⁴¹, quienes estiman que en la transferencia de tipo globular hay un desprendimiento de decenas de gotas/segundo; y para la de tipo spray, esta razón aumenta a centenas de gotas/segundo. Dichos desprendimientos de gotas se pueden evidenciar en el oscilograma de la figura 4, con los picos de tensión (círculo rojo), que están acompañados de una leve caída de este parámetro, que estaría reflejando el crecimiento de la gota de forma longitudinal, antes de desprenderse del electrodo. Si se realiza un conteo de estos picos o caídas de tensión en la figura 4, se podría decir que hubo una deposición de alrededor de 22 gotas/segundo en la soldadura del proceso GMAW convencional de 210 [A], catalogando a ésta como una transferencia de tipo globular. La homogeneidad de los picos o caídas de tensión, es un punto de referencia a tener en cuenta al momento de catalogar los modos de transferencia que gobiernan el proceso. Es por esto que, las soldaduras de 215, 220 y 225 [A] (mostradas en el anexo J), fueron clasificadas como de transición, por presentar una variación en la tendencia de las caídas de tensión y picos del oscilograma (menos homogeneidad en el oscilograma).

⁴⁰ MODENESI P. J. and QUEIROZ BRACARENSE A., Op. Cit.

⁴¹ ASM INTERNATIONAL, Op. Cit.

Figura 4. Oscilograma de tensión emitido por el programa SINAL, para 210 [A] en GMAW convencional.



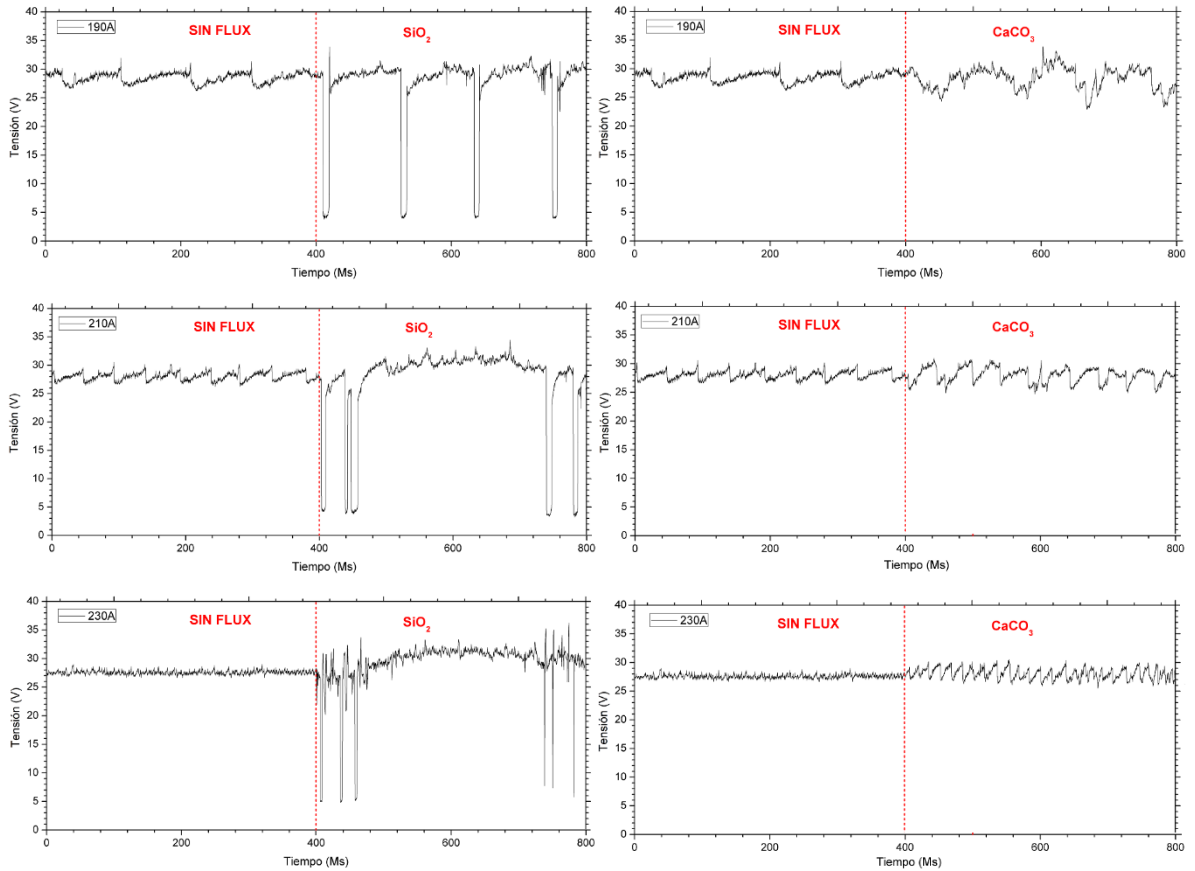
En los Anexos H e I, se pueden ver los resultados obtenidos del proceso A-GMAW, para los tres valores de corriente escogidos, con flux de SiO_2 y CaCO_3 , respectivamente. En ambas tablas se registraron los datos correspondientes a las señales antes de entrar en la zona con flux y dentro de ésta. De este modo se puede apreciar, que para las señales del valor de 190 [A] sin flux, se presenta el mismo fenómeno ya descrito en el análisis anterior para este valor. Igualmente, estos valores se encuentran respaldados por sus respectivos oscilogramas, con los que se elaboró la figura 5, que hace una comparación del comportamiento de la tensión sin flux, respecto a la conducta con flux, para cada uno de los tres valores de corriente.

En los oscilogramas correspondientes al compuesto de SiO_2 (figura 5), se puede observar cómo después de que el arco entró en la zona con flux, se volvieron a presentar corto-circuitos en los tres valores de corriente, siendo el valor de 190 [A] el que mayor F_{cc} presenta, al igual que una frecuencia muy similar a la presentada por el valor de 170 [A] sin flux, como lo muestra el Anexo H. Esto muestra, que el proceso ha vuelto a ser gobernado en gran parte por la transferencia de tipo corto-circuito.

A pesar de que los valores 210 y 230 [A], tienen F_{cc} similares a los de 170 [A] sin flux, y frecuencias de transición parecidas, en ocasiones mayores que las presentadas en los 190 [A] con flux, no se podría afirmar que, en dichos procesos, se está presentando la misma estabilidad y gobernabilidad por parte del cortocircuito, debido a que estos aspectos se definen por medio del cálculo del desvío estándar (S) del periodo y el análisis visual de los oscilogramas.

En este caso, para la corriente de 230 [A] el periodo tiene un desvío de 0,0973 [s], mayor que su propio periodo promedio, en comparación con un desvío de 0,0467 [s] presentado por los datos del valor de 190 [A], que en otras palabras se traduce en mayor homogeneidad en los tiempos de sucesos de los cortos. Si se observa la figura 5, se podrá ratificar como para los valores de 210 y 230 [A], se encuentran regiones más amplias donde la transferencia estuvo gobernada por los métodos de vuelo libre; así como se ve en algunos casos un tiempo de corto muy reducido, lo que hace pensar que se puede estar presentando el mismo fenómeno de la gota que toca el charco de fusión, instantes antes de desprenderse, teniendo en cuenta que la longitud de arco se hizo más pequeña; situación que podría respaldar esta hipótesis.

Figura 5. Oscilogramas comparativos del proceso GMAW convencional y el A-GMAW



Para el caso del CaCO₃, ninguna de las soldaduras con el flux presentó algún tipo de corto; esto también puede estar relacionado con que el valor de la longitud del arco eléctrico presente aquí fue mucho mayor, lo que hace más difícil el acontecimiento de un corto-circuito como tal o de un choque de la gota antes de desprenderse del electrodo. Aun así, se vio una alteración en las señales de la tensión (figura 5), lo que podría estar asociado con el incremento de CO₂ al gas protector, proveniente de la descomposición del flux. Este aumento estaría originando una fuerza de repulsión mayor en la transferencia metálica, lo que ocasionaría una demora en el desprendimiento de la gota y por ende un aumento

de su tamaño, generando cierto retraso en el método de transferencia en cuanto a los valores de corriente para el tipo spray^{42 43}.

Teniendo en cuenta los Anexos G, H, e I, se realizó un análisis comparativo de la velocidad de alimentación y de la longitud del arco eléctrico, como se muestra en las Figuras 6, 7 y 8.

En la figura, se puede apreciar de forma muy clara, cómo se presenta un incremento de la velocidad de alimentación a medida que se aumenta la corriente del proceso. Esto tendría una explicación, que consiste en que cuando se aumenta la corriente, la velocidad con la que se funde el electrodo se hace mayor, lo que obliga al sistema a enviar más alambre-electrodo (aumentar la velocidad de alimentación a través de la tensión de referencia) para de este modo compensar el alambre fundido y poder mantener la longitud de arco (6mm) constante.

Para poder entrar analizar comparativamente la velocidad de alimentación en el proceso GMAW convencional vs el A-GMAW, es conveniente primero ver lo sucedido con la longitud del arco en estos dos procesos. Para esto, se puede observar la figura 7, donde tenemos como punto de referencia la longitud del arco en el proceso GMAW convencional, la cual se mantuvo constante (6mm) después del ajuste realizado. Partiendo de allí, se observa cómo en presencia del CaCO_3 , la longitud del arco tuvo un incremento notable y aún más sobre el último valor de corriente, lo que intuitivamente hace pensar en principio, que hubo una disminución en la velocidad de alimentación. Por el contrario, en presencia del SiO_2 , el arco se tornó más pequeño longitudinalmente, haciéndose más notable en el valor de 190 [A], y esto haría creer que hubo una mayor velocidad de alimentación, en comparación con la velocidad de fundición del alambre. Sin embargo, dichas

⁴² ARAÚJO BATISTA L., Op. Cit.

⁴³ ARAÚJO BATISTA L., BRITO L., MADARIAGA C. H., AZEVEDO M., and MODENESI P. J., "Efeito do Uso de CaCO_3 como Fluxo Ativo no Modo de Transferência Metálica," CONSOLDA – Congr. Nac. Soldag., vol. XLIII, 2017

disminuciones en la velocidad tendrían que ser mínimas, pues en el proceso no se modificó este parámetro (tensión de referencia), lo que haría que el sistema intente siempre enviar la misma cantidad de alambre por unidad de tiempo. Esto último es verificado por medio de la figura 8, que muestra las mínimas variaciones, respecto al ajuste hecho en la velocidad de alimentación para cada operación.

Figura 6. Variación de la velocidad de alimentación del electrodo en el proceso GMAW convencional.

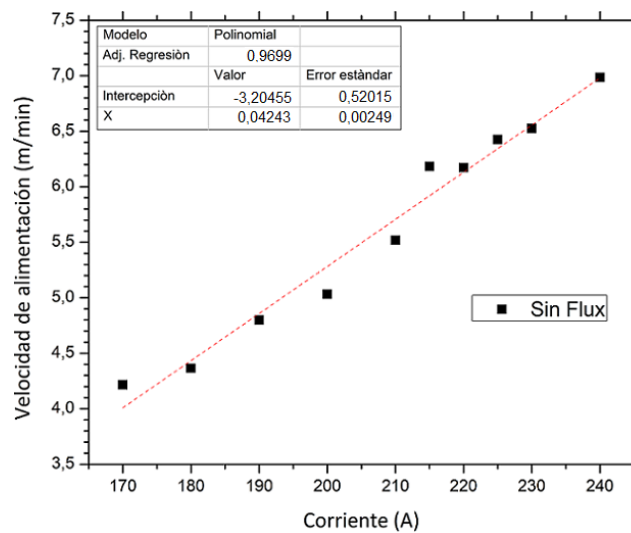


Figura 7. Gráfico comparativo de la longitud de arco eléctrico de los procesos GMAW convencional y A-GMAW.

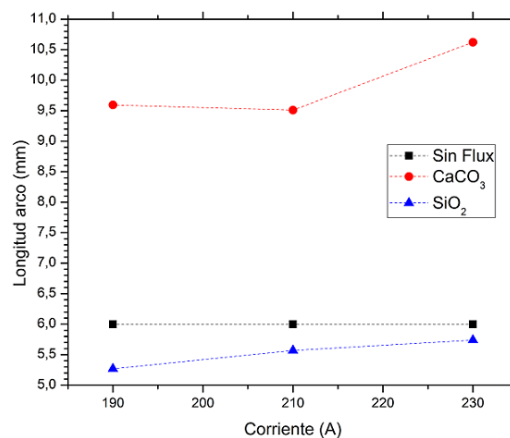
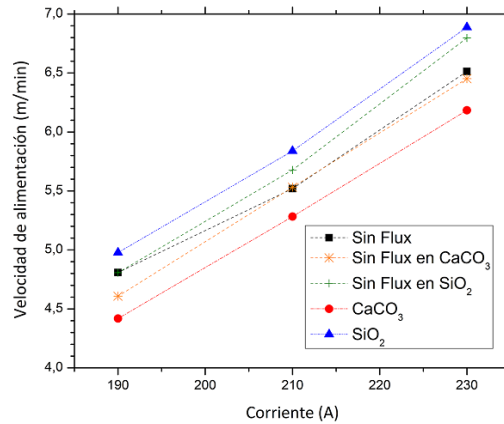


Figura 8. Gráfico comparativo de la variación de velocidad de los procesos GMAW convencional y A-GMAW.



De esta manera se puede suponer entonces, que las variaciones se presentan en la tasa de fusión del electrodo, debido a las modificaciones que se estarían presentando en el gas de protección, por la descomposición de los flux activos y la mezcla de estos con el gas protector.

Para el caso específico de CaCO₃, la atmósfera protectora puede estar sufriendo un aumento del tenor de CO₂, derivado de la descomposición térmica del flux de carbonato de calcio ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), que aunque llevaría a un incremento mínimo en el porcentaje de dióxido de carbono en la composición del gas protector ($\approx 1\%$)⁴⁴, éste podría estar influenciando en el perfil del arco. Lo anterior, debido a que el CO₂ posea alta energía de disociación/ionización y elevada conductividad térmica, lo que estaría relacionado con el incremento de la longitud del arco, ya que ocasionaría una mayor tasa de fusión del electrodo y por ende, una reducción en el Stick-out (alambre-electrodo, sobresaliente de tubo de contacto) Ver figura 7.

⁴⁴ Ibíd.

4.2 ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LOS FLUX, EN LA MORFOLOGÍA DEL CORDÓN DE SOLDADURA.

En primer lugar, se realizó una comparación visual de la forma y tamaño de los cordones de soldaduras. Esto se puede visualizar en el Anexo F, donde se ve cómo el cordón en la zona con flux (SiO_2) se tornó menos homogéneo en su ancho; igualmente sucedería con el flux de CaCO_3 . Para dicho efecto se tendría varias hipótesis, basadas en la homogeneidad y continuidad del flux en el área. En primer lugar, se piensa que pudo no haber un esparcimiento homogéneo del flux en la zona aplicada, lo cual conllevaría a una variación en la densidad de éste, y por ende, una diferencia en el efecto del mismo. De igual forma podría haber sucedido que dicho flux hubiese sido retirado de la zona por medio de las fuerzas de soplo del gas protector o del plasma del arco eléctrico, teniendo en cuenta que para la deposición del flux no se utilizó ningún adherente, lo que haría que dicho flux, pudiera ser removido con facilidad. Por último, se sabe que por las altas temperaturas que envuelven el proceso, ocurre una evaporación del flux, lo que podría estar sucediendo mucho antes de que el charco de fusión tocara el flux, disminuyendo de este modo la densidad del mismo.

Para poder hacer una mejor comparación del ancho de los cordones, se tomaron mediciones por medio de un calibrador y se analizaron las macrografías de los perfiles (Figura 9), de las que se obtuvo la tabla del Anexo K, de donde se derivaría la Figura 10, que nos muestra como la constricción del ancho del cordón fue de cierto modo muy similar para las soldaduras con flux, pero muy angostas comparadas con las realizadas sin flux. Concluyendo que el cordón obtenido usando SiO_2 es más angosto, a medida que aumento la corriente, en comparación con el CaCO_3 .

Figura 9. Macrografía de los perfiles de los cordones de soldadura.

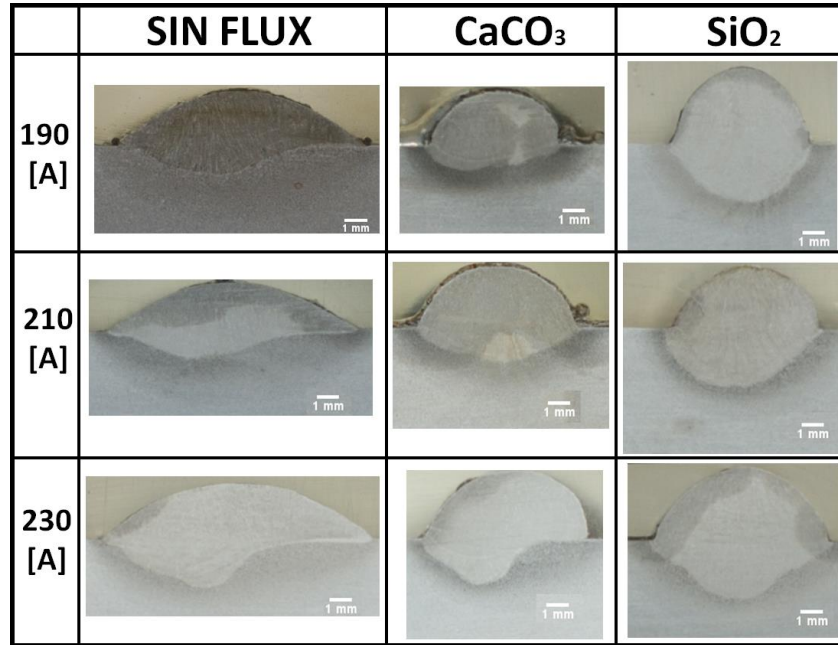
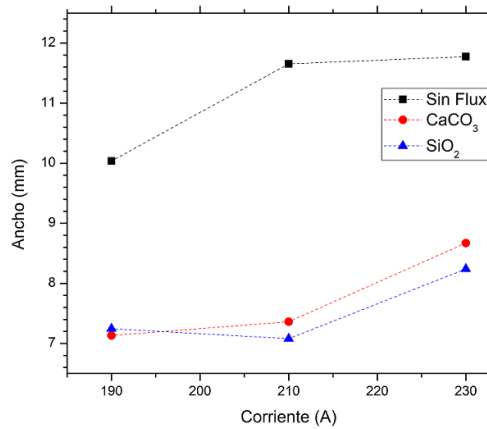


Figura 10. Gráfico comparativo de la variación del ancho del cordón respecto al proceso GMAW convencional y A-GMAW.



En la tabla del Anexo K también se consignó el valor del área del perfil de la Zona Fundida (ZF), para lo cual se utilizó la Ecuación 3, donde G es el área, S la velocidad de alimentación, d el diámetro del electrodo y R la velocidad de soldadura⁴⁵. Al

⁴⁵ ASM INTERNATIONAL Op. Cit.

analizar ésta ecuación, se observa que esta, se encuentra únicamente regida por la velocidad de alimentación (**S**), debido a que todas las otras variables se mantendrán constantes y por ende, se puede predecir el resultado de estos valores, observando de nuevo las gráficas de las Figuras 6 y 8, ya que tomarían el mismo comportamiento. Al ver la tabla del Anexo K y las Figuras 6 y 8, se puede decir que hubo un aumento proporcional de la deposición de material, respecto a la velocidad de alimentación, siendo entonces, el SiO₂ el que mayor área presentó y el CaCO₃ el de menor.

$$G = \frac{S \pi d^2}{R \ 4}$$

Ecuación 3.

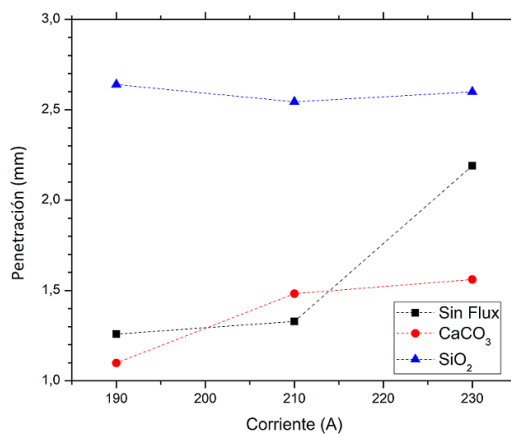
De las macrografías obtenidas de los cordones (figura 9), se analizaron otros aspectos que definen su morfología, como lo es la penetración del material depositado y de quien se pudo observar una variación significativa, que se representó por medio de un gráfico comparativo como se ve en la figura 11, donde se aprecia como la penetración conseguida con el flux SiO₂ fue mucho mayor que la adquirida sin ningún tipo de flux. Así como con el compuesto de CaCO₃, éste valor se hizo en promedio menor que el de las soldaduras de referencia, solo excediéndola por 0,15 mm en la corriente de 210 [A].

Estas variaciones de profundidad y forma del perfil, son igualmente asociadas con los usos de los gases de protección por muchos autores. Es por eso, que para el caso del CaCO₃ que se supone altero esta variante, generando una mayor longitud de arco, que acabo en un desprendimiento de la gota desde una distancia mayor y por ende en una pérdida de calor en el viaje de la misma, de tal manera que, al llegar a la piscina de metal, se manifestaría en una menor penetración. De igual forma como se planteó en un análisis anterior para este flux, el aumento de las fuerzas de repulsión estaría ocasionando un crecimiento de la gota y esto retardaría

la deposición de la misma, viéndose reflejada tanto en el área del perfil, como en la penetración, pues al hacerse mayor la gota y más lenta la deposición, tendría un menor impacto en el charco que cuando se envían en forma de rocío.

Ahora, en cuanto al flux de SiO_2 , que también presentaría cierta descomposición de oxígeno hacia la atmosfera protectora, al igual que para el charco de fusión, lo que estaría generando en éste último, el llamado efecto Marangoni, que prevalece en los flux a base de oxígeno, justificando así, los grandes valores en la penetración ⁴⁶
⁴⁷.

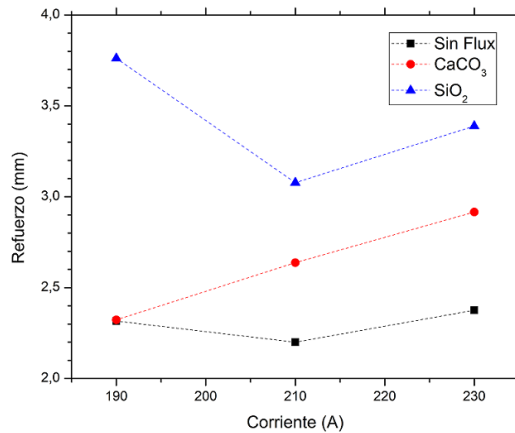
Figura 11. Gráfico comparativo de la penetración de las soldaduras en el proceso GMAW convencional y A-GMAW.



⁴⁶ MODENESI P. J., Op. Cit.

⁴⁷ PATEL K. R., CHOUDHARY A. B., and PATEL T. M., Op. Cit.

Figura 12. Gráfico comparativo del refuerzo de la soldadura en el proceso GMAW convencional y A-GMAW.



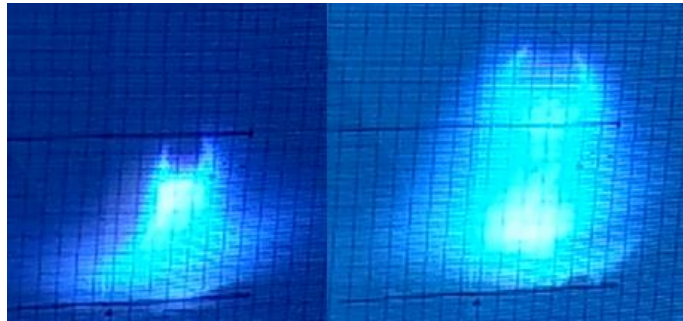
Por último, observando la figura 12 y relacionándola con todo lo analizado, se concluye que el elevado refuerzo en el cordón de SiO₂ está asociado de igual forma con la mayor deposición de metal y en el mismo efecto Marangoni, que no permitió que el metal se expandiera a lo ancho de la placa. Por otro lado, el CaCO₃, al tener una penetración tan baja, terminó generando un refuerzo elevado con todo aquel material que no penetró en el metal.

4.3 ANÁLISIS VISUAL DEL ARCO ELÉCTRICO.

La variación de la longitud del arco eléctrico, no fue el único aspecto analizado por medio de la proyección del arco. Con este sistema se busca también, encontrar una variación en la constricción del arco, como se plantea en los antecedentes y de igual forma, un cambio en la iluminación de éste. Es así como al grabar lo proyectado en la pantalla del sistema, se pudo analizar a más baja velocidad lo sucedido, y se capturó la Figura 13, donde se puede apreciar el aumento de la longitud del arco para ese proceso específico, así como una mayor iluminación del arco, la cual se evidenció en todas las soldaduras con el proceso A-GMAW, y fue siempre mayor

en el centro del arco, siendo más notorio con el flux de CaCO_3 . Otros autores^{48 49} presenciaron un tipo de deflexión del arco al entrar en la zona con flux, al hacer un proyección y análisis similar a éste, cosa que no se logra observar desde estas capturas. Así como tampoco fue posible comprobar el efecto de constricción del arco, debido al aumento en la luminosidad. Sería necesario pues una filmación de alta velocidad para poder asegurar la existencia o no de dicho efecto.

Figura 13. Captura del arco eléctrico proyectado en el proceso GMAW convencional y A-GMAW con CaCO_3 a una corriente de 190 [A].



Los flux utilizados son formados por elementos fácilmente ionizables. Estos serían indicios de la presencia de vapores metálicos en el arco eléctrico, lo que llevaría a un aumento de la luminosidad. Para el caso concreto del CaCO_3 captado en la figura 13, se le adjudicaría dicho aumento de la iluminación a los cationes de calcio desprendidos del flux, los cuales estarían favoreciendo la emisión de radiación del arco^{50 51 52}.

⁴⁸ ARAÚJO BATISTA L., Op. Cit.

⁴⁹ ARAÚJO BATISTA L., BRITO L., MADARIAGA C. H., AZEVEDO M., and MODENESI P. J., Op. Cit.

⁵⁰ ARAÚJO BATISTA L., Op. Cit.

⁵¹ ARAÚJO BATISTA L., BRITO L., MADARIAGA C. H., AZEVEDO M., and MODENESI P. J., Op. Cit.

⁵² MURPHY A. B., "The Effects of Metal Vapour in Arc Welding," 19th Symp. Phys. Switch. Arc 2011, FSO 2011, 2011

5. CONCLUSIONES

Del presente trabajo acerca de los efectos ocasionados por los flux activos de SiO_2 y CaCO_3 , sobre soldaduras GMAW en un acero AISI/SAE 1020, se concluyó que:

- Al realizar el análisis de los datos obtenidos del programa SINAL, por medio de oscilogramas, se pudo concluir que tanto el SiO_2 como el CaCO_3 ocasionaron una variación en el método de transferencia metálica, generando alteraciones en la tensión del proceso.
- Se observaron transferencias de metal por medio de corto-circuito con la utilización de SiO_2 ; por el contrario, al implementarse el flux de CaCO_3 se desaparecieron los corto-circuitos ocasionales presentes en los valores de corriente de 190[A], en el proceso convencional.
- Se presentó un incremento de la velocidad de alimentación al tratar de mantener constante la longitud del arco, mientras se aumentaba la corriente en el proceso GMAW convencional. Este incremento se mantuvo sin variaciones notables en el proceso A-GMAW ya que no se volvió a regular la longitud del arco.
- Se asociaron las desviaciones de la longitud del arco, a efectos ocasionados con la variación de la composición de los gases protectores, por causas de una descomposición de los flux, concluyendo de este modo, que los compuestos de SiO_2 y CaCO_3 afectan la atmósfera protectora.
- Con la aplicación de los flux, se presentaron variaciones significativas en las características geométricas del cordón, como penetración, ancho y refuerzo, al ser comparadas con las obtenidas en el proceso GMAW convencional.
- Con la utilización del flux de SiO_2 , se obtuvo una mayor penetración respecto al proceso convencional, y con el flux de CaCO_3 se consiguieron resultados complementemente inversos.

- El ancho del cordón se mostró más angosto para ambos flux en comparación con el proceso convencional y se observó una alteración en el mismo, que se asoció a unas diferencias en la densidad del flux en la zona esparcida.

6. RECOMENDACIONES

Para lograr unos resultados más precisos en cuanto a los efectos ocasionados por los flux de SiO_2 y CaCO_3 en el proceso de soldadura GMAW, se recomienda:

- Realizar de nuevo las soldaduras de este trabajo, pero esta vez, ensamblando en el diseño del sistema, la filmación del arco directamente, a través de una cámara de alta velocidad, para de este modo evidenciar exactamente los tipos de transferencia, así como comprobar si existe o no constricción y deflexión del arco eléctrico en presencia de los flux.
- Evaluar la microestructura y sus propiedades en la zona fundida y afectada por el calor de las soldaduras.
- Efectuar soldaduras con el proceso evaluado en este trabajo, para luego realizarles ensayos mecánicos.

BIBLIOGRAFIA

ARAÚJO BATISTA L., BRITO L., MADARIAGA C. H., AZEVEDO M., and MODENESI P. J., “Efeito do Uso de CaCO₃ como Fluxo Ativo no Modo de Transferência Metálica,” CONSOLDA – Congr. Nac. Soldag., vol. XLIII, 2017.

ARAÚJO BATISTA L., Soldagem MIG / MAG com fluxo ativo do aço inoxidável austenítico AISI 304L (DISSERTAÇÃO DE MESTRADO). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ASM INTERNATIONAL, METALS HANDBOOK - WELDING BRAZING AND SOLDERING, VOL. 6. 1993.

ASTM International, E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA, USA, 2017.

BRITO L., Análise da influência dos fluxos sio₂ e caco₃ sobre a geometria do cordão em soldagem A-GMAW (Dissertação de Pregrado). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

COLEN NETO P., Efeito da concentração do fluxo na soldagem atig de aço inoxidável austenítico (dissertação de mestrado). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

COSTA T. F., FILHO E. B., AREVALO H. D. H., and OLIVEIRA VILARINHO L., “Avaliação de processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único,” Soldag. e Insp., vol. 17, no. 4, pp. 356–368, 2012.

FAN D., ZHANG R., GU Y., and USHIO M., “Effect of Flux on A-TIG Welding of Mild Steels,” Trans. JWRI, vol. 30, pp. 35–40, 2001.

FERREIRA NETO J. R., BAHIA LOPES P., APOLINÁRIO E. R., and MODENESI P. J., “Uma avaliação da soldagem MIG/MAG com fluxos,” An. do XLII CONSOLDA – Congr. Nac. SOLDAGEM, Belo Horizonte, Assoc. Bras. Soldag., 2016.

FERREIRA NETO J. R., Estudo do efeito de fluxos em aspectos operacionais da soldagem mig/mag (DISSERTAÇÃO DE MESTRADO). Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

GOIS LUCIANO DE AZEVEDO A., FERRARESI V. A., and PEREIRA FARIAS J., “uma revisão sobre o processo de soldagem A-TIG,” 16° POSMEC. FEMEC/UFU, 2006.

HOWSE D. and LUCAS W., “Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding,” Sci. Technol. Weld. Join., vol. 5, no. 3, pp. 189–193, Jun. 2000.

HUANG H.-Y., “Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding,” Mater. Des. v. 31, pp. 2488–2495, 2010.

LINCOLN ELECTRIC, “Arame MIG/MAG para soldagem - Aço Carbono, Alumínio, Baixa Liga, Inoxidáveis e Ligas de Níquel,” LINCOLN ELECTRIC. [Online]. Available: <http://www.lincolnelectric.com.br/consumiveis/aramesolido/merit-s-6-er70s-6>. [Accessed: 07-Jun-2018].

LINCOLN ELECTRIC, Gas Metal Arc Welding. Cleveland, OH, U.S.A: Lincoln Global Inc., 2014.

LRSS and Modenesi P. J., “Manual Programa Sinal.” Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

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.

MODENESI P. J., “A química da formação do cordão na soldagem TIG,” Soldag. e Insp., vol. 18, no. 3, pp. 287–300, 2013.

MODENESI P. J., APOLINÁRIO E. R., and PEREIRA I. M., “TIG welding with single-component fluxes,” J. Mater. Process. Technol., vol. 99, no. 1, pp. 260–265, 2000.

MODENESI P. J., Física do Arco Elétrico Soldagem I. Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MODENESI P. J., MONTEIRO M. C., SANTANA I. J., and PEREIRA J. P., “Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito,” Soldag. Inspeção, vol. 16, no. 1, pp. 12–21, 2011.

MURPHY A. B., “The Effects of Metal Vapour in Arc Welding,” 19th Symp. Phys. Switch. Arc 2011, FSO 2011, 2011.

PATEL K. R., CHOUDHARY A. B., and PATEL T. M., “Parametric optimization of gas metal arc welding process using activated flux on en 8 by taguchi method : A Review,” pp. 1–6, 2014.

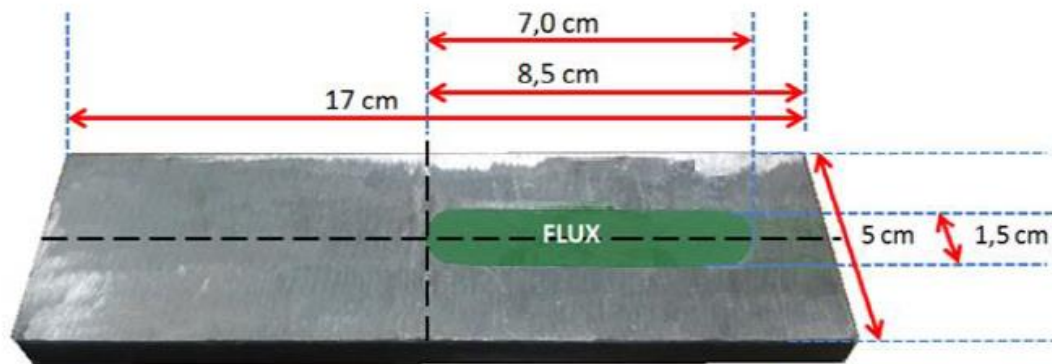
QUEIROZ BRACARENSE A., “Gas Metal Arc Welding 2.2.,” Infosolda, 2003. [Online]. Available: <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/423-gas-metal-arc-welding.html>. [Accessed: 09-Jun-2018].

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.

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.

ANEXOS

Anexo A. Dimensiones de la chapa metálica utilizada⁵³.



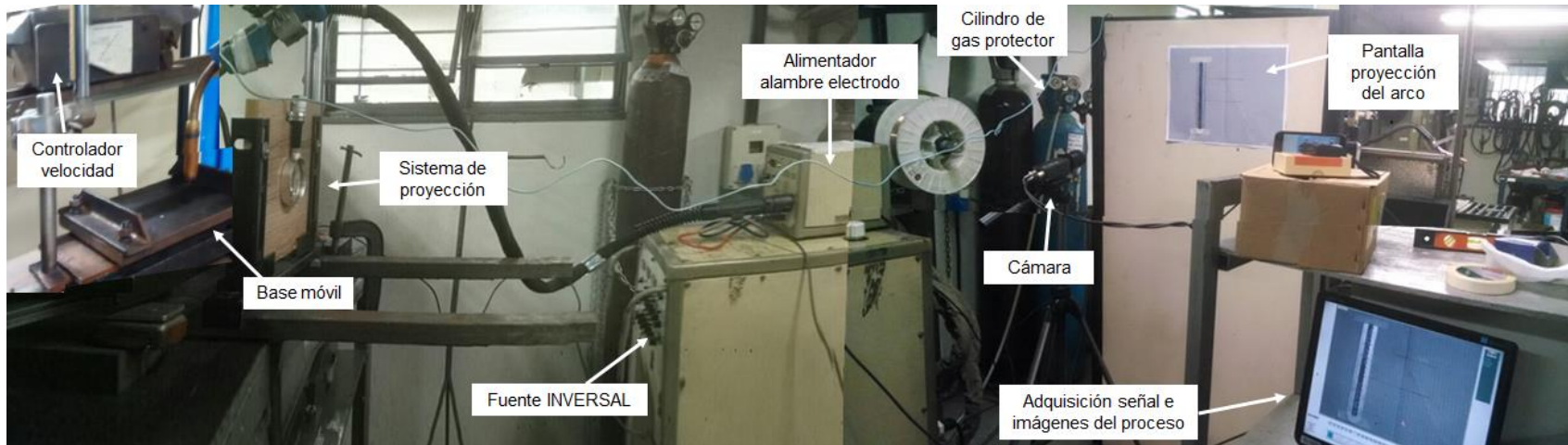
⁵³ FERREIRA NETO J. R., Op. Cit.

Anexo B. Composição química del alambre-electro AWS A5.18 - ER70S6.⁵⁴

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

⁵⁴ LINCOLN ELECTRIC, "Arame MIG/MAG para soldagem - Aço Carbono, Alumínio, Baixa Liga, Inoxidáveis e Ligas de Níquel," LINCOLN ELECTRIC. [Online]. Available: <http://www.lincolnelectric.com.br/consumiveis/aramesolido/merit-s-6-er70s-6>. [Accessed: 07-Jun-2018]

Anexo C. Montaje del sistema de operacional



Anexo D. Parámetros fijos del proceso de soldadura A-GMAW.

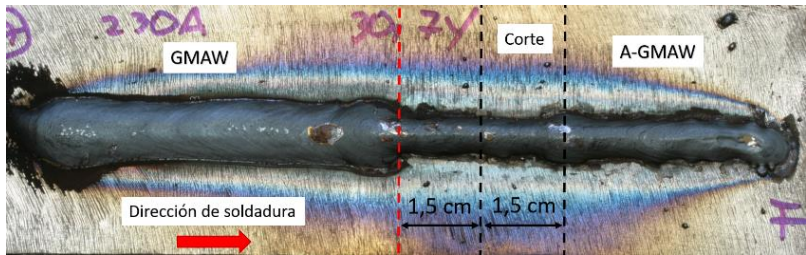
PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN	
	Mínimo	Máximo
Corriente transferencia globular	190 [A]	210 [A]
Corriente transferencia spray	230 [A]	
Modo de operación de la fuente y tipo de corriente	Corriente continua (CC+)	
Velocidad de soldadura	40 [cm/min]	
Electrodo (alambre)	ER70S6 – 1,2 [mm]	
Gas de protección	Ar - 4%CO2	
Caudal de gas	19 [L/min]	
Longitud del arco en la región sin flux	6 [mm]	
Distancia arco – lente	170 [mm]	
Distancia lente – pantalla de proyección	2010 [mm]	
Orientación del electrodo	Perpendicular	
Tipo de Corriente	Continua (CC+)	
Distancia de la punta de contacto a la pieza	25 [mm]	

Fuente: Adaptada de Ferreira Neto. [18]

Anexo E. Divisiones de corte del cordón de soldadura de 230[A] sin flux.



Anexo F. Divisiones de corte del cordón de soldadura de 230[A] con flux de SiO_2



Anexo G. Valores de las señales del proceso GMAW convencional.

I (A)	Tensión (V)		Corriente (A)		Vel. Alimentación (m/min)		Tiempo (s)			Fcc (%)	Frecuencia de Transferencia (Hz)	Observaciones de modo transferencia
	\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S	Período	Arco	Corto			
170	25,3	4,9	171,8	0,4	4,2	0,20	0,086	0,082	0,0040	4,7	11,7	Cortos C. y globular
180	26,4	4,2	180,6	0,5	4,4	0,28	0,144	0,140	0,0043	3,0	7,0	Cortos C. y globular
190	28,2	1,9	190,3	0,5	4,8	0,16	0,652	0,649	0,0027	0,4	1,5	Globular
200	28,6	1,8	199,9	0,5	5,0	0,17	-	-	-	-	-	Globular
210	28,0	0,8	211,2	0,4	5,4	0,08	-	-	-	-	-	Globular
220	27,5	0,6	219,7	0,1	6,2	0,09	-	-	-	-	-	Transición
230	27,6	0,4	229,2	0,4	6,5	0,07	-	-	-	-	-	Spray

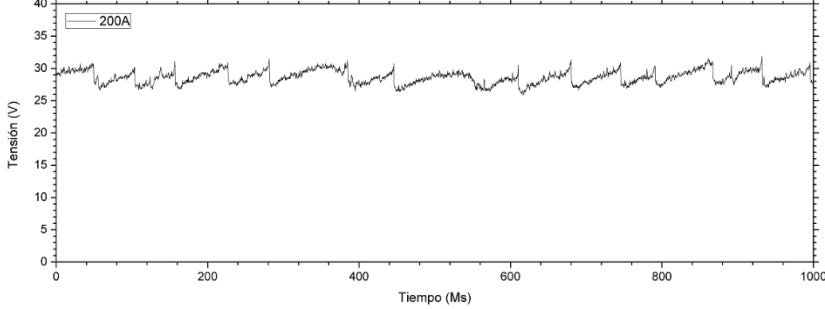
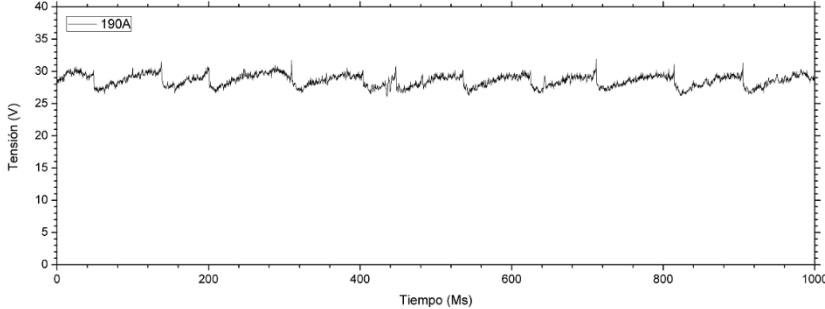
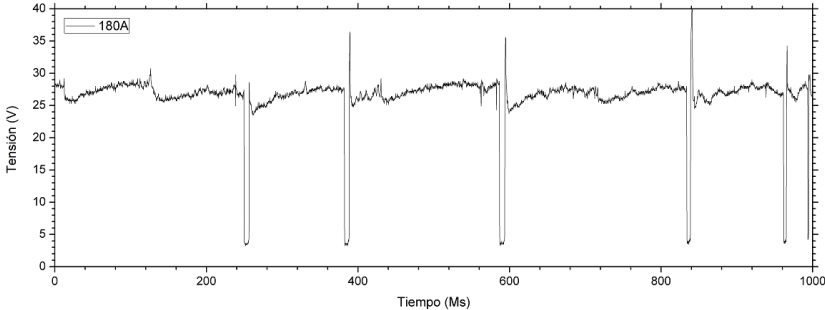
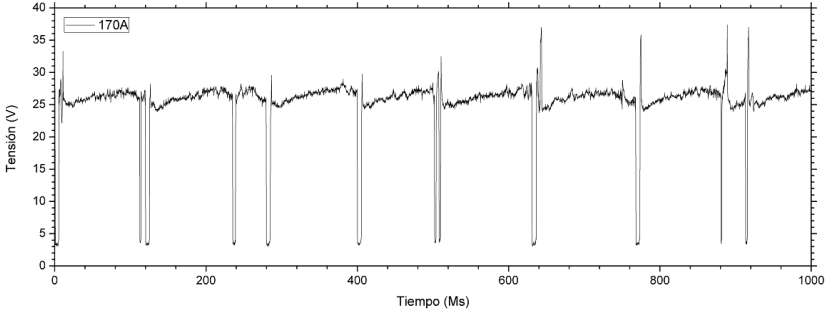
Anexo H. Valores de las señales del proceso A-GMAW con flux SiO₂.

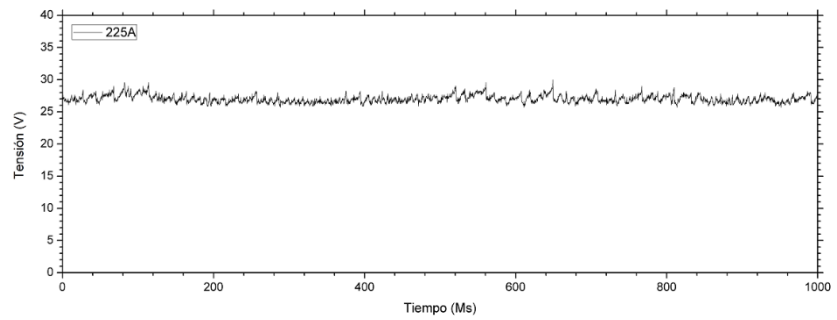
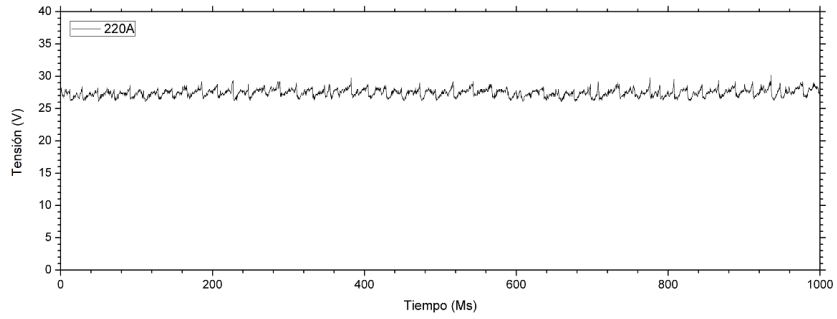
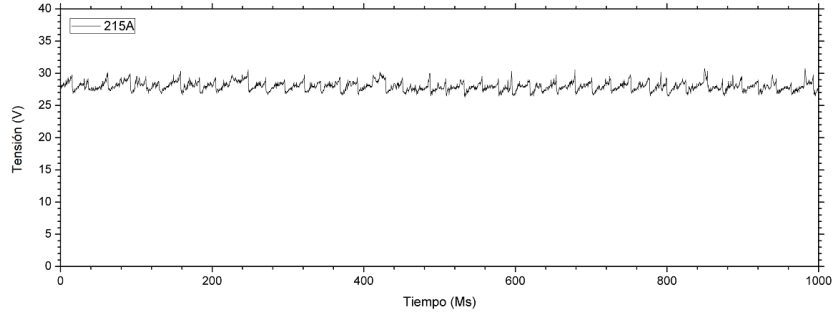
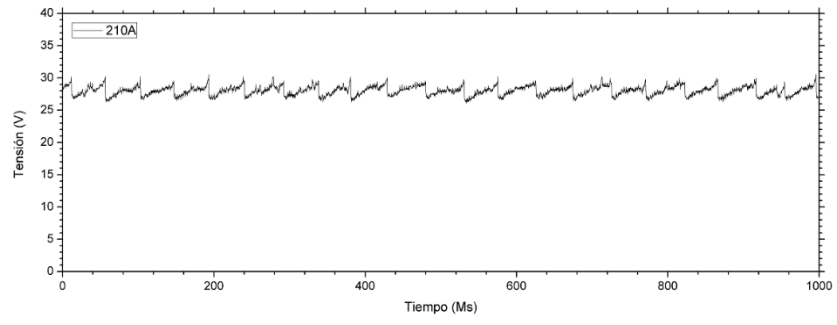
I (A)	Con flux (x)	Tensión (V)		Corriente (A)		Vel. Alimentación (m/min)		Longitud arco (mm)	Tiempo (s)			Fcc (%)	Frecuencia de Transferencia (Hz)	Obsv.
		\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S		Período	Arco	Corto			
190		27,5	2,5	190,4	0,4	4,8	0,16	6,0	0,2914	0,2882	0,0032	1,1	3,6	Globular
	X	27,1	6,5	190,4	0,5	5,0	0,29	5,3	0,0875	0,0810	0,0064	7,4	11,5	Cortos C. y globular
210		28,2	0,8	209,3	0,5	5,7	0,13	6,0	-	-	-	-	-	Globular
	X	28,1	5,2	209,2	0,5	5,8	0,47	5,6	0,1056	0,1010	0,0047	4,5	9,7	Cortos C. y globular
230		27,8	0,5	229,4	0,3	6,6	0,11	6,0	-	-	-	-	-	Spray
	X	27,7	5,2	229,3	0,4	6,9	0,45	5,7	0,0707	0,0672	0,0035	5,0	14	Cortos C. y globular

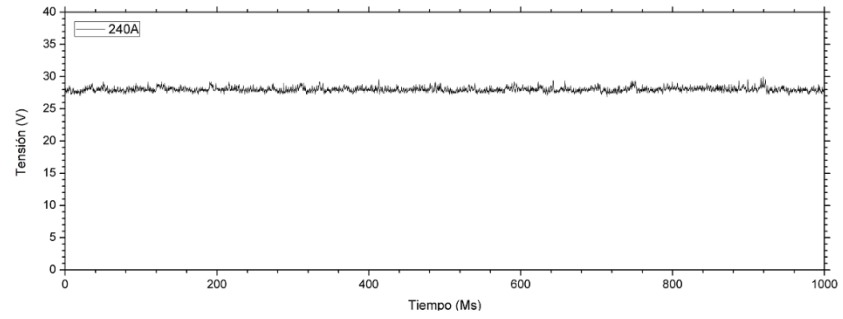
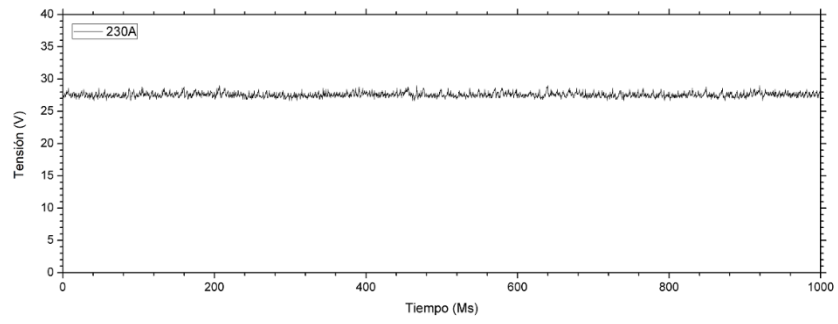
Anexo I. Valores de las señales del proceso A-GMAW con flux de CaCO₃.

I (A)	Con flux (x)	Tensión (V)		Corriente (A)		Vel. Alimentación (m/min)		Longitud arco (mm)	Tiempo (s)			Fcc (%)	Frecuencia de Transferencia (Hz)	Obsv.
		\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S		Período	Arco	Corto			
190		27,9	2,1	190,4	0,5	4,6	0,16	6,0	0,1411	0,1395	0,00160	0,57	1,77	Globular
	X	28,0	1,9	190,3	0,5	4,4	0,25	9,6	-	-	-	-	-	Globular
210		27,8	0,9	209,9	0,4	5,5	0,10	6,0	-	-	-	-	-	Globular
	X	27,7	1,7	209,9	0,4	5,3	0,24	9,6	-	-	-	-	-	Globular
230		28,1	0,5	229,5	0,5	6,5	0,11	6,0	-	-	-	-	-	Spray
	X	28,1	0,9	229,5	0,4	6,2	0,18	10,7	-	-	-	-	-	Globular

Anexo J. Oscilogramas secuenciales del proceso de soldadura GMAW convencional (170[A] a 240[A]).







Anexo K. Datos de la morfología de los cordones de soldadura.

	Morfología cordón (mm)			Área mm ²	
	A	P	R		
190	10,0	1,3	2,3	13,6	
	7,2	2,6	3,8	14,1	
	7,1	1,1	2,3	12,5	
210	11,7	1,3	2,2	15,6	
	7,1	2,5	3,1	16,5	
	7,4	1,5	2,6	14,9	
230	11,8	2,2	2,4	18,4	
	8,5	2,6	3,5	19,5	
	8,7	1,6	2,9	17,5	
	11,2	1,6	2,3	15,9	: MEDIA (\bar{X}) (Sin flux)
	1,0	0,5	0,1	2,5	: DESVIÓ (S) (Sin flux)
	7,6	2,6	3,4	16,7	: MEDIA (\bar{X}) (Con SiO ₂)
	0,8	0,0	0,3	2,7	: DESVIÓ (S) (Con SiO ₂)
	7,7	1,4	2,6	15,0	: MEDIA (\bar{X}) (Con CaCO ₃)
	0,8	0,2	0,3	2,5	: DESVIÓ (S) (Con CaCO ₃)