



Revista

MIDEAHS

“Metodologías en Ingeniería y Desarrollo en la Educación,
Administración, Humanidades y Social”



CIPTUM
2022 REVIEW



Jul-Sep 2024
Vol.1

online ISSN: 3061-7413

Mensaje del editor

La Revista MIDEAHS (Metodologías en Ingeniería y Desarrollo en Educación, Administración, Humanidades y Social) es editada por la Asociación Mexicana en Ciencias de Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. (AMECSMI) y por el Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Morelia bajo la dirección de la **Dra. Patricia Calderón Campos**.

Tiene por interés proporcionar a los investigadores, docentes, alumnos y público interesado, un medio para publicar los resultados de investigaciones científicas, revisiones documentales, avances y desarrollos tecnológicos y de innovación, afines a cualquier ingeniería.

La Revista MIDEAHS mantiene una convocatoria abierta durante todo el año para la recepción de artículos, con cierres trimestrales para la selección de documentos por edición. Los artículos se publican en español o en inglés.

Dentro del alcance (SCOPE) de la revista se encuentran temáticas de procesos y metodologías de las ingenierías, administración, educación, humanidades y social.

Dra. Nereyda Alcantar Mondragón
Editora General

TecNM Campus Morelia



La Dra. Patricia Calderón Campos primer directora del Instituto Tecnológico de Morelia dentro de su trayectoria académica, ha publicado artículos científicos en revistas arbitradas e indexadas nacionales e internacionales.

Su interés por el fortalecimiento de la Educación Superior Tecnológica, la ha llevado a participar en Congresos Nacionales e Internacionales, donde ha fungido como ponente del TecNM.

En el año 2019 obtuvo la distinción de Mujer de Acero, que brinda la empresa ArcelorMittal México, en el ámbito académico, mismo que le fue otorgado por su trabajo y contribución en la sociedad de Lázaro Cárdenas, Michoacán.

Es miembro honorífico de la **Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A. C.** Esto ha llevado a colaborar entre ambas instituciones la realización de eventos de divulgación científica dentro del TecNM campus Morelia, logrando así un beneficio de la cultura científica en el estado de Michoacán.

Comité editorial

Dra. Nereyda Alcantar Mondragón | candidato SNII
Dr. Francisco Reyes Calderón | SNII
Dr. Víctor García García | SNI
Dr. Rogelio Vences Hernández | candidato SNII
Ing. Sarahí Estrada Hernández

Comité revisor

Dra. Patricia Calderón Campos
Dr. Héctor Javier Vergara Hernández | SNII
Dr. Pedro Garnica González | SNII
Dr. Octavio Vázquez Gómez | SNII
Dr. Mario Misael Machado López | SNII
Dr. Juan Alfonso Salazar Torres | SNII
Dr. Julio César Villalobos Brito | SNII
Dr. Luis Emmanuel Reyes Gordillo
Dr. Omar Aguilar García
M.I. Carlos Fabián Escudero García

Comité de apoyo

Ing. José Gerardo Granados Sánchez
C. Mariana Jael Jiménez Cedeño

Publicamos tus artículos

Publica con nosotros tus artículos e investigaciones sobre las áreas afines a la metalurgia y soldadura. Envía tu material escrito, las fotos e ilustraciones necesarias. Asegúrate de que tu manuscrito tenga enfoque práctico a la mejora de la calidad, productividad o solución de problemas específicos, así como conclusiones. Envía tus trabajos a: mideahs@amecsmi.com.mx

Revista trimestral Julio-Septiembre 2024

Esta edición puede verla en forma digital en www.amecsmi.com en la sección Publicaciones.

Cintillo legal

La Revista MIDEAHS Año 1, julio-septiembre 2024. Es una publicación trimestral editada por la Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería A.C, con domicilio en Felipe Páramo N° 290 L4 Colonia División Norte C.P. 58128, Morelia, Michoacán, México. Tel (443) 2382140 www.amecsmi.com, amecsmi@gmail.com. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo 04-2024-061711514400-102 otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. ISSN 3061-7413. Editora en jefe: Dra. Nereyda Alcantar Mondragón. Felipe Páramo N° 290 L4 Colonia División Norte C.P. 58128, Morelia, Michoacán, México. Fecha de última modificación 01 de agosto de 2024.

El contenido de los artículos y reseñas que aparecen en esta edición son responsabilidad exclusiva de los autores y no compromete necesariamente la opinión de la institución editora y solo se podrá reproducir total o parcialmente con previa autorización escrita de la coordinación editorial y autores.

Contenido



01

¿Quiénes conforman AMECSMI?

Conoce a los fundadores de la asociación mexicana de ciencias en soldadura, metalurgia e ingeniería

06

Capítulo Estudiantil M³

Presentación del Comité del Capítulo Estudiantil

10

Congreso CIPTUM

Semblanza del Congreso Internacional de Procesos y Tecnologías en Unión de Materiales

17

Centro de Entrenamiento en Soldadura

Inauguración del Centro de Entrenamiento ITW Miller- ITMorelia

19

Efecto de los parámetros operativos en soldadura por fricción de A6063-t5 y nylon 6 (PA6)

L.J. Dávila-Sánchez

27.

Deposición de revestimientos base-co mediante plasma transferido por arco: resistencia mecánica y de desgaste

Carlos I. Godina-Encinas¹, H. M. Hdz-García, R. Muñoz-Arroyo, J. C. Díaz-Guillen, F.A. Hernández-García, J. L. Acevedo-Dávila

47.

Optimización de la dureza, en la unión de láminas de acero DP270 por RSW, mediante el método de taguchi

E. Bautista-Rodriguez, F. Reyes-Calderón, R. Vences-Hernandez, N. Alcántar-Mondragón, V. García-García, V.H. Baltazar-Hernandez

39.

Evaluación microestructural de uniones de acero inoxidable 304 empleando GMAW robótico

Bryan Ramiro Rodríguez Vargas, Argelia Fabiola Miranda Pérez, Jorge Eduardo Hernández Flores

56.

Soldeo de uniones en T empleadas en la fabricación de estructuras metálicas utilizando el proceso GMAW con los modos de transferencia spray y corto circuito

J.G. Granados Sánchez, F. Reyes Calderón, V. García García, N. Alcántar Mondragón, R. Vences Hernández

¿Quiénes conforman AMECSMI?



Víctor García García
Presidente

Víctor García García nació en el Estado de México 20 de abril de 1989. Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia en el departamento de Ingeniería Mecánica y de la Maestría en Ciencias en Metalurgia.

Es presidente y Fundador de la Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Reconocido como Investigador Nacional Nivel II por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt).

Egresado del Instituto Tecnológico de Morelia como Ingeniero Mecánica con especialidad en Manufactura. Titulado en 2012 por promedio. Realizo estancia de residencia profesional en la empresa Alstom Power S.A de C.V. de Morelia.

Posteriormente, laboró en dicha empresa desde septiembre 2012 hasta septiembre 2014. Egresó en 2014 de la Maestría en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Morelia. Egresó en 2019 del Doctorado en Ciencias en Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Realizo estancia posdoctoral aprobada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) entre 2020-2021. La productividad científica asciende a 30 artículos publicados en revistas reconocidas por el Journal Citation Report (JCR) con un total de 149 citas conseguidas. Director y co-director de varios trabajos de nivel licenciatura, maestría y doctorado. Ha sido asesor en el verano de la investigación científica y tecnológica del pacífico.

Presentaciones en diversos eventos científicos nacionales e internacionales como el congreso de la Sociedad Nacional de Ingeniería Mecánica (SOMIM), Materials Research Congress, Materials communications, ICEFA, entre otros. Participa como responsable técnico de proyectos TECNMI financiados Investigador Estatal del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán.

Sus áreas de conocimiento son: Procesos de soldadura, Diseño de experimentos aplicado a Procesos de Ingeniería y Manufactura, Modelación numérica y matemática de procesos, Diseño mecánico, Ensayos no destructivos, Fatiga y aerodinámica, Disipación de calor en luminarias LED.



Francisco Reyes Calderón
Vicepresidente

Francisco Reyes Calderón nació en Michoacán el 03 de septiembre de 1974. Realizó sus estudios técnicos en el área de Soldadura Industrial en el CBTis 149, motivado por el conocimiento adquirido en escuela secundaria técnica No. 60 de Morelia, en el taller de Soldadura y Forja. Continuó sus estudios en el área de ingeniería Mecánica y maestría en Materiales en el Instituto Tecnológico de Morelia. El doctorado en Metalurgia y Materiales en el instituto de investigaciones metalúrgicas de la universidad michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Es vicepresidente y Fundador de la Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Reconocido como Investigador Nacional Nivel I por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) desde 2013.

Ha sido gerente de ingeniería en la empresa Tecnología Ecológica Aplicada de México (2001-2005), gerente de operación de la empresa

Proyectos de Ingeniería y Mantenimiento de Equipos de soldadura por la marca INFRA-SIISA, certificado en el diagnóstico y reparación de equipos de regulación y precisión por la marca INFRA-FINESA (estos últimos de 2016 a la fecha).

En el ámbito docente y de investigación: es profesor de la carrera de Ingeniería en Materiales, de la Maestría en Ciencias en Metalurgia y del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería del Instituto Tecnológico de Morelia desde el año 2003.

Actualmente también se desempeña como jefe de la carrera de Ingeniería en Materiales, jefe de la carrera de Ingeniería en Semiconductores y coordinador del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

Es responsable de la coordinación del **centro de entrenamiento en soldadura ITW Miller- IT Morelia** y del laboratorio de Procesos de Soldadura. Miembro de la American Welding Society (AWS), del Instituto Nacional de Soldadura en México (INSAC) adscrito al Instituto Internacional de Soldadura (IIW).

Es especialista en **Procesos de la Soldadura y Metalurgia de la Soldadura, deformación en caliente y en frío de aceros avanzados de alta y ultra alta resistencia (HSLA).**

Es adviser honorífico del capítulo estudiantil en soldadura "M3" del IT Morelia. Cuenta con 50 publicaciones técnico-científicas reconocidas por el **Journal Citation Report (JCR)** y con más de 290 citas.



Rogelio Vences Hernández
Secretario

Rogelio Vences Hernández, nacido en Indaparapeo, Michoacán (Cuna Militar de Don José María Morelos y Pavón). Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Morelia en el departamento de Ingeniería Industrial.

Es secretario y Fundador de la Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Es Candidato al Sistema Nacional de Investigadores por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt).

Egresado del Instituto Tecnológico Superior de Uruapan como Ingeniero en Mecatrónica. Durante su estancia en el Instituto, participó en el área de automatización en el proyecto de mejora de un horno deshidratador mediante el uso de elementos de control de procesos y en el área de mantenimiento y reparación de máquinas para el etiquetado de frutos.

Continuando con su preparación académica, estudió la Maestría en Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Morelia. Apoyó en el

desarrollo del proyecto "Horno de secado modular" en conjunto con la academia de Ing. Mecánica, Ing. Industrial y la empresa JanesVille de México.

Egresó del **Doctorado en Ciencias de la Ingeniería**, con participación en proyectos de soldadura enfocados al proceso RSW y diversas ponencias para la divulgación de la ciencia en México. También ha tenido la oportunidad de fungir como asesor en:

1. Estancia académica del XXII verano de la investigación científica y tecnológica del pacífico de 2017.
2. Estancia académica del XXIII verano de la investigación científica y tecnológica del pacífico de 2018.
3. Dos veces asesor de proyectos a nivel licenciatura y maestría en la Cumbre Nacional de Desarrollo Tecnológico, Investigación e Innovación del Tecnológico Nacional de México.

Es Investigador Estatal del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán. Cuenta con un certificado en Lean Six Sigma Yellow & Green Belt.

Sus Áreas de conocimiento son en Procesos de soldadura por resistencia, principalmente el RSW, Diseño de experimentos aplicado a Procesos de Ingeniería y Manufactura.

Actualmente se encuentra desarrollando conocimiento en la implementación de RNA's para la predicción y parametrización de procesos de soldadura.



Nereyda Alcantar Mondragón
Tesorerera

Nereyda Alcantar Mondragón nació en la ciudad de Morelia, Michoacán el 30 de septiembre de 1993. Docente de la carrera de Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Morelia.

Es tesorera y Fundadora de la Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Es Adviser del Capítulo Estudiantil de Soldadura M³. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel Candidata y al Padrón de Investigadoras e Investigadores de Michoacán (PIIM).

Estudió en el Instituto Tecnológico de Morelia Ingeniería en Materiales con la **especialidad Metalurgia de Aceración y Soldadura**. Formó parte del Capítulo Estudiantil de Soldadura y organizó ferias de proyectos en su carrera. Además, asistió al Programa Interinstitucional para el Fortalecimiento de la Investigación y el Posgrado del Pacífico DELFIN por dos años consecutivos.

En 2017 se graduó de la Ingeniería y fue acreedora de la beca 1000 jóvenes por la ciencia donde se le

otorgó el ingreso a la Maestría en Ciencias en Metalurgia siendo becaria Conahcyt. En 2019 se graduó con honores de la maestría e incursionó en la docencia en la carrera de Ingeniería Mecánica. Ese mismo año inició sus estudios de Doctorado con beca conahcyt. Ha sido directora y co-directora de alumnos de licenciatura y maestría desde 2017.

En 2020 publicó su primer artículo en una revista de alto arbitraje según el Journal Citation Report (JCR) de cuartil 1. En 2021 organizó el primer **CONGRESO INTERNACIONAL DE PROCESOS Y TECNOLOGÍAS EN UNIÓN DE MATERIALES (CIPTUM)**, ha dado cursos teóricos de interpretación metalográfica, cursos prácticos de procesos de soldadura a nivel licenciatura. A partir de ese año a la fecha ha publicado más artículos JCR.

En 2022 fue **becaria por el British Council** para incrementar el interés de las **mujeres en la ciencia y tecnología**. Ha participado como editora en la revista Avacient. En agosto de 2022 obtuvo el cargo de **Jefa de Proyectos de Vinculación de Ingeniería en Materiales**. Ese mismo año impartió un curso de propiedades de los materiales para la **empresa ITW Welding Group**. En el verano 2023 participó como asesora en el Programa Interinstitucional para el Fortalecimiento de la Investigación y el Posgrado del Pacífico (DELFIN).

Actualmente, cuenta con un proyecto a su cargo de redes de investigación por TecNM. Obtuvo su grado de Doctorado el 01 de septiembre de 2023. Es actualmente **Jefa del Laboratorio de Metalografía**.

Sus áreas del conocimiento son en Procesos de soldadura, Metalurgia de la soldadura, Tratamientos térmicos, Caracterización microestructural e Interpretación metalográfica.



Sarahí Estrada Hernández
Miembro destacado

Sarahí Estrada Hernández nació en la ciudad de Morelia, Michoacán el 21 de abril de 1993. Docente de la carrera de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Morelia y actualmente estudiante del posgrado para obtener el título de Maestra en Ciencias en Metalurgia. Estudió en el Instituto Tecnológico de Morelia Ingeniería Industrial con la especialidad en Calidad y Productividad. Formó parte del Capítulo Estudiantil SALSS e IEEE. Para el año de 2015 desarrolló un proyecto en el área de estadística y resultados en la reconocida Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Es miembro destacado y Fundadora de la Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C.

En 2016 se tituló de la Ingeniería y comenzó a laborar en la empresa hotelera mexicana más grande e importante del país, GRUPO POSADAS, en donde desempeñó el cargo de analista en el área de distribución electrónica, ejecutaba labores relacionadas al mantenimiento preventivo, correctivo, así como de la mejora continua en el

proyecto de migración de la página oficial por parte de la compañía, teniendo a su cargo más de 40 hoteles.

En enero 2018 se le otorgó el ingreso como profesora de la carrera de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Morelia. Llevando la docencia a la par, en junio de 2020 comenzó a laborar como auxiliar en el área de compras y adquisiciones del Instituto Tecnológico de Morelia, donde realizaba labores de gestión de inventarios, proveedores, control y movilización de la documentación pertinente para completar el expediente de compras de las distintas áreas solicitantes. Para agosto 2021 la nombraron Jefa de dicha área de compras, en donde además de todo lo anterior, tenía a su cargo a dos auxiliares y su labor consistía principalmente en resolución de problemas derivadas de las compras y adquisiciones.

Ha dado asesorías de calidad e implementación de mejora continua, así como 9S's a la empresa Granja Coturnícola el Fresno, la cual es productora de huevo y carne en canal de codorniz.

Para el área industrial, colaboró con la empresa Miller para la impartición del curso Administración de Proyectos, el cual formaba parte de un diplomado para dicha empresa.

Actualmente, estudia la **Maestría en Ciencias en Metalurgia**, con la línea de procesos de transformación. Ha incursionado en el área de investigación de procesos de soldadura. Tiene como objetivo terminar la maestría con honores.

Comité del Capítulo estudiantil M³



Mariana Jael Jiménez Cedeño
Presidenta
Ingeniería en Materiales
8º semestre



Jhovana Campos Blas
Vicepresidenta
Ingeniería en Materiales
8º semestre

El Capítulo Estudiantil de Soldadura comenzó en el año 2014. El fundador del Capítulo fue el Dr. Francisco Reyes Calderón, quién generó una proyección positiva hacia el área de los materiales. El primer nombre fue MESCAWS-ITM, por la inclusión con el American Welding Society (AWS).

En el 2020 se reorganiza el capítulo siendo más incluyente con las carreras de ingeniería del TecNM campus Morelia, renombrándose a M³. Actualmente, el capítulo es perteneciente a la Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C.

También ha sido patrocinado por la empresa ICA Flúor y la empresa ITW Welding Group durante la organización del CIPTUM 2022.

Actualmente el Capítulo M³ tiene a cargo como Advisers a la Dra. Neryda Alcantar Mondragón y al Dr. Francisco Reyes Calderón

El Capítulo estudiantil brinda cursos de capacitación en diversas temáticas, charlas y diversos eventos para su formación profesional.

Actualmente cuenta con más de 200 miembros de las diversas carreras de ingeniería como: Materiales, Mecánica, Mecatrónica, Contabilidad, Maestría en Ciencias en Metalurgia y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.



Liliana Quintino Mora
Vinculación
Ingeniería en Materiales
1º semestre



Andrea Estefanía Alanis Domínguez
Secretaria
Ingeniería en Mecatrónica
5º semestre



José Gerardo Granados Sánchez
Master Chief Program
Maestría en Ciencias en Metalurgia
5º semestre



Wendy Liliana Carreón Nieto
Recursos Humanos
Ingeniería en Materiales
8º semestre



Juan Carlos Cisneros Moreno
Logística
Ingeniería en Materiales
2º semestre



Karla Rocio Espino Quiroz
Marketing
Ingeniería en Materiales
2º semestre



Jimena Álvarez Farias
Tesorera
Ingeniería Mecánica
7º semestre



Pedro Barriga Díaz
Webmaster
Maestría en Ciencias en Metalurgia
5º semestre



Capítulo Estudiantil de Soldadura M³

Congreso CIPTUM 2022

en su segunda edición



El Congreso Internacional de Procesos de Unión de Materiales (CIPTUM) se llevó a cabo del 24 al 26 de octubre de 2022 en su segunda edición, la sede fue el Instituto Tecnológico de Morelia, siendo el anfitrión de un evento de gran importancia en la industria de la soldadura y materiales.

El objetivo principal del congreso fue reunir a expertos en soldadura y materiales de todo el mundo para discutir los avances más recientes en la industria, explorar nuevas tecnologías y técnicas.

Entre las empresas participantes en el evento se encontraba la empresa **ITW Welding Group de Miller**, líder en la fabricación de equipos de soldadura, que presentó sus últimos avances en tecnología de soldadura, incluyendo equipos de soldadura de última generación y una amplia gama de herramientas de soldadura para diferentes aplicaciones.

Uno de los temas destacados en el congreso fue la soldadura de materiales metálicos. Expertos en la industria discutieron los desafíos y oportunidades asociados con la soldadura de diferentes tipos de materiales, incluyendo acero, aluminio y titanio. También se habló sobre los últimos avances en técnicas de soldadura.

Adicionalmente, se tuvo como invitado al Instituto Nacional de Soldadura (INSAC-IIW) con la presencia de **Lucio Labela y Angelo Catalano (Italia)** quienes presentaron el simulador de realidad aumentada de soldadura, una herramienta de entrenamiento de vanguardia diseñada para ayudar a los profesionales a mejorar sus habilidades de soldadura. El simulador de INSAC-IIW utiliza tecnología avanzada de realidad virtual para simular una amplia gama de escenarios de soldadura, lo que permite a los usuarios experimentar y practicar diferentes técnicas de soldadura en un ambiente seguro y controlado. Este equipo trabaja por medio de una careta de realidad virtual que transporta al usuario a múltiples escenarios que son de gran importancia para este proceso, siendo preciso para evaluar al soldador y la dificultad del soldeo puede ser ajustada por el encargado de llevar a cabo la prueba.

Además, se presentaron ponencias de empresas líderes en la industria, como **ICA Fluor, Kirchhoff y Yaskawa**. Yaskawa presentó avances en la automatización de procesos de soldadura con robots, lo que representa un gran avance en la industria de la soldadura y asegura la eficiencia y la calidad de los procesos de soldadura.



Cortesía: Karla Orozco, estudiante Ingeniería en Materiales ITM

El evento también incluyó exposiciones de carteles y ponencias técnico-científicas. Se contó con un aforo de 450 asistentes, tanto de la ingeniería en materiales, la ingeniería mecánica, mecatrónica y contabilidad. Los estudiantes tuvieron la oportunidad de aprender de los expertos en la industria y explorar los últimos avances en la soldadura y materiales.

Durante la clausura del evento se llevó a cabo la inauguración del **Centro de Entrenamiento en Soldadura Miller-ITM**, y se contó con la presencia de Alfredo Aguilar Cano; CEO de Miller México, la M.T Cecilia Rodríguez Cabrera, la Ing. Daniela Fonseca, y el Ing. Gabriel. También se tuvo la participación de la mesa directiva de la Asociación Mexicana de Ciencias de soldadura metalurgia e ingeniería (AMECSMI), la mesa directiva del capítulo estudiantil M³ y no menos importante la

presencia del cuerpo directivo del **Instituto Tecnológico de Morelia**.

La empresa Miller, derivado de un convenio de colaboración entre el AMECSMI e Instituto Tecnológico de Morelia donó diversos equipos de soldadura para conformar el centro de entrenamiento.



Lucio Labela (Italia) del INSAC con estudiantes de IMAT. Cortesía: Karla Orozco

El centro de entrenamiento tiene como objetivo fomentar la educación y el desarrollo de habilidades en la soldadura de los estudiantes del Instituto Tecnológico de Morelia, a fin de preparar futuros ingenieros capaces y con las habilidades que requiere la industria actual. Además, es el

primer y único centro de entrenamiento de soldadura en la zona centro del país.

Bryan Oliver Hernández Ortiz

Ex integrante de la Mesa del Capítulo Estudiantil de Soldadura M³



Cortesía: Karla Orozco

Recuerdos CIPTUM 2022









Inauguran Centro de Entrenamiento en Soldadura

El Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Morelia, inauguró el único Centro de Entrenamiento en Soldadura ITW Miller instalado en una institución de educación superior en el país, gracias a la donación de material consumible y entrega en comodato de equipo de última generación de la empresa ITW Welding Group perteneciente a la empresa Miller, por un monto aproximado a los 5 millones de pesos.



Cortesía: Karla Orozco, estudiante Ingeniería en Materiales ITM

El TecNM Campus Morelia brinda entrenamiento sobre los diferentes procesos de soldadura para estudiantes y posteriormente a la sociedad en general que necesite capacitación desde nivel básico hasta avanzado. Los equipos dentro del centro de entrenamiento son utilizados en la industria petrolera, metalmecánica, automotriz, aeronáutica y la industria petroquímica.

La inauguración fue encabezada por los directivos TecNM Campus Morelia; el Gerente de ITW Welding Miller México, Ing. Alfredo Aguilar Cano acompañado Mtra. Cecilia Rodríguez Cabrera egresada del IT Morelia quién es Gerente de Entrenamiento de la empresa; el Ing. Gabriel Pérez Rozo, Marketing Digital y Daniela Fonseca Cortés, Administradora del área técnica. Además, se contó con la presencia del Jefe de Departamento de Ingeniería en Materiales, Dr. Francisco Reyes Calderón quién fue parte fundamental en este proceso de donación. Este centro beneficiará de manera inicial a más de 300 alumnos de Ingeniería en Materiales y a usuarios de las diferentes carreras del IT Morelia como la Ingeniería Mecánica y Mecatrónica e Ingeniería Industrial.

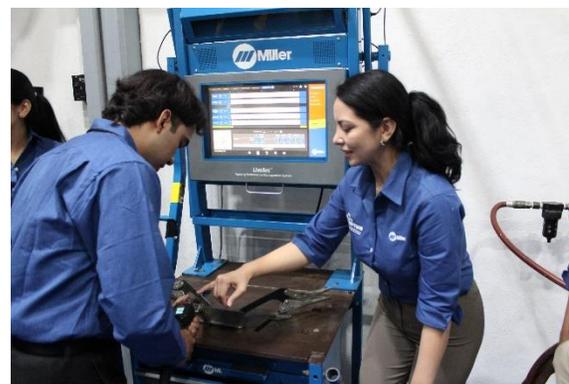


Cortesía: Karla Orozco

En el centro de entrenamiento de soldadura se atiende a la población en general con la certificación de personal para el uso de dicha tecnología, a través de posibles convenios de colaboración para poner al alcance de la sociedad estos equipos industriales.

Se precisó por parte de ITW Welding Group que la expectativa es muy grande y existe confianza con la academia porque siempre debe existir esta vinculación para la formación de talentos. Además de que las tecnologías y procesos de la empresa estarán disponibles en el Centro de Entrenamiento para contribuir en proyectos de investigación.

El jefe de Departamento de Ingeniería en Materiales mencionó: "Estamos replicando el Centro de Entrenamiento que tiene Miller en sus instalaciones de Apodaca, Nuevo León, dentro del Tecnológico de Morelia para capacitar a estudiantes, docentes y a usuarios de la marca; dando a conocer las tecnologías emergentes y capacitación en soldadura a la sociedad en general". Cabe precisar que este equipamiento también se realizó en coordinación con la Asociación Mexicana de Ciencias en Soldadura Metalurgia e Ingenierías A.C. cuya sede pertenece al TecNM Campus Morelia.



Cortesía: Karla Orozco

**ARTICULOS DE
DIVULGACIÓN
CIENTÍFICA**

Tabla de contenido

EFFECTO DE LOS PARÁMETROS OPERATIVOS EN SOLDADURA POR FRICCIÓN DE A6063-T5 Y NYLON 6 (PA6).	19
L.J. Dávila-Sánchez	
DEPOSICIÓN DE REVESTIMIENTOS BASE-CO MEDIANTE PLASMA TRANSFERIDO POR ARCO: RESISTENCIA MECÁNICA Y DE DESGASTE.	27
Carlos I. Godina-Encinas ¹ , H. M. Hdz-García ¹ , R. Muñoz-Arroyo ² , J. C. Díaz-Guillen ¹ , F.A. Hernández-García ³ , J. L. Acevedo-Dávila ⁴	
EVALUACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UNIONES DE ACERO INOXIDABLE 304 EMPLEANDO GMAW ROBÓTICO.	39
Bryan Ramiro Rodríguez Vargas ^{1*} , Argelia Fabiola Miranda Pérez ² , Jorge Eduardo Hernández Flores ³	
OPTIMIZACIÓN DE LA DUREZA, EN LA UNIÓN DE LÁMINAS DE ACERO DP270 POR RSW, MEDIANTE EL MÉTODO DE TAGUCHI.	47
E. Bautista-Rodríguez ¹ , F. Reyes-Calderón ¹ , R. Vences-Hernandez ¹ , N. Alcantar-Mondragón ¹ , V. García-García ¹ , V.H. Baltazar-Hernandez ²	
SOLDEO DE UNIONES EN T EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS UTILIZANDO EL PROCESO GMAW CON LOS MODOS DE TRANSFERENCIA SPRAY Y CORTO CIRCUITO.	56
J.G. Granados Sánchez ¹ , F. Reyes Calderón ¹ , V. García García ¹ , N. Alcántar Mondragón ¹ , R. Vences Hernández ¹ .	

EFFECTO DE LOS PARÁMETROS OPERATIVOS EN SOLDADURA POR FRICCIÓN DE A6063-T5 Y NYLON 6 (PA6)

L.J. Dávila-Sánchez

Maestría en ciencia e ingeniería de los materiales, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

Resumen

La presente investigación consistió en la variación de los parámetros operativos de la soldadura por fricción y agitación por puntos (velocidad de rotación, profundidad de penetración y tiempo de permanencia) y en la evaluación de sus efectos sobre la carga máxima soportada por las uniones generadas entre placas de los materiales A6063-T5 y Nylon 6 (PA6). El análisis estadístico de los resultados obtenidos se llevó a cabo mediante el método de Taguchi y se generaron gráficos de contorno y una ecuación de regresión que predicen la carga máxima a obtener en relación con los parámetros de operación.

Palabras clave: SFAP, Materiales disímiles, A6063-T5, Nylon 6, PA6

1.- Introducción

La soldadura por fricción y agitación - SFA (Friction stir welding - FSW), por sus siglas en inglés, fue inventada en el año de 1991 por el Instituto de soldadura (TWI) ubicado en el Reino Unido. Fue pensado originalmente para unión de materiales similares de aleaciones de aluminio y otros materiales de peso ligero [1-2]. Y mientras que el peso ligero sigue siendo una de las características principales de este tipo de soldadura, ésta también se ha enfocado poco a poco en la unión de materiales diferentes en estructuras híbridas [3]. Esto se debe a que la soldadura por fricción, y más concretamente, la soldadura de puntos por fricción, minimizan la incompatibilidad metalúrgica, las diferencias entre los diferentes puntos de fusión y coeficientes de expansión térmica [4].

La unión de materiales disímiles es muy interesante en aplicaciones estructurales, especialmente en el caso de la industria automotriz. Las tendencias globales impulsan a los sectores de la transportación a fabricar vehículos cada vez más ligeros, seguros, amigables con el medio ambiente, y por supuesto; menos costosos [5]. El objetivo principal de la unión de materiales disímiles es aprovechar las propiedades mecánicas del metal, y a la vez, las prestaciones en cuanto a ligereza y versatilidad de los polímeros.

2.- Metodología

Para las uniones de A6063-T5 y Nylon 6 (PA6) se utilizaron placas de estos materiales de dimensiones de 25 X 100 mm y espesores de 3.1 y 6.7 mm respectivamente. La geometría de estas placas se ilustra a mayor detalle en la Figura 1.

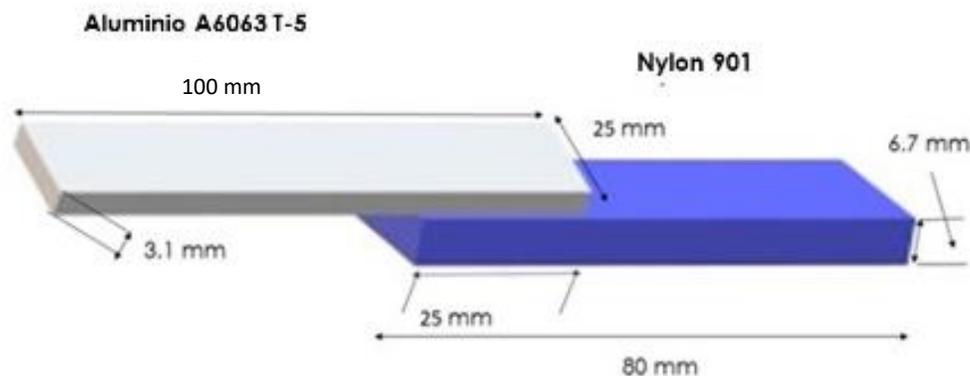


Figura 1. Geometría y posición de las placas de A6063-T5 y Nylon 6.

Como equipo para llevar a cabo las uniones soldadas se utilizó un torno CNC TITANIUM BJ-1640. Además, la herramienta que se utilizó para generar la fricción con las placas, y del mismo modo, el calor requerido para la soldadura; fue una de pin cónico con un hombro de 12 mm de diámetro y un pin de 2 mm de diámetro con un ángulo de 35° y una altura de 0.8 mm, esta herramienta fue desarrollada, tratada térmicamente y maquinada desde cero utilizando un acero AISI/SAE-H13.

De igual manera el sistema de sujeción que se utilizó durante la experimentación de esta investigación fue desarrollado y generado desde cero para satisfacer las necesidades presentadas al realizar las pruebas de soldadura por fricción y agitación por puntos (SFAP) en un torno CNC. Este sistema de sujeción puede observarse en la Figura 2.



Figura 2. Sistema de sujeción de placas para torno CNC.

La experimentación consistió en un total de 2 lotes de 27 pruebas de soldadura por fricción, planteando un diseño experimental de 3 niveles con 3 variables independientes: Velocidad de rotación (rpm), profundidad de penetración (mm) y tiempo de permanencia (s); y una variable dependiente o respuesta: que corresponde a la carga máxima (kN) soportada por las uniones. Esto se resume en la [Tabla I](#). No se encuentra el origen de la referencia..

Tabla I. Diseño Experimental			
Parámetros	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de rotación (RPM)	1200	1300	1400
Profundidad de penetración (mm)	1.2	1.3	1.4
Tiempo de permanencia (s)	1	1.5	2

3.- Resultados y discusión

Se evaluaron las 54 cargas (kN) soportadas por las uniones generadas de los 2 lotes de 27 pruebas, en estas la carga más alta registrada fue de 2.052 kN. Dentro de las pruebas realizadas se observó que, además de los parámetros que se evaluaron en esta investigación, también otros factores, como la presión ejercida entre las placas durante la sujeción; pudieron haber afectado la resistencia de las uniones, sin embargo, a falta de un dispositivo para medir de manera precisa la presión generada por el sistema de sujeción, estas observaciones no pudieron ser comprobadas.

Los resultados obtenidos de las cargas máximas obtenidas fueron analizados mediante el método de Taguchi, a partir del cual se generaron una serie de gráficos y una ecuación de regresión que predicen la carga máxima que se puede obtener a diferentes parámetros de operación. Por ejemplo, en la **Figura 3**, se ilustra un gráfico de superficie que relaciona la carga que se puede obtener variando el tiempo de permanencia (s) y la profundidad de penetración (mm). De igual manera, en la **Figura 4**, se ilustra otro gráfico de superficie, que esta vez relaciona la carga máxima con la velocidad de rotación de la herramienta (rpm) y la profundidad de penetración (mm).

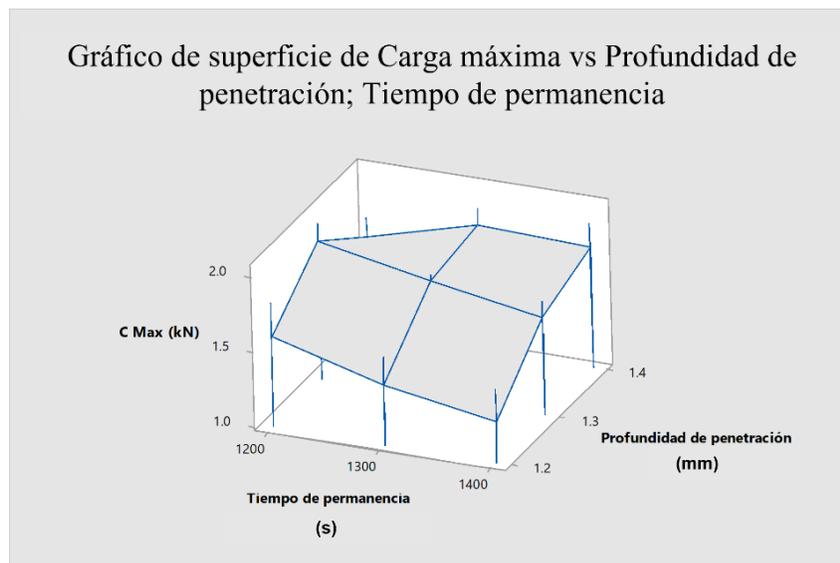


Figura 3. Gráfico de superficie de carga máxima us profundidad de penetración; tiempo de permanencia

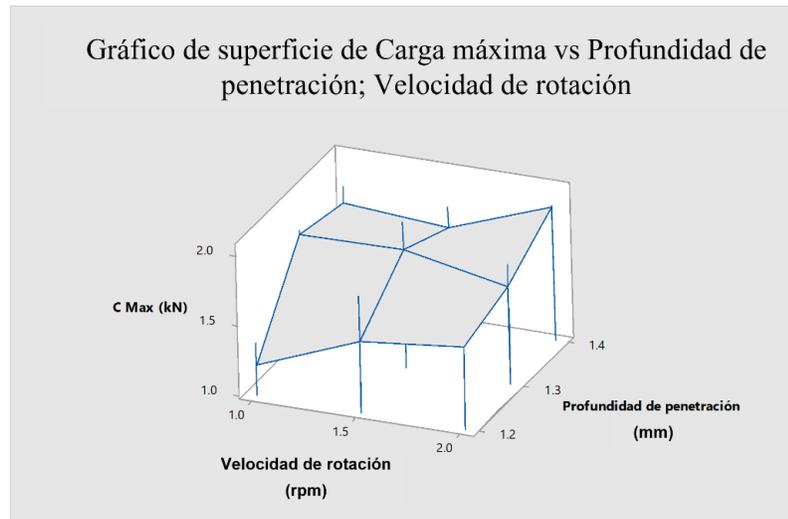


Figura 4. Gráfico de superficie de carga máxima us profundidad de penetración; velocidad de rotación.

En complemento a los gráficos de superficie, también se realizaron gráficos de contorno que ilustran, en la

Figura 5, la carga máxima a obtener variando la profundidad de penetración (mm) y el tiempo de permanencia (s). Al igual que en la

Figura 6, donde se varía la velocidad de rotación (rpm).

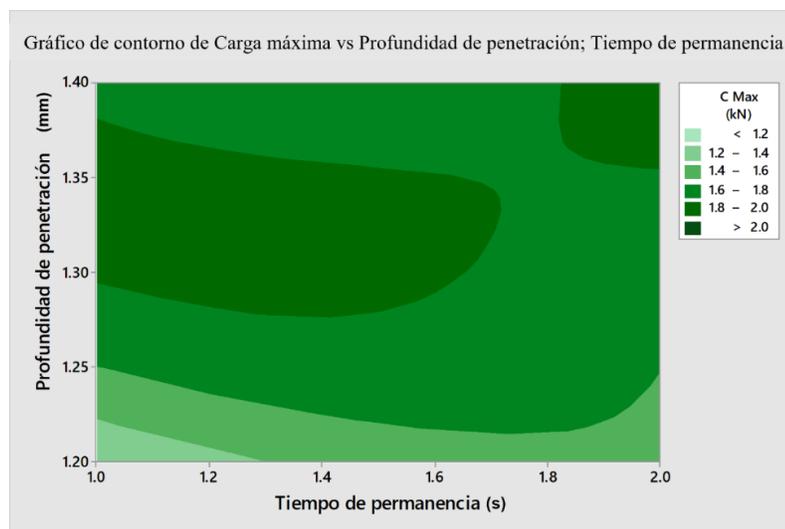


Figura 5. Gráfico de superficie de carga máxima us profundidad de penetración; tiempo de permanencia.

-

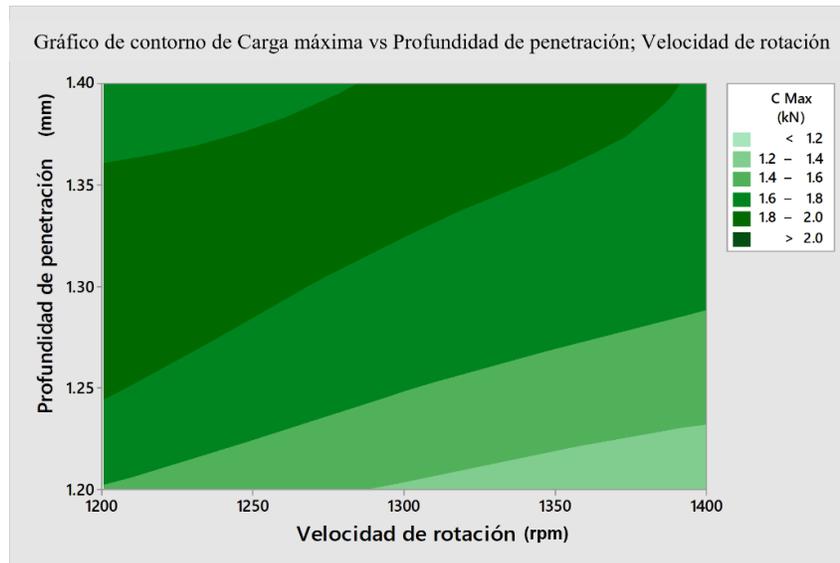


Figura 6. Gráfico de superficie de carga máxima us profundidad de penetración; velocidad de rotación.

Finalmente, se generó una ecuación de regresión que predice de manera confiable el comportamiento de los datos registrados, es decir, de la carga máxima que puede obtenerse variando a cualquier valor, los parámetros de velocidad de rotación (rpm) profundidad de penetración (mm) y tiempo de permanencia (s). El coeficiente de correlación lineal (R^2) de la ecuación tiene un valor de 0.9284.

$$\begin{aligned}
 & \text{Carga Maxima (kN)} \\
 & = -11.8 - 0.0153V + 34.1P - 0.93t - 0.000001V^2 - 18.06P^2 - 0.090t^2 \\
 & + 0.01212(V)(P) + 0.00046(V)(t) - 0.86(P)(t)
 \end{aligned}$$

Donde:

V: Velocidad de rotación (rpm)

P: Profundidad de penetración (mm)

t: Tiempo de permanencia (s)

Conclusiones

- 1) Se realizaron 54 pruebas de soldadura evaluando la carga máxima soportada por la unión, donde el mejor resultado obtenido fue de 2.025 kN.
- 2) Se generó una ecuación de regresión lineal que predice de manera satisfactoria la carga máxima que se puede obtener al variar los parámetros de operación (profundidad de penetración, velocidad de rotación y tiempo de permanencia).
- 3) Los resultados sugieren que hay variables incontrolables que pudieron haber causado ruido en los resultados obtenidos en esta investigación. Más concretamente, la presión ejercida entre las placas de Aluminio y Nylon 6.
- 4) El sistema de sujeción desarrollado para esta investigación cumple satisfactoriamente todas las necesidades presentadas por la soldadura SFAP realizada en torno CNC.

Recomendaciones

A pesar de que los resultados obtenidos fueron satisfactorios para los fines de la investigación, se pudo observar durante esta que, pudo haber variables incontrolables como la presión ejercida entre las placas al momento de sujetarlas; que pudieron interferir con los resultados registrados en la evaluación de las cargas soportadas. La presión pudo haber cambiado de prueba a prueba debido al espesor de las placas de Nylon 6 que, dada la naturaleza de la fabricación del material, no fue 100% constante. Por lo que se recomienda medir la presión ejercida entre los materiales a la hora de unirlos, o bien, la comprobación de los espesores de estos mismos.

Agradecimientos

El autor desea agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo aportado para el desarrollo del proyecto, así como a la Universidad Autónoma de Zacatecas y más concretamente a la Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales por hacer posible la realización de la presente investigación tanto fuera como dentro de sus instalaciones.

Referencias

[1] T. Khaled, D. Ph, An Outsider Looks At Friction Stir Welding, 2005.

[2] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Mater. Sci. Eng. R Reports. 50 (2005) 1-78.

- [3] R.S. Coelho, A. Kostka, J.F. dos Santos, A. Kaysser-Pyzalla, Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure, *Mater. Sci. Eng. A*. 556 (2012) 175–183.
- [4] T. Watanabe, H. Takayama, A. Yanagisawa, Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding, *J. Mater. Process. Technol.* 178 (2006) 342–349.
- [5] M. Haghshenas, F. Khodabakhshi, Dissimilar friction-stir welding of aluminum and polymer: a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 104 (2019) 333–358.

DEPOSICIÓN DE REVESTIMIENTOS BASE-CO MEDIANTE PLASMA TRANSFERIDO POR ARCO: RESISTENCIA MECÁNICA Y DE DESGASTE

Carlos I. Godina-Encinas¹, H. M. Hdz-García¹, R. Muñoz-Arroyo², J. C. Díaz-Guillen¹, F.A. Hernández-García³, J. L. Acevedo-Dávila⁴

¹COMIMSA-Salttillo, Ciencia y Tecnología No. 790, Col. Saltillo 400, 25290 Saltillo, Coah., México

²Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Sistemas, Carretera a México Km. 13, 25350 Arteaga, Coah. México

³CINVESTAV-Unidad Querétaro, Lib. Norponiente 2000, Fracc. Real de Juriquilla, 76230, Qro., México

⁴Universidad Autónoma de Coahuila, Centro de Investigación de Geociencias Aplicadas, Unidad Norte, 26830 Nueva Rosita, Coah. México

Resumen

Se llevó a cabo el estudio comparativo de un recubrimiento obtenido a partir de la deposición de dos revestimientos metálicos a 30°C y 150°C empleando metal de aporte base-Co por plasma transferido por arco sobre acero D2. Técnicas de microscopía electrónica de barrido y energía dispersiva evidenciaron una mejor distribución de Cr y W en la matriz de Co en los recubrimientos procesados a 150°C con menor dilución. Lo que permitió obtener un alto módulo elástico de 221.34 GPa, mayor recuperación elástica de 66% y menor disipación de energía de 51% determinados por nanoindentación. Así mismo, disminuyó la pérdida volumétrica de 1.27 mm³ bajo una carga de 6 N por pin-on-disk y, una disminución de la rugosidad de 404.42 µm a 131.15 µm en la zona desgastada. Topografías por microscopía de fuerza atómica evidenciaron cambios de desgaste de tipo abrasivo a una combinación de abrasivo/deformación plástica.

Palabras clave: Revestimiento metálico, Plasma transferido, Dilución, Tribología

1.- Introducción

Los aceros grado herramienta son empleados en componentes de herramientas y maquinarias de la industria minera y de la construcción. Estos aceros son susceptibles a los tratamientos térmicos y al endurecimiento superficial para resistencia a la tenacidad, alta dureza, así como la resistencia al desgaste. Sin embargo, los componentes específicamente en las palas mecánicas están bajo fricción, por lo que con el tiempo de servicio disminuyen sus propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste. En este caso, si el componente es seleccionado para repararlo permite reducir los costos por reemplazo, principalmente. Por lo que, se han propuesto procesos como lo es el plasma transferido por arco (acrónimo de PTA). Debido a la alta tasa de deposición de metales de aporte base Co y Ni, principalmente [1-2]. Reportes en la literatura [3-5], sugieren que la resistencia al desgaste de la aleación Stellite® 6 en los recubrimientos, es debido a la formación de carburos duros combinados con Cr y W dispersos en una matriz de base cobalto como son los tipos: M₇C₃, M₂₃C₆, MC y M₆C, así como fases intermetálicas de Co₃(Mo, W) e incluyendo las

fases laminares que tienen una composición química rica en Cr. No obstante, las altas concentraciones de Cr y W, baja distribución en la matriz base Co y morfología acicular, contribuyen a la disminución de la resistencia mecánica. Por otro lado, se ha reportado que el incremento de la disolución de especies químicas permite la formación del WC y la precipitación de carburos secundarios que incrementan las propiedades mecánicas [6]. Otros estudios [7,8] establecen que los carburos $(Cr, Fe)_7C_3$ y $M_{23}C_6$ responsables de una alta resistencia mecánica, están presentes en los recubrimientos obtenidos por PTA aún después de un tratamiento a $600^\circ C$. En este sentido, la temperatura aplicada engrosa los eutécticos y activa la co-precipitación del $M_{23}C_6$, ambas fases permiten obtener una alta resistencia al desgaste debido a la obstaculización del movimiento de las dislocaciones [7]. El pre-calentamiento del metal base antes de la deposición de un recubrimiento evita agrietamiento, ya que disminuyen los esfuerzos residuales. Reportes en la literatura sugieren que la formación de la fase η , como lo es Co_6W_6C , Co_3W_3C son formadas debido a la disolución de partículas de WC y sus tamaños dependen de la velocidad de enfriamiento. Así mismo, las propiedades mecánicas y de desgaste del recubrimiento son influenciadas por la dilución; si la dilución es baja, tales propiedades serán muy cercanas a las del metal de aporte. De acuerdo con la literatura [11,12] se establece que los factores predominantes que tienen mayor influencia en la dilución del proceso PTA son: temperatura de pre-calentamiento y los parámetros del proceso.

En base a lo anterior, en este trabajo de investigación se propone el estudio comparativo de la deposición de un segundo revestimiento sobre un primer revestimiento base Co a temperaturas de $30^\circ C$ y $150^\circ C$ sobre un acero D2 por PTA y, así estudiar el efecto de la temperatura de deposición sobre el comportamiento mecánico-elástico y tribológico.

2.- Metodología

2.1 Materia prima

Se empleó material de aporte Stellite 6 base-Co de tamaño de $43-72 \mu m$ de morfología esférica con intervalo de fusión de $1285^\circ C-1410^\circ C$ de composición química que se resume en la **Tabla 1**. Mientras el material base empleado fue un acero D2 (etiquetado como MB) con tratamiento térmico y dureza de 52-55 HRC.

2.2 Preparación y cortes de los substratos previo a la deposición de revestimientos por PTA

De una barra de acero D2 de 1.00 m x 5.08 cm, se cortaron secciones transversales de 2.75 cm de espesor por duplicado. Los cortes se llevaron a cabo con discos de SiC y rectificaron mediante un centro de mecanizado vertical marca HAAS, modelo VM-2 para obtener caras paralelas. Adicionalmente, se limpiaron con la solución Alconox® para eliminar especies grasas.

Tabla 1. Composición química (%e.p), densidad y dureza del Stellite 6						
Co	Cr	W	C	Otros	Dureza (HRC)	Densidad (g/cm ³)
Balance	27.0-32.0	4.0-6.0	0.9-1.4	Ni, Fe, Si, Mn, Mo	36-45	8.44

2.3 Procesamiento de dos revestimientos metálicos base-Co a 30°C y 150°C por PTA

Se llevó a cabo la deposición de los revestimientos base-Co bajo dos condiciones experimentales como se describe a continuación: el primer par de muestras etiquetadas como COAT1; se le depositaron 5 cordones transversales uno tras otro de forma paralela para obtener el primer revestimiento a temperatura ambiente, posteriormente se esperó el tiempo necesario hasta que bajará la temperatura a los 30°C para la deposición del segundo revestimiento a partir de otros 5 cordones en total y 2) el segundo par de muestras etiquetados como COAT2, se llevó a cabo de igual forma que la muestra COAT1, sólo que en la segunda deposición del revestimiento se estuvo esperando cada 150°C para aplicar obtener la segunda cama del revestimiento. Las mediciones de las temperaturas se llevaron a cabo mediante un equipo de emisión de un haz de láser marca Steren modelo HER-425 a una distancia de 60 cm. Por otro lado, la **Tabla 2** resume los parámetros empleados para la obtención de los revestimientos por PTA.

Tabla 2. Parámetros del proceso PTA	
Parámetro	Valor
Distancia (mm)	7
Flujo de gas para plasma (L/min ⁻¹)	8
Flujo de gas para protección (L/min ⁻¹)	14
Flujo de gas para alimentación del polvo (L/min ⁻¹)	11
Tasa de alimentación del polvo (g/min)	12
Corriente del arco principal (A)	100
Velocidad de desplazamiento (cm/min)	12

2.4. Preparación metalográfica y caracterización de las muestras

Los revestimientos sobre el MB, se cortaron en dirección transversal con disco de SiC. Posteriormente, se prepararon metalográficamente mediante cortes, desbaste sobre lijas de granulometrías de 200 a 1200 y se pulieron a espejo sobre discos giratorios con cubiertas de paños microcloth e impregnados de pasta de diamante de 1 μm . Con el fin de realizar una inspección microestructural por microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB), se revelaron las microestructuras electroquímicamente en una solución química con 40 ml de HNO_3 , 50 ml de H_2SO_4 y 10 ml de H_3PO_4 empleando 3 V y 2 A por 2 s. La caracterización se llevó a cabo mediante MEB marca TESCAN, modelo MIRA-3 con un detector EDS marca Bruker. Adicionalmente, se determinó el porcentaje de dilución considerando una unión a tope mediante la medición de áreas en un estereoscopio marca Nikon SMZ745T y sustituyendo los valores de las áreas en la **Ecuación 1** de la **Figura 1**.

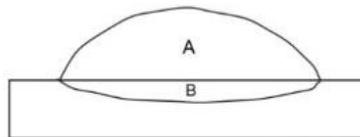


Figura 1. Esquema ilustrativo para la medición de áreas y determinar la dilución empleando la Ecuación 1

$$\text{Dilución}(\%) = \frac{B}{A + B} \times 100 \quad (1)$$

2.5 Evaluación de la pérdida volumétrica por pin-on-disk

Antes de llevar a cabo el ensayo de resistencia al desgaste, las muestras se cortaron con medidas de 2 x 3 cm con un disco de diamante y, fueron rectificadas para obtener una superficie lisa y paralela a la inferior. Posteriormente, el estudio tribológico de los recubrimientos obtenidos a 30°C y 150°C se evaluaron mediante un tribómetro pin-on-disk, según la norma ASTM G99-05 [13]. Los parámetros del ensayo tribológico se resumen en la **Tabla 3**, se aplicaron para las pruebas en las muestras MB, COAT1 y COAT2. Adicionalmente, el desgaste se evaluó por medio del cálculo de la pérdida de volumen de la huella dejada en la superficie al finalizar la prueba y la huella de

desgaste, así como la rugosidad de área se determinó en un equipo de microscopía de fuerza atómica (MFA) marca Nanosurf empleando un canteliver de semi-contacto con punta de Si.

2.6. Evaluación mecánica por nanoindentación y análisis de superficies por microscopía de fuerza atómica

Previo a las pruebas de desgaste, la superficie pulida del MB, así como de los revestimientos, se llevó a cabo una matriz de 3 x 3 nanoindentaciones empleando un equipo de nanoindentación marca Rtec Instruments con una punta de diamante tipo Berkovich y cargas de fuerza de 200 μ N por 5 s de sostenimiento, con el fin de obtener los módulos elásticos y nanodurezas. Así mismo, se calculó el parámetro de recuperación elástica (W_e) y el coeficiente de disipación de energía (K_d).

Tabla 3. Parámetros empleados en las pruebas pin-on-disk

Parámetro	Valor
Velocidad lineal (cm/s)	10
Distancia de deslizamiento (m)	1000
Diámetro del pin de bola de zafiro (mm)	6
Distancia del pasador (mm)	3
Distancia del centro (mm)	6
Fuerza (N)	1, 3 y 6

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Efecto en el porcentaje de dilución y disminución de fases ricas en Cr y W

Una de las características principales del proceso por PTA en la recuperación de los componentes es la disminución del porcentaje de dilución, ya que indica dos aspectos importantes: 1) mejor eficiencia en la deposición del metal de aporte y 2) mejores propiedades de resistencia al desgaste con mayores espesores del revestimiento metálico. La **Figura 2** muestra una imagen representativa y una tabla promedio del % de dilución calculado de las áreas medidas de acuerdo con la ecuación 1 de las muestras COAT1 y COAT2. En este caso, la deposición del segundo revestimiento a 150°C (COAT2) presenta un porcentaje menor de dilución (Fig.2). Mientras el porcentaje de dilución del revestimiento COAT1 es mayor. Se postula que durante el

enfriamiento hasta los 30°C se alcanza una alta dilución, ya que se tiene mayor tiempo de difusión de especies químicas con el MB. Mientras en la muestra COAT2 no se alcanza una alta dilución debido a que la disponibilidad del solvente base Co incrementa y, disminuye el tiempo difusivo conforme incrementa el espesor del revestimiento.

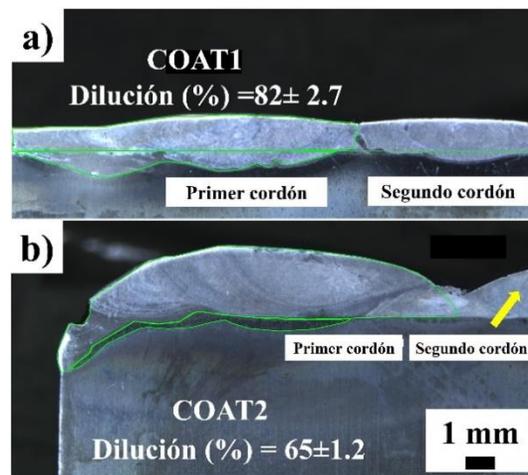


Figura 2. Imagen representativa y valores del porcentaje de dilución de los revestimientos base-Co: a) COAT1 a temperaturas de 30°C y b) COAT2 a temperatura de 150°C.

La **Figura 3** muestra imágenes de electrones secundarios y análisis químico lineal entre límites de grano en la zona de dilución de las muestras con revestimientos aplicados a 30°C y 150°C. Comparativamente, se aprecia a detalle en la **Fig.3a**, la presencia de alto contenido de Cr en el límite de grano, lo cual sugiere un empobrecimiento de Cr en los granos debido a la alta dilución, en consecuencia, este fenómeno disminuye la resistencia a la corrosión en la zona de dilución. Mientras tanto, una baja dilución en el revestimiento COAT2 contribuye a un menor empobrecimiento de Cr entre los otros elementos formadores de carburos como lo son: Cr, Mo, V (**Fig.3b**). Por otro lado, imágenes de electrones secundarios de fases eutécticas y la distribución de elementos químicos en el revestimiento COAT2 por MEB-EDS sugiere cualitativamente, un eutéctico con mayor concentración del elemento de Cr, así como fases ricas en W y C que denotan carburos en el recubrimiento (**Fig.4a**). Mientras tanto, en la **Fig.4b**, se aprecia una fase eutéctica con menor presencia de Cr y W confirmando una disminución de estos elementos debido a la alta dilución en el revestimiento COAT1.

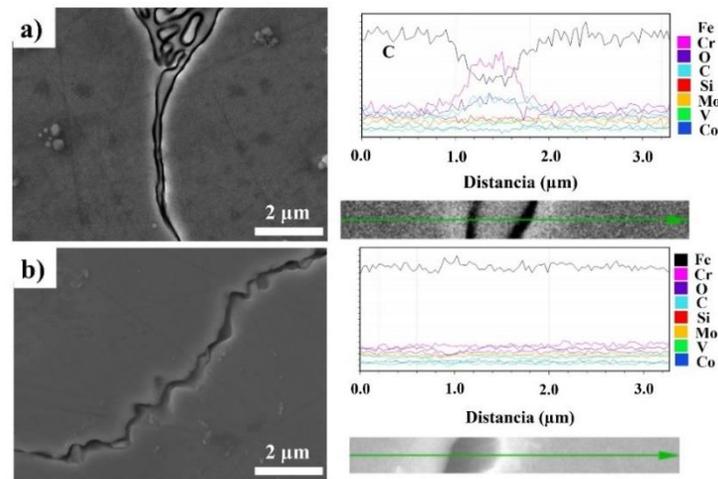


Figura 3. Imágenes de electrones secundarios y análisis lineal en los límites de grano en la zona de dilución analizados por MEB-EDS: a) Muestra COAT2 y b) Muestra COAT1.

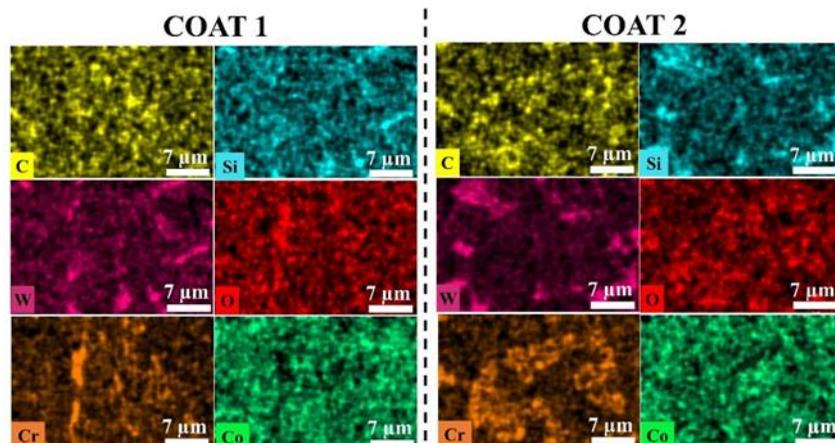


Figura 4. Detección de elementos químicos en los revestimientos analizados por MEB-EDS: a) Muestra COAT1 y b) Muestra COAT2.

3.2 Evaluación de las propiedades mecánicas elásticas de los revestimientos por nanoindentación

La evaluación mecánica elástica por la técnica de nanoindentación permite determinar los módulos elásticos, nanodurezas, rigidez de contacto, así como cantidades de energías relacionadas con el trabajo plástico y elástico. En la literatura [14] se sugiere otra forma de evaluar las propiedades mecánicas de los recubrimientos utilizando el parámetro de recuperación elástica (W_e) y el coeficiente de disipación de energía (K_d) que se calculan a partir de dos ecuaciones. En este caso, el coeficiente K_d

es la diferencia entre el área bajo las curvas de indentación de carga-descarga, y también se denomina energía de deformación plástica (E_p) (**Fig. 5a**). En el caso del parámetro W_e , se considera la energía de deformación elástica (E_e) que se logra mediante la recuperación elástica del material durante el proceso de descarga (**Fig. 5a**). K_d y W_e se calculan a partir de datos extraídos del paquete computacional Rtec. Las variables se sustituyen en las **Ecuaciones 2 y 3**:

$$K_d = \left(\frac{E_p}{E_T} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$W_e = \left(1 - \frac{h_f}{h_{max}} \right) \times 100 \quad (3)$$

K_d (%) es el coeficiente de disipación de energía, E_p (nJ) la energía plástica y E_T (nJ) es la suma de $E_p + E_e$ (energía plástica y energía elástica), mientras que en la **Ec. 3**, W_e (%) es el parámetro de recuperación elástica, h_{max} (nm o μm) es la profundidad máxima de penetración y h_f (nm o μm) la profundidad residual después de la descarga.

Los módulos elásticos y nanodurezas promedios en el MB tienen los valores más bajos de 157.02 GPa y 2.62 GPa con una mayor profundidad de huella máxima de ~ 1350 nm (**Fig.5b**). Por ende, mayor deformación, que se corrobora con la energía de recuperación elástica (W_e) de 52% y un coeficiente de disipación de energía (K_d) alto de $\sim 75\%$ (**Fig.5c**). Los módulos elásticos y nanodurezas del revestimiento COAT1 tienen mayores valores de 196.45 GPa y 3.01 GPa, respectivamente y menor profundidad de huella máximo de ~ 880 nm (**Fig.5b**). En consecuencia, tiene mejores propiedades elásticas, ya que su valor durante la recuperación elástica es de $\sim 60\%$ con una disipación de energía de $\sim 72\%$ (**Fig.5c**). Mientras tanto, el revestimiento COAT2 que presentó una menor dilución presenta los más altos valores en el módulo elástico y nanodureza promedio de 221.34 GPa y 5.67 GPa y una menor profundidad de huella de ~ 790 nm (**Fig.5b**). Estos valores confirman una mejora en la recuperación elástica de $\sim 66\%$ con una menor disipación de energía de 51% (**Fig.5c**).

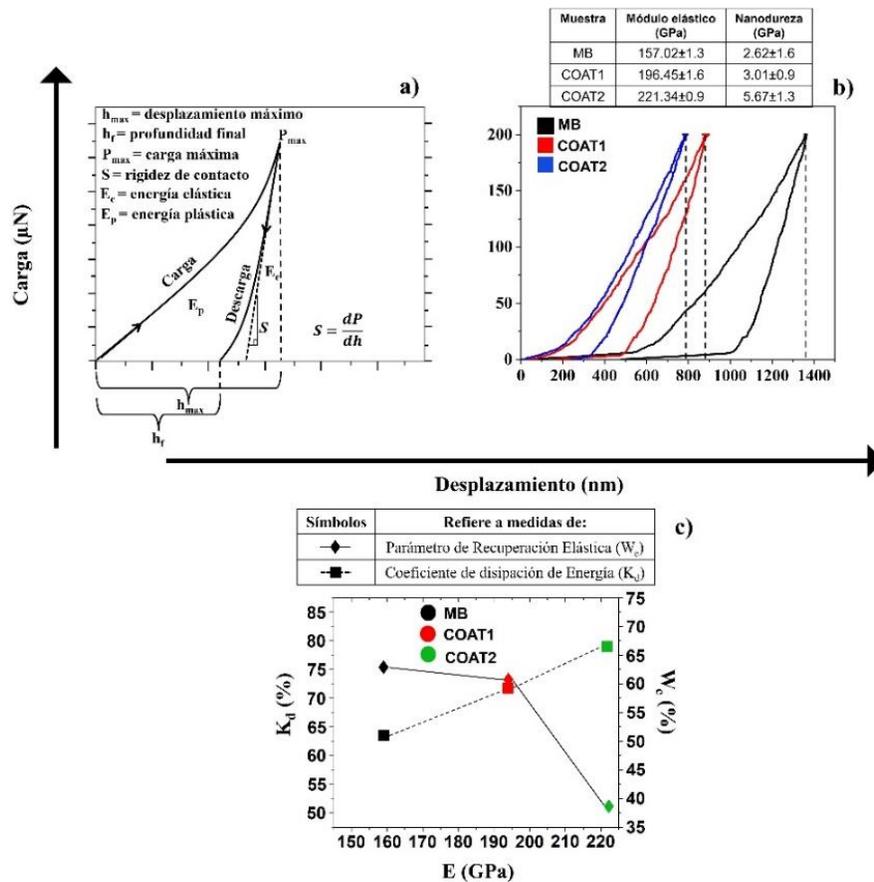


Figura 5. a) Esquema ilustrativo de una curva de nanoindentación; b) Curvas de carga-descarga aplicado a los revestimientos por nanoindentación y c) Gráficos de recuperación elástica (W_e) y disipación de energía (K_d).

3.3 Determinación de la resistencia al desgaste por pin-on-disk y análisis topográfico por microscopía de fuerza atómica (MFA)

La medición de la resistencia al desgaste se realizó a partir de la medición en 10 campos de las huellas de desgaste, empleando la Norma ASTM G-99 se calculó la pérdida volumétrica. La **Figura 6** muestra gráficos de barras de la pérdida volumétrica del MB y revestimientos COAT1 y COAT2 en función de la carga aplicada durante la prueba pin-on-disk. La muestra MB tiene mayor pérdida volumétrica y se incrementa a mayor carga obteniéndose un notable desgaste ~ de 1.77 mm³ a 6 N (**Fig. 6**). En el revestimiento COAT1 se muestra una pérdida volumétrica menor de 1.38 mm³ a carga máxima de 6 N. Mientras tanto, en el revestimiento COAT2 se reduce la pérdida volumétrica a ~ 1.27 mm³ debido a la menor disolución de las especies químicas de Cr y W en la matriz de Co (**Fig.6**). Cabe mencionar que el valor alto del módulo elástico

de 221.34 GPa y, aunado al bajo coeficiente de disipación de energía de 51% contribuyen a un menor desgaste del revestimiento COAT2 (Fig.5c y Fig.6).

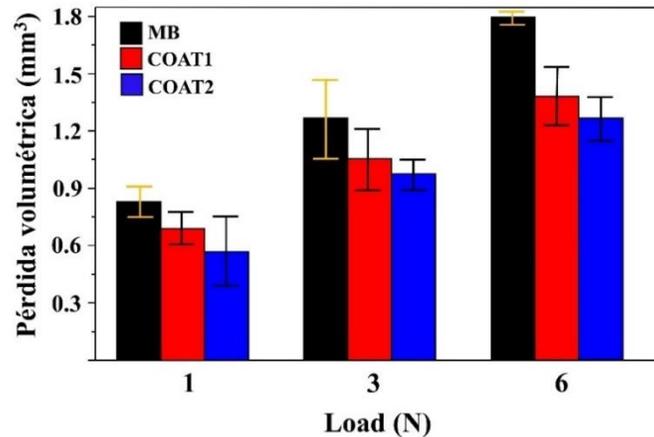


Figura 6. Gráficos de barras de la pérdida volumétrica del metal base (MB), revestimientos COAT1 y COAT2 bajo diferentes cargas aplicadas empleando la técnica pin-on-disk.

La Fig.7a-c muestra la apariencia topográfica y la rugosidad de área de las huellas de desgaste analizadas y procesadas por MFA. Los ensayos de desgaste sobre la superficie del MB presentan un mecanismo tipo abrasivo con un valor promedio de rugosidad de $S_a = 404.42 \mu\text{m}$ (Fig.7a). Comparativamente, en el revestimiento COAT1 muestra una rugosidad promedio de $S_a = 334.83 \mu\text{m}$ y un mecanismo de desgaste menos abrasivo (Fig.7b). En contraste, la topografía de desgaste del revestimiento COAT2 muestra un tipo de desgaste combinado entre abrasivo y deformación, ya que presenta características de huellas lisas y este es consistente con un menor valor de rugosidad promedio de área de $S_a = 131.15 \mu\text{m}$ (Fig.7c).

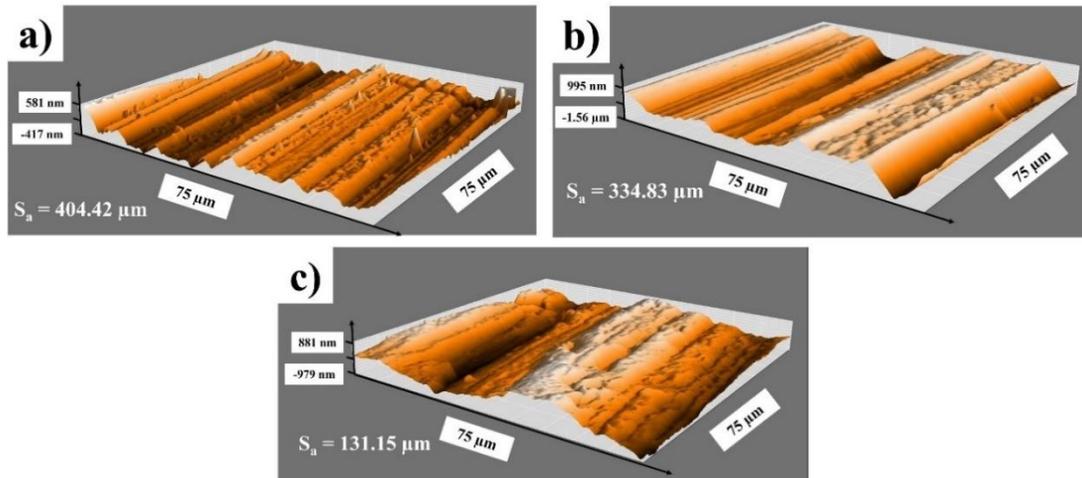


Figura 7. Imágenes topográficas de desgaste sobre muestras sin y con revestimientos a cargas máximas de 6 N analizadas por microscopía de fuerza atómica: a) MB; b) COAT1 y c) COAT2.

Conclusiones

- 1) El efecto de la deposición de dos revestimientos metálicos a 150°C (COAT2) contribuye a disminuir la dilución, en consecuencia, a una menor pérdida de Cr en los granos en la zona de dilución. En contraste, la aplicación de un segundo revestimiento a 30°C (COAT1) presenta una mayor difusión de los elementos de transición, en especial el Cr, ya que se detectó en el límite de grano. Por lo tanto, se sugiere una pérdida de este elemento en solución sólida al interior de los granos.
- 2) El menor valor del coeficiente de disipación de energía de $\sim 51\%$ en el revestimiento COAT2 contribuye a una menor deformación plástica y, mejor respuesta tribológica con una menor pérdida volumétrica de 1.27 mm^3 . Por el contrario, un alto valor del coeficiente de energía de $\sim 75\%$ en el MB, evidencia una mayor deformación plástica y disminución de la resistencia al desgaste con pérdidas volumétricas de 1.77 mm^3 y un tipo de desgaste tipo abrasivo observado por microscopía de fuerza atómica.
- 3) Los altos valores en el módulo elástico y nanodureza de 221.34 GPa y 5.67 GPa son debido a una mejor disolución y posible formación de carburos de las especies química de Cr y W en la matriz de Co, resultando en una mejora de las propiedades mecánicas elásticas y de resistencia al desgaste. La técnica de nanoindentación coadyuva a obtener mediciones de energía útiles para un

mejor análisis de la resistencia al desgaste que fue mayor para el revestimiento COAT2.

Agradecimientos

Se agradece a CONACyT por el apoyo de beca para Carlos Iván Godina Encinas, así como a COMIMSA por facilitar infraestructura para realizar este trabajo en el posgrado de Maestría en Tecnología de la Soldadura Industrial.

Referencias

- [1] Y. Birol. (2010), “*Thermal fatigue testing of Stellite 6-coated hot work tool steel*”, Materials Science and Engineering A”, No.527, pp. 6091–6097.
- [2] H.-J. Kim, Y.J. Kim. (1999), “*Wear and Corrosion resistance of PTA weld surfaced Ni and Co based alloy layers*”, Surface Engineering, V. 15, No. 6, pp. 495–501.
- [3] F. Paz-Triviño, R. Buitrago-Sierra, J. F. Santa-Marín. (2020), DYNA, “*Wear resistance and hardness of nanostructured hardfacing coatings*”, V. 87, No. 214, pp. 146–154.
- [4] A. Zamora López. (2016), “*Efecto de la adición de nanopartículas de WC y TiC en la modificación superficial del acero grado herramienta H13 mediante el proceso de plasma transferido por arco (PTA)*”, Tesis de maestría, COMIMSA, Maestría en Tecnología de la Soldadura Industrial, pp. 56.
- [5] M. S. Sawant, N. K. Jain. (2017), “*Investigations on wear characteristics of Stellite coating by micro-plasma transferred arc powder deposition process*”, Wear, V. 378, No. 379, pp.155–164.
- [6] J. Molina-Claros, H. M. Hdz-García, M. Alvarez-Vera, M. I. Pech-Canul, R. Muñoz-Arroyo, F. García-Vázquez, F. A. Hernández-García, J. C. Díaz-Guillen. (2017), “*Characterisation of PTA processed overlays without and with WC nanoparticles*”. Surface Engineering, V. 2, No. 1, pp. 1–9.
- [7] Q.Y. Hou, J.S. Gao, F. Zhou. (2005), “*Microstructure and wear characteristics of cobalt-based alloy deposited by plasma transferred arc weld surfacing*”, Surface & Coating, Technology, V.19, No.2, pp. 238–243
- [8] J.L. De Molvan Otterloo, J.Th. De Hosson. (1997), “*Microstructure and abrasive wear of cobalt laser coatings*”, Acta Materialia, V. 36, No.2, pp. 239–245.
- [9] L. Baiamonte. (2019), “*Tribological and high-temperature mechanical characterization of cold sprayed and PTA-deposited Stellite coatings*”, Surface & Coating Technology, V. 371, pp. 322–332.
- [10] N. M. Melendez, A. G. McDonald. (2013), “*Development of WC-based metal matrix composite coatings using low-pressure cold gas dynamic spraying*”, Surface & Coating Technology, V. 214, pp. 101–109.
- [11] K. Marimuthu, N. Murugan. (2003), “*Prediction and optimisation of weld bead geometry of plasma transferred arc hardfaced valve seat rings*”, Surface Engineering, V. 19, No. 2, pp. 143–149.
- [12] L. Bourithis, G. D. Papadimitriou. (2003), “*Synthesizing a class ‘M’ high speed steel on the surface of a plain steel using the plasma transferred arc (PTA) alloying technique: Microstructure and wear properties*”, Materials Science & Engineering: A, V. 361, No. 1, pp. 165–172.
- [13] ASTM Designation: G99–05. (2017), “*Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*”, ASTM, pp. 123.
- [14] L.A. Espitia, H. Dong, L. Xiao-Ying, C.E. Pinedo, A.P. Tschiptschin. (2017), “*Scratch test of active screen low temperature plasma nitrated AISI 410 martensitic stainless steel*”, Wear V. 376–377, No. 1, pp. 30–36.

EVALUACION MICROESTRUCTURAL DE UNIONES DE ACERO INOXIDABLE 304 EMPLEANDO GMAW ROBÓTICO

Bryan Ramiro Rodríguez Vargas^{1*}, Argelia Fabiola Miranda Pérez², Jorge Eduardo Hernández Flores³

¹Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Ciencia y Tecnología 790, Saltillo 400, Saltillo, Mx.

²Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 17 Sur, 901. Barrio de Santiago, Puebla, Mx.

³Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. Fundadores Km.13, Ciudad Universitaria, Arteaga, Mx.

*bryan.rdz@comimsa.com, argeliafabiola.miranda@upaep.mx, flores_jorge@uadec.edu.mx

Resumen

Debido a su popularidad por las excelentes propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, los aceros inoxidable han ganado posicionarse como materiales empleados en diversas industrias. En la fabricación de componentes, la soldadura, es uno de los procesos más empleados industrialmente. Sin embargo, en la actualidad aún se fabrican piezas industriales con procesos manuales o semiautomáticos, cuando la exigencia es incrementada, se recomienda emplear procesos robotizados para garantizar la repetibilidad y reproducibilidad. En este trabajo se realizaron uniones de acero inoxidable 304 mediante el proceso de soldadura GMAW para determinar el análisis de la microestructura obtenida empleando soldadura automatizada.

Palabras clave: Microestructura, Acero Inoxidable, Soldadura, GMAW

1.- Introducción

El uso de robots industriales se ha incrementado en procesos de manufactura donde es necesario un control de parámetros con el fin de aumentar la repetibilidad, y con ello, disminuir las pérdidas por errores humanos. Un robot industrial puede ser empleado para distintos procesos de fabricación, siendo el más común en la industria metal-mecánica, los utilizados para la soldadura.

Uno de los procesos de soldadura convencionales mayormente empleados en la industria, es el proceso soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa (GMAW, por sus siglas en inglés). Se trata de una tecnología de unión que permite la alimentación de un electrodo consumible empleando una atmósfera con gas inerte, activo o mezcla de ambos para proteger el charco de soldadura. Es un proceso versátil, ya que, por sus características se pueden realizar uniones en todas las posiciones, además, es empleado para soldar aleaciones base hierro como acero al carbono, inoxidable, de baja aleación e incluso materiales no ferrosos; permite soldar materiales con espesores desde 3 hasta 25 mm, esto último a través de multipasos ofreciendo una adecuada calidad y alta velocidad de aplicación de soldadura. Además, permite la variación entre distintos tipos de transferencia del metal de aporte que van alternando mediante la modificación de parámetros de operación. Esto último

toma relevancia, ya que de ellos dependen las características microestructurales y mecánicas resultantes de la unión soldada.

El acero inoxidable 304 presenta características mecánicas y microestructurales notables y ha sido altamente empleado en la industria química, por ejemplo, en la construcción de reactores y recipientes a presión [1,2] esto debido a que presentan una alta resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad y soldabilidad. Su uso también se extiende a la manufactura aditiva, donde se ha demostrado que se pueden obtener buenas juntas y cordones de soldadura empleando este material, sin disminuir sus propiedades [3,4]. Sin embargo, las uniones de estos aceros pueden presentar, durante el proceso de servicio, algunos problemas de corrosión sobre todo en la zona afectada por el calor (ZAC) la cual se convierte en un área mayormente debilitada debido las fases perjudiciales que se generan. Una buena elección de parámetros puede controlar la precipitación de dichas fases y así lograr una mayor resistencia cuando estos componentes están en servicio.

En el trabajo realizado por [5], hacen énfasis en que los carburos de cromo incrementan la susceptibilidad a la corrosión intergranular; la cual, de acuerdo con este estudio pueden ser controlados aplicando un tratamiento controlado de sensibilizado con el fin de reducir este problema para su posterior uso de la soldadura. Adicionalmente, la aplicabilidad de este material se extiende hacia operaciones de soldadura disímil, donde se requiere el uso de uno o más materiales diferentes; tal como lo muestra el estudio de Biswas, que logró una buena aplicación de soldadura, obteniendo una adecuada resistencia mecánica y calidad de unión aceptable [6].

En el presente trabajo se muestra la evolución microestructural de un acero inoxidable 304 soldado mediante el proceso de soldadura GMAW robotizado con el fin de obtener un mejor control de parámetros y así alcanzar una buena calidad en la unión.

2.- Metodología

El material empleado es un acero inoxidable austenítico 304, de composición química mostrada en la **Tabla 1**, de 3.5 mm de espesor, seccionado en 150 mm de largo por 100 mm de ancho como se muestra en la

Figura 7. Se utilizó un brazo robótico de la marca KUKA capaz de soportar y controlar la pistola de soldadura, la fuente de poder empleada fue mediante un equipo de Lincoln Electric y se utilizó un electrodo ER308 con composición química mostrada en la **Tabla 1**

Tabla 1. Composición química del acero inoxidable 304 y el electrodo empleado 308, mostrando los porcentajes en peso % e.p								
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Fe
Metal base 304	0.03	19.5-21	9-11	0.50	1.0-2.5	0.30-0.65	0.75	Bal.
Electrodo 308	0.03	19.5-22	9-11	0.75	1-2.5	0.03	0.75	Bal.

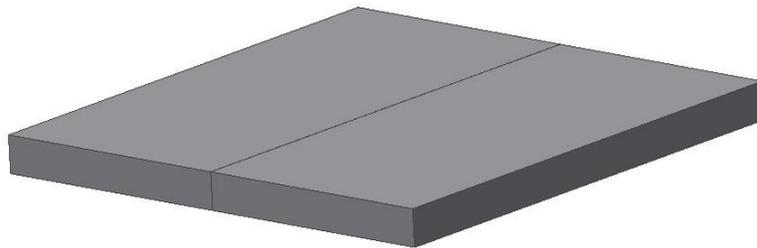


Figura 7. Configuración geométrica en 3D de las placas de acero inoxidable 304 para soldadura a tope.

Los parámetros empleados para la unión de este proceso están exhibidos en la **Tabla 2**, la unión se realizó con configuración a tope, sin bisel, empleando gas argón UAP con un flujo controlado de 40 CFH.

Tabla 2. Parámetros empleados para las uniones de acero inoxidable austenítico				
	Voltaje (V)	Intensidad de corriente (A)	Velocidad de alimentación (ipm)	Velocidad de avance (m/min)
Muestra 1	23	357	400	0.6
Muestra 2	30	357	400	0.6

La preparación de la muestra para la evaluación microestructural se realizó en base a la normativa ASTM E3, seccionando transversalmente con respecto al cordón de soldadura, con el objetivo de observar todas las áreas presentes en la unión. Para revelar la microestructura se empleó el reactivo de ataque Beraha's (3 g NH₄F·HF, 125 ml H₂O, 25 ml HCl y metabisulfito de potasio). La evaluación macroestructural se llevó a cabo utilizando un estereoscopio NIKON SMZ 745T donde se realizaron mediciones de los componentes principales de la soldadura entre ellas, la (ZAC, la zona de fusión

y refuerzo). Además, se evaluó microestructuralmente la unión mediante microscopía óptica y electrónica de barrido obtener una apropiada visualización de las fases formadas.

3.- Resultados

A continuación, se muestran las uniones soldadas efectuadas, en las cuáles se realizó una inspección visual para detectar posibles defectos o discontinuidades visibles en el cordón de soldadura. La **Figura 8** presenta ambas muestras de acero inoxidable austenítico, y se observa que tienen una excelente apariencia del cordón de soldadura, adecuada calidad superficial, libre de defectos como chisporroteo, socavado y/o falta de penetración.

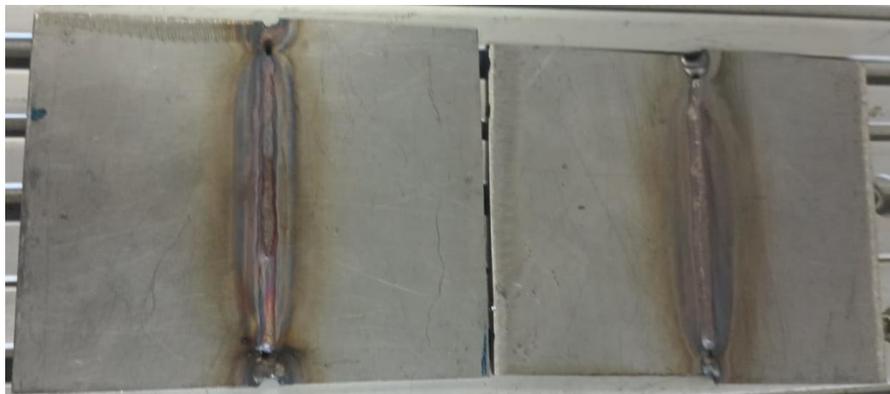


Figura 8. Muestras soldadas de acero inoxidable dúplex sin defectos superficiales aparentes.

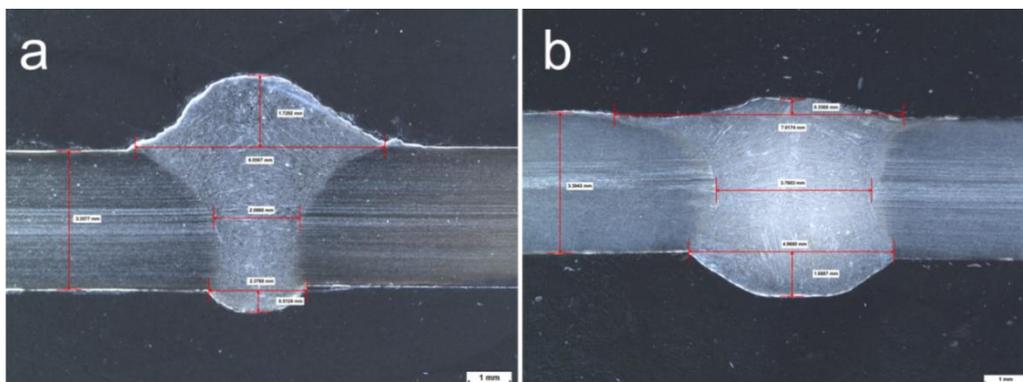


Figura 9. Macrografía mediante estereoscopia a 1x de (a) muestra 1 y (b) muestra 2.

En la **Figura 9** se puede observar las macrografías de la sección transversal de la pieza; el refuerzo en la muestra 1 (**Figura 9-a**) es relativamente más elevado (1.72 mm) en comparación con la muestra 2 (**Figura 9-b**), la cual presenta una reducción sustancial en el refuerzo (0.35 mm).

La evaluación microestructural del metal base revela una microestructura compuesta por los típicos granos austeníticos y maclas que se evidencian en la **Figura 10**, las cuales son formadas debido a una reorientación del grano.

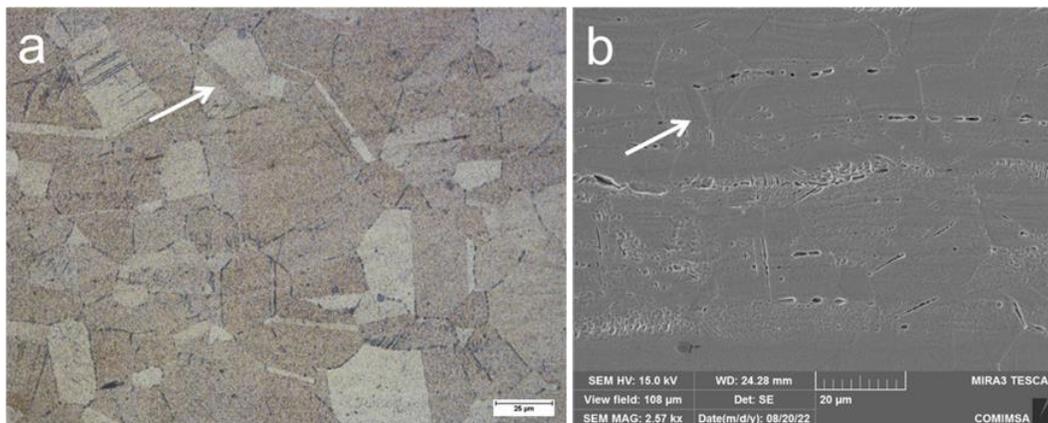


Figura 10. Micrografías del metal base (a) microscopía óptica a 50x y (b) microscopía electrónica a 2500x.

De acuerdo con el modo de solidificación de la soldadura, se puede inferir que ésta solidifica de la forma FA, (ferrita-austenita), lo cual se demuestra en la **Figura 11** con la microestructura obtenida. El modo de solidificación FA sucede cuando, en el momento de la soldadura, se genera la formación de la fase ferrita δ en fase líquida, y posteriormente inicia su crecimiento como fase primaria. Cuando se genera el enfriamiento rápido la austenita comienza a tomar el lugar de la ferrita primaria y el remanente presenta morfologías tipo esqueleto o de tipo listón (lathy).

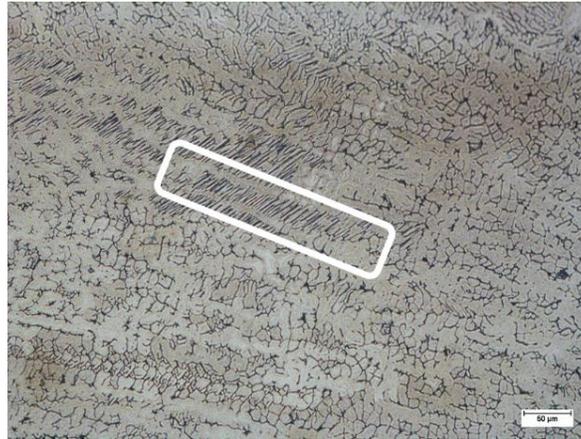


Figura 11. Zona de fusión evidenciando la presencia de ferrita lathy.

Finalmente se muestra la zona de transición (ver **Figura 12**) donde se puede observar fase tipo esqueleto en la zona de fusión (ZF), ferrita de morfología vermicular con un grano grueso en la zona afectada por el calor (ZAC) y grano austenítico en el metal base (MB).

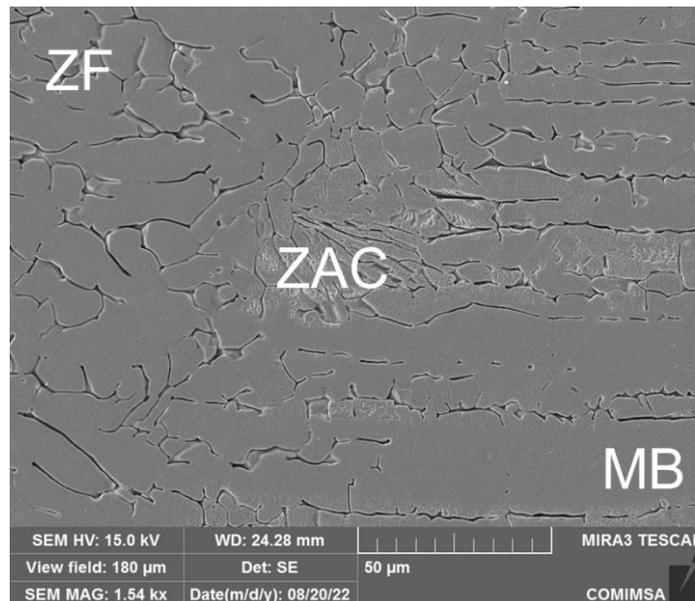


Figura 12. Zona de transición de la unión soldada mostrando las tres zonas de soldadura

Conclusiones

En el presente estudio se investigó la microestructura resultante de una unión soldada de un acero inoxidable dúplex 304 mediante un proceso controlado por un brazo de

robot. Con base a los resultados experimentales, se pueden generar las siguientes conclusiones:

- 1) El control de parámetros se obtuvo empleando el brazo robótico, el cual permitió una estabilidad del avance de soldadura y así obtener un cordón uniforme.
- 2) La inspección visual permitió demostrar que los parámetros empleados cumplieron con las características superficiales, sin presentar defectos como socavados o falta de penetración.
- 3) La variación del voltaje permitió obtener un refuerzo de soldadura menor en la muestra B, ya que al incrementar el voltaje se ensancha el cordón de soldadura, desplazándose el metal fundido hacia el metal base con mayor facilidad.
- 4) La microestructura obtenida de la soldadura del acero 304 consta de dos fases principales: las dendritas austeníticas columnares y la ferrita residual existente dentro de la matriz austenítica. Se muestran estructuras columnares que crecen de manera epitaxial desde la zona de fusión.
- 5) Se demostró tener un modo de solidificación de tipo FA de acuerdo con la composición química tanto del metal base como del metal de aporte.
- 6) La microestructura obtenida fue similar en ambas muestras, la principal diferencia fue sobre la geometría obtenida de la sección transversal de cada soldadura.

Agradecimientos

Los autores brindan su agradecimiento al Ing. Ramiro Rodríguez Rosales (Certified Welder por la AWS) y al Mtro. Miguel Ángel Carrizalez (Certified Welding Inspector por AWS) por sus aportaciones al desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] J. Hesketh, E. J. F. Dickinson, M. L. Martin, G. Hinds, and A. Turnbull, "Influence of H₂S on the pitting corrosion of 316L stainless steel in oilfield brine," *Corros. Sci.*, vol. 182, p. 109265, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.corsci.2021.109265.
- [2] X. Lin et al., "Corrosion of phase and phase boundary in proton-irradiated 308L stainless steel weld metal in simulated PWR primary water," *Corros. Sci.*, vol. 165, p. 108401, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.corsci.2019.108401.
- [3] V. T. Le, D. S. Mai, T. K. Doan, and H. Paris, "Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 24, no. 4, pp. 1015–1026, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jestch.2021.01.009.
- [4] T. Artaza, A. Suárez, M. Murua, J. C. García, I. Tabernero, and A. Lamikiz, "Wire Arc Additive Manufacturing of Mn₄Ni₂CrMo Steel: Comparison of Mechanical and Metallographic Properties of PAW and GMAW," *Procedia Manuf.*, vol. 41, pp. 1071–1078, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.10.035.

[5] P. Dai, S. Li, L. Wu, Y. Wang, G. Feng, and D. Deng, "A new numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless steel joint," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 17, pp. 234–243, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.01.015.

[6] A. R. Biswas, S. Chakraborty, P. S. Ghosh, and D. Bose, "Study Of Parametric Effects On Mechanical Properties Of Stainless Steel (AISI 304) And Medium Carbon Steel (45C8) Welded Joint Using GMAW," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 12384–12393, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.217.

OPTIMIZACIÓN DE LA DUREZA EN LA UNIÓN DE LÁMINAS DE ACERO DP270 POR RSW MEDIANTE EL MÉTODO DE TAGUCHI

E. Bautista-Rodríguez¹, F. Reyes-Calderón¹, R. Vences-Hernández¹, N. Alcantar-Mondragón¹, V. García-García¹, V.H. Baltazar-Hernández²

¹Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Maestría en Ciencias en Metalurgia, Departamento de Metalmecánica. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia.

²Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Unidad Académica de Ingeniería I, Universidad Autónoma de Zacatecas

Resumen

En este presente trabajo de investigación, se realizó la optimización de soldeo del acero doble fase DP 270 (DP - Dual Phase) utilizado en la industria automotriz, empleando el proceso de resistencia por puntos (RSW Resistance Spot Welding). La optimización se dio a partir de un diseño de experimentos (DoE), L9 para este caso, el cual se efectuó con ayuda del software Minitab, para su posterior evaluación por el método de Taguchi, analizando la relación S/N, que es la correlación entre la "señal", la cual representa el valor deseable, y el "ruido", que es el valor no deseable, tomando como variable de respuesta la microdureza. Los resultados determinan que un diseño experimental, en procesos de soldadura, reduce el número de partidas a realizar, teniendo como valor agregado, la optimización del proceso, según la variable de respuesta que se desea. La caracterización metalográfica, es indispensable, con el fin de evaluar la unión metalúrgicamente, con el comportamiento de microdureza.

Palabras clave: DoE, Taguchi, DP, RSW

1.- Introducción

Con el aumento de la crisis ambiental y energética, el ahorro de energía y reducción de emisiones se han convertido en un tema inevitable en el diseño y fabricación de automóviles. Se señala que el 50% del consumo de combustible es generado por el peso del vehículo [1].

Los aceros de doble fase (DP - Dual Phase) se encuentran entre los preferidos en la industria automotriz debido a su combinación de alta resistencia y buena elongación, estos consisten en una matriz ferrítica que contiene una fracción variable de martensita. La fase ferrítica es blanda y generalmente continua, proporcionando una excelente ductilidad [2]. La soldadura de resistencia por puntos (RSW - Resistance Spot Welding) es el método más utilizado para unir materiales de este tipo, debido a su bajo costo y alta eficiencia [3-5]. Aproximadamente el 85% de las soldaduras de un automóvil lo realiza RSW, este proceso de soldadura se caracteriza por sus pequeñas áreas de unión, llamadas puntos o botones [6], una carrocería de automóvil contiene

aproximadamente de 4000 a 6000 de estas uniones [7]. Es un proceso sencillo que utiliza dos electrodos de cobre para unir las láminas de acero y forzar el paso de alta corriente a través de ellas [9], la calidad y resistencia de las soldaduras se definen por la eficacia de los botones de soldadura [8]. La resistencia de la soldadura se mide mediante una serie de pruebas destructivas estandarizadas, que someten a la unión a diferentes tipos de carga, algunos de estos son, tensión, torsión, impacto, fatiga y dureza [10]. Los parámetros involucrados en el proceso de soldeo, son: la fuerza del electrodo, la corriente, el tiempo de soldadura, el tiempo de mantenimiento y el tiempo de enfriamiento [9]. La optimización de los parámetros del proceso puede mejorar las características de calidad [11], uno de los métodos es mediante el uso de Diseño de Experimentos (DoE), los parámetros operativos se optimizan utilizando el Método Taguchi [8], para mejorar la calidad y la fiabilidad de la fabricación de materiales o productos terminados a través de parámetros de entrada al proceso [4].

Taguchi es una herramienta para descubrir el efecto de los parámetros del proceso soldadura en la calidad [12], la técnica utiliza un diseño de matrices ortogonales para identificar la configuración óptima de los parámetros, que es insensible a la variación y los efectos causados por el ruido en el proceso [4]. La relación S/N es la relación entre la "señal" que representa el valor deseable, y el "ruido" que representa el valor no deseado [8,11,14-15]. La condición óptima se selecciona de modo que la influencia de factores incontrolables pueda minimizar la variación en el rendimiento del sistema [13]. Diversos resultados experimentales confirmaron la validez del método de Taguchi para optimizar el proceso de soldadura de resistencia por puntos [16], tal es el caso de Makwana Brijesh et al. (2017), quien usó el método de Taguchi para reducir el número de corridas para el trabajo experimental y encontrar los resultados óptimos. Eisazadeh et al. determinaron que la calidad de la soldadura está controlada por el botón de soldadura, de manera similar, Thakur et al. afirman que la mejor manera de juzgar la calidad del RSW es por el tamaño del botón, la Zona Afectada por el Calor y la resistencia mecánica [12].

2.- Metodología

El material utilizado para la experimentación de esta investigación es un acero doble fase 270 (DP - Dual Phase) en forma de lámina de 0.48 mm de espesor, estas laminas son seccionadas en segmentos de 4 cm por lado.

Para la unión de las láminas se empleó una máquina soldadora por puntos Pirámide modelo O357 controlado por el software LabVIEW® para la manipulación de los

parámetros, estos son la intensidad de corriente (I) y el tiempo (t), así como la presión, la máquina soldadora en cuestión se puede observar en la siguiente imagen, **Figura 1**.



Figura 13. Máquina Piramide modelos O357[4].

En esta investigación se utilizó el diseño de experimentos de Taguchi ($L^9, 3^3$). Los datos de soldeo se obtuvieron a partir de investigaciones previas [4], en la **Tabla 1** se pueden observar los factores utilizados, así como sus niveles.

Tabla 3. Factores para la generación de la matriz experimental.

Nivel	Intensidad de corriente (A)	Tiempo (s)	Presión (psi)
1	3000	800	100
2	3500	1300	110
3	4000	1800	120

A partir de los factores y con el uso de Minitab se obtuvieron los parámetros de soldadura, estos se pueden observar en la **Tabla 2**.

Tabla 4. Parámetros de soldadura

No.	Intensidad de corriente (A)	Tiempo (s)	Presión (psi)
1 (B1)	3000	800	100
2 (B2)	3000	1300	110
3 (B3)	3000	1800	120

4 (B4)	3500	1300	100
5 (B5)	3500	1800	110
6 (B6)	3500	800	120
7 (B7)	4000	1800	100
8 (B8)	4000	800	110
9 (B9)	4000	1300	120

Para revelar la microestructura de las uniones, estas se sometieron a la técnica de con papel lija (80, 100, 150, 180, 220, 360, 400, 600, 1000, 1200, 1500 hasta 2000 partículas por pulgada cuadrada), y un pulido final con alúmina de $0.3 \mu\text{m}$, finalmente se efectuó un ataque químico con nital al 3% por 3 segundos, las micrografías fueron capturas con un microscopio óptico (Optika microscope XDS-3 MET), este utiliza un software de nombre Optika visión lite.

La microdureza de las uniones fue obtenida por un equipo de marca MITUTOYO® modelo MVKHLV. Los parámetros de las indentaciones son: carga de 200 gr, tiempo de 15 segundos. Las indentaciones fueron realizados según el diagrama que se presenta en la **Figura 2**, iniciando en la lámina superior en la ZAT (Zona Afecta Térmicamente), continuando con un barrido sobre el botón de soldadura (ZF - Zona de Fusión) y culminando en la ZAT de la lámina inferior.

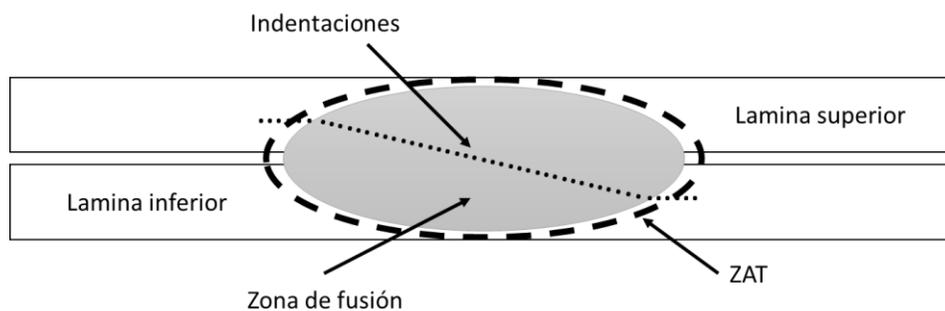


Figura 14. Perfil de microdureza en la sección transversal del botón de soldadura.

3.-Resultados y Discusión

Con la ayuda de la preparación de muestras se obtuvo mediante microscopía óptica la siguiente microestructura (**Figura 3**), donde se observan las fases características de un acero doble fase, las zonas con una tonalidad oscura, presumiblemente son de martensita, estas tienen una dureza promedio de 170.46 HV, en cambio, las zonas en tonalidad clara, pertenecen a la fase de ferrita. la cual tiene una dureza de 139.26 HV.

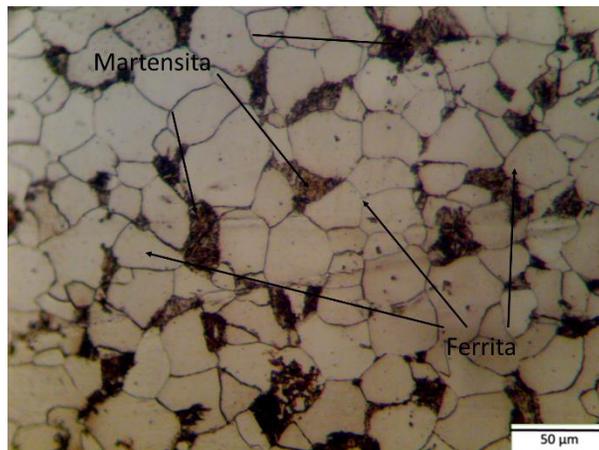


Figura 15. Microestructura de acero DP270. Imagen capturada en microscopio óptico a 500X.

Una vez obtenida la microestructura del acero DP y los parámetros de soldadura, se procedió a soldar las láminas doble fase, la unión se dio de acuerdo al orden visto en la **Tabla 2**. En la **Figura 4** se observa el botón de soldadura No.8 (B8), esta condición tiene los siguientes parámetros 4000 A de intensidad de corriente, una presión de 110 psi en un tiempo de 800 s, este es un ejemplar de los 9 obtenidos.



Figura 16. Botón de soldadura No.8 (B8)

Después de realizar la preparación metalográfica a los de botones de soldadura, se procedió a identificar las diferentes fases que existen, las cuales son: CGHAZ Zona de grano grueso, FGHAZ Zona de grano fino (recristalización), ICHAZ Zona parcialmente transformada (intercrítica), SCHAZ Zona (subcrítica), MB Metal base (DP270), estas zonas de soldadura son observables en la **Figura 5**, en donde también se evidencia la presencia de algunos poros en la zona de fusión. Las fases presuntamente presentes

en el botón de soldadura, pudieran corresponder a la martensita en la ZF, y ferrita en dirección hacia la zona del MB [4]. Al estar presente estas distintas fases, la dureza a través del botón de soldadura pudieran cambiar de un valor alto, en la martensita (FZ), a un valor menor, en la ferrita (en dirección al MB recorriendo la ZAT).

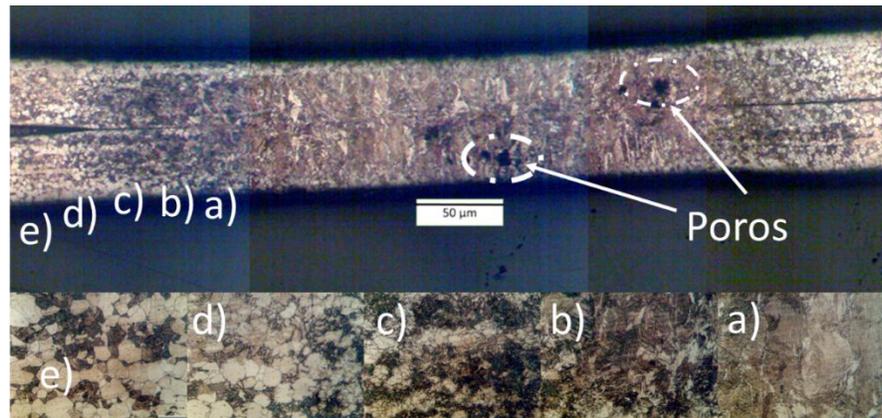


Figura 17. e) CGHAZ Zona de grano grueso, d) FGHAZ Zona de grano fino (recristalización), c) ICHAZ Zona parcialmente transformada (intecrítica), b) SCHAZ Zona (subcrítica), a) MB Metal base (DP270).

La dureza obtenidos de los distintos botones se aprecia en la figura 6, donde destaca la condición B8 sobre las demás, debido al mayor valor promedio de dureza obtenido durante el ensayo en el microdurómetro, esta muestra tiene una dureza de 278.2 HV, en cambio, la muestra B3, es la que registra un valor menor de dureza, esta es de 209.93 HV. Las demás se mantienen en un rango de 230 a 270 HV.

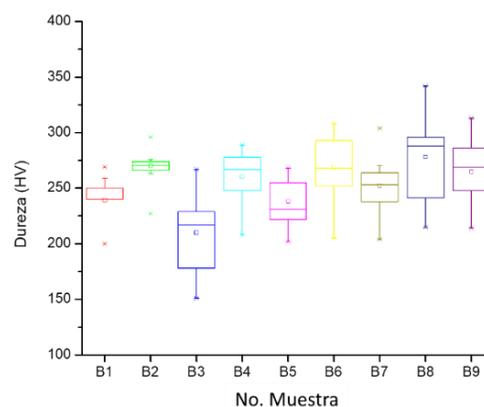


Figura 18. Dureza de los botones de soldadura

En la **Figura 7** se percibe el perfil de microdureza de la muestra B8, donde se aprecia un aumento considerable de dureza en la zona de fusión, en el que existen valores cercanos a 350 HV, la ZAT, donde la dureza es claramente menor, disminuye a un

rango de 200 a 250 HV, y a un rango promedio de 120 HV en el metal base. De acuerdo a los valores obtenidos de dureza en la muestra 8, se puede atribuir la presencia de la fase martensita en la zona de fusión, y ferrita conforme se aleja de esta zona y se acerca al MB.

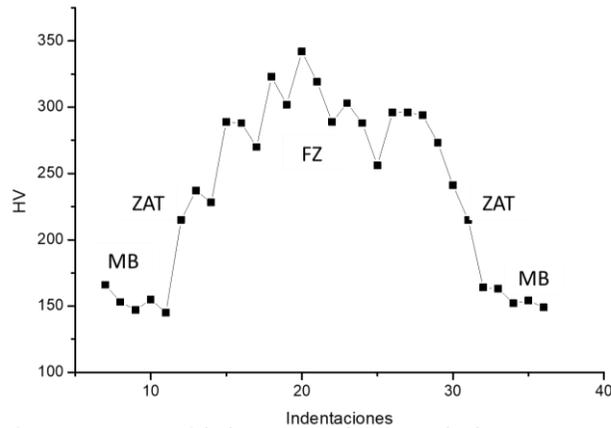


Figura 19. Perfil de microdureza de la muestra B8

La optimización de la unión del acero DP270 se obtiene de la gráfica que se encuentra en la **Figura 8** con el uso de Taguchi, en ella se observan 3 apartados que corresponden a las variables utilizadas en el proceso de soldeo por RSW, donde A pertenece a la variable de corriente (Amp), B es la presión en psi y C es el tiempo de soldadura en segundos. Analizando esta gráfica y asumiendo que, más es mejor, según lo establecido en el método de Taguchi, la condición óptima de soldeo es de 4000 A, 110 psi de presión y un tiempo de 1300 s, donde la variable de respuesta, es la dureza.

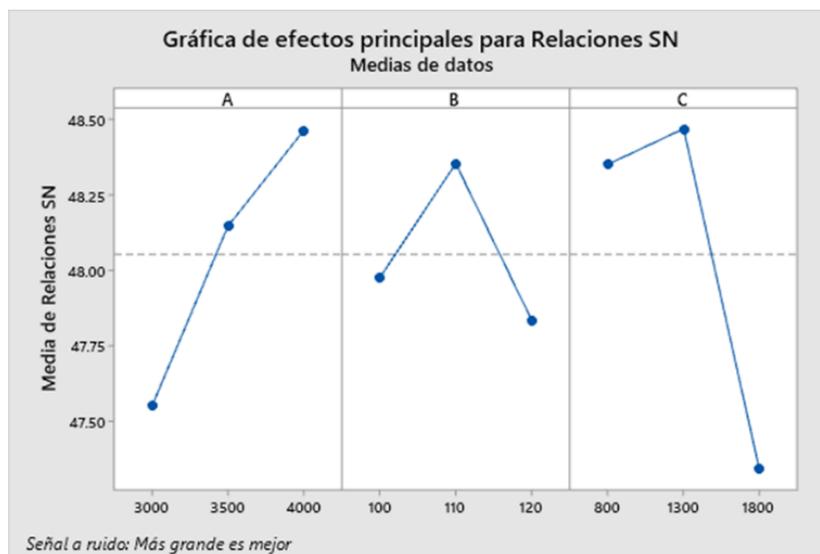


Figura 20. Gráfica Señal-Ruido

Con este valor óptimo, la predicción de dureza generada por Taguchi, es de 285.40 HV. Realizando una comparación con la dureza de los botones del diseño experimental, este dato es comparable a la muestra B8, la cual tiene una dureza de 278.2 HV con un parámetro de soldeo de 4000 A de intensidad de corriente, presión de 110 psi en un tiempo de 800 s, donde se destaca, que la variable tiempo, es el único que cambia en relación a lo obtenido por el método de Taguchi, como condición óptima de soldadura, para el acero DP270 con un espesor de 0.48 mm.

Conclusiones

- 1) Existe una relación entre la microestructura del botón y la microdureza. En la zona de fusión, se presume, existe una mayor cantidad de martensita, puesto que se evidencia un aumento de dureza en esta zona en relación a la ZAT y al MB.
- 2) La muestra B8, es que la tiene mayor dureza con respecto a los otros botones, obteniendo una microdureza promedio de 278.2 HV
- 3) La optimización a cargo del método de Taguchi arroja que la condición óptima de soldeo para el acero DP270 es de 4000 A, 110 psi de presión a un tiempo de 1300 s, obteniendo con ello, un valor predictivo de dureza de 285.40 HV, este dato es semejante a lo obtenido por la muestra B8, la cual presenta parámetros de soldeo parecidos.
- 4) El diseño de experimentos en los diferentes procesos de soldadura es indispensable, ya que se reduce el número de partidas a soldar, generando, además, confiabilidad en el proceso, debido a la optimización mediante el uso de Taguchi.

Sugerencias y recomendaciones

De acuerdo a las distintas formas de evaluar un botón de soldadura, se sugiere que se realicen pruebas mecánicas para ampliar el comportamiento del acero DP270 unido por resistencia de puntos. Tal es el caso de tensión y ensayos de Peel.

El uso de DRX es necesario para saber con exactitud que fases coexisten a través del botón de soldadura.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Morelia por el apoyo en laboratorios y equipos. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) por el apoyo al proyecto, con las becas nacionales para estudiantes de posgrado de E. Bautista y N. Alcantar (813408 y 749874).

Referencias

- [1] Lei, Z., Liu, J., & Wei, C. Comparative Fatigue Life Study on the Indentation Levels of Resistance Spot Welds with Dual Phase Steel, (2016), p. 177-183.
- [2] Suoboda, H., Lorusso, H. N., & Burgueño, A.. Soldadura de aceros dual phase en chapa fina: GMAW, PAW y RSW. *Soldagem e Inspecao*, 16(2), (2011) p. 165-176.
- [3] Dawki, H., Gamal, A., & El-kolaly, O. *A Review Paper on the Development of Dual Phase Steel. September*, (2020), p. 1-18.
- [4] Reyes-Calderón, F., Vences-Hernández, R., Salazar-Torres, J. A., Vergara-Hernández, H. J., Aguilera-Navarrete, I., & Pérez-González, V. Parameter optimization: Force (F), time (T) and current intensity (I), in the RSW welding process of DP-290 steel plates using the taguchi (2018), p. 157-167.
- [5] Feng, Q. B., Li, Y. B., Carlson, B. E., & Lai, X. M. Study of resistance spot weldability of a new stainless steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 24(2) (2019), p. 101-111.
- [6] Hjelmtorp, K. Resistance Spot Welding of AlSi-coated Ultra High Strength Steel: An experimental study. *Technical Report, KTH Vetenskap OCH Konst*. (2019).
- [7] Selova, L., Aydin, H., Tuncel, O., & Cavusoglu, O.. Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Three-Sheet Stack Joints of Dissimilar Steels in Different Welding Time. *3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, September*. (2019)
- [8] Jadhav, N. D., Patil, R. A., & Patil, R. R.. *Parametric Optimization of Spot Welding metal by Taguchi Approach*. 3(4), (2015), p.857-860.
- [9] Arinate, M., Elayachi, I., & Akourri, O. The Process of Optimization of Spot-Welding Conditions and Analyze of the Effect on the Nugget Diameter by Using Taguchi Methodology. *International Journal of Materials Science and Engineering*, 8(4), (2020). p. 118-129.
- [10] Singh, N. K., & Vijayakumar, Y. Application of Taguchi method for optimization of resistance spot welding of austenitic stainless steel AISI 301L. *Innovative Systems Design and Engineering*, 3(10), (2012). p. 49-61.
- [11] Pandya, D. H. Optimization of MIG welding Process Parameter using Taguchi Techniques. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 1(05). (2014).
- [12] Rizvi, S. A., & Ali, W. Optimization of welding parameters and microstructure and fracture mode characterization of GMA welding by using Taguchi method on SS304H austenitic steel. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 22(4), (2018). p. 1121-1131.
- [13] Mat Yasin, N. A., Alisibramulisi*, A., Salleh, Z., Ghazali, F. A., & Pawan, A. Optimization of Resistance Spot Welding (RSW) Parameters by using Taguchi Method. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(3), (2020). p. 2795-2800.
- [14] Hernández, A., Paz, M., & García, L. La metodología de Taguchi en el control estadístico de la calidad. *Revista De La Escuela De Perfeccionamiento En Investigación Operativa*, 23(37), (2015). p. 65-83.
- [15] Thakur, A. G., Rao, T. E., Mukhedkar, M. S., & Nandedkar, V. M. Application of Taguchi method for resistance spot welding of galvanized steel. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(11), p. (2010). 22-26.
- [16] Singh, N. K., & Vijayakumar, Y. Application of Taguchi method for optimization of resistance spot welding of austenitic stainless steel AISI 301L. *Innovative Systems Design and Engineering*, 3(10), (2012). p. 49-61.

SOLDEO DE UNIONES EN T EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS UTILIZANDO EL PROCESO GMAW CON LOS MODOS DE TRANSFERENCIA SPRAY Y CORTO CIRCUITO

J.G. Granados Sánchez¹, F. Reyes Calderón¹, V. García García¹, N. Alcántar Mondragón¹, R. Vences Hernández¹.

¹Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Maestría en Ciencias en Metalurgia, Departamento de Metalmeccánica. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia.

Resumen

En el presente trabajo de investigación se evaluó el efecto en la penetración de raíz y dilución del uso del proceso GMAW con dos modos de transferencia de metal de aporte (Spray y Corto Circuito) en uniones en T empleadas para unir PTR (AISI 1020) con soleras (ASTM A36). Las macrografías obtenidas permitieron observar que el uso de un gas de protección de 100% CO₂ y un modo de transferencia de corto circuito propicia un incremento significativo en la penetración de raíz y dilución, mientras que emplear el modo de transferencia spray genera socavones debido al alto HI. El análisis metalográfico, permitió observar diferencias significativas en la presencia de las morfologías de la ferrita Widmanstätten y Acicular en la ZF de los cordones realizados con ambos modos de transferencia de metal de aporte. De acuerdo con lo descrito anteriormente, se concluye que el modo de transferencia GMAW-Spray no es factible para ser empleado en este tipo de uniones, debido a los socavones generados y su baja penetración de raíz, y que en su lugar debe emplearse GMAW-CC para realizar una optimización paramétrica que permita hallar los parámetros que maximicen la dilución y penetración de raíz.

Palabras clave: GMAW, GMAW-Spray, GMAW-CC, AISI 1020, ASTM A36.

1.- Introducción

La soldadura se ha convertido en el método de fabricación más común de estructuras de acero, prefiriéndose encima de procesos como el remachado y uso de uniones atornilladas. Este proceso de manufactura es el método más comúnmente utilizado para obtener uniones de alta resistencia, confiables y de bajo costo [1-3]. Se destaca que de manera general existen dos tipos de uniones empleadas; las uniones a tope y a filete [4]. En la industria de la construcción, las uniones en filete y soldaduras de penetración parcial, tomando en cuenta que una unión en filete es de gran penetración cuando la penetración de raíz es igual o mayor a 2.4 mm [4], son comúnmente utilizadas ya que no necesitan de ninguna preparación de junta al ser las

caras de unión partes mismas de las piezas de trabajo. Haciendo que las uniones en filete sean relativamente baratas de producir [5,6].

Las soldaduras en filete son generalmente aplicables para la transferencia de fuerzas cortantes paralelas al eje de soldeo y de fuerzas estáticas transversales al eje de soldeo. Se destaca que el soldeo en filete se emplea en la manufactura de juntas en T, uniones de esquinas y a traslape [7]. En las uniones en T el borde de una pieza de metal se coloca sobre otra superficie metálica usualmente a un ángulo de 90° una con respecto de la otra [8]. Las uniones e T son un tipo de uniones comúnmente usadas en múltiples sectores industriales como lo son; la industria petrolera, alimenticia, automotriz, aeroespacial, entre otros [9-11].

El proceso GMAW/MIG (por las siglas en inglés de Gas Metal Arc Welding/ Metal Inert Gas) es uno de los procesos preferidos para realizar uniones en materiales metálicos ya que cuenta con múltiples ventajas como; un costo productivo óptimo, mejor calidad superficial y resistencia mecánica, y una velocidad de producción razonable [12-14]. En este proceso, el calor del arco es utilizado para fundir un electrodo consumible en forma de cable que es alimentado de manera continua en la piqueta de soldadura mediante una pistola que a la vez suministra gas de protección (argón, dióxido de carbono u otras mezclas de gases activos e inertes) cuya finalidad es proveer una atmósfera para proteger la piqueta de contaminantes exteriores [8, 13-15]. El proceso GMAW permite realizar la transferencia del metal de aporte a la piqueta de soldadura principalmente mediante cuatro modos distintos; corto circuito, globular, spray y arco pulsado. Cada uno de estos modos se obtiene mediante el cambio de voltaje y amperaje lo cual se logra modificando la configuración del equipo de soldadura (velocidad de alimentación, longitud de arco, caudal y composición del gas protector, etc.) [8].

Múltiples investigaciones se han realizado con la finalidad de estudiar los efectos de la variación de parámetros de soldeo en el proceso GMAW en la penetración de raíz y las gargantas de las uniones en T y la correlación de dichos datos con cambios microestructurales y en las propiedades mecánicas.

Marconi et al. [16] estudiaron el efecto del gas de protección (Ar-20\% CO_2 y $100\% \text{CO}_2$) y de los ángulos de desplazamiento (45° y 60°) y trabajo (30° , 45° y 60°) en la calidad morfológica y la resistencia mecánica de juntas T de un acero micro aleado para aplicaciones industriales agrícolas, concluyendo que las mejores condiciones

morfológicas y de penetración se obtienen al emplear 100% CO₂ como gas de protección y ángulos de trabajo y de desplazamiento de 45°.

Dutra et al. [17] emplearon el proceso GMAW bajo la condición de arco enterrado para evaluar el efecto de la transferencia de metal de aporte en la morfología y penetración de los cordones realizados en uniones en T y a tope de acero ASTM A36 de 9 mm de espesor, con diferentes mezclas de gases de protección. Compararon los resultados con los obtenidos empleando un modo de transferencia de metal de aporte pulsado, concluyendo que para lograr obtener grandes penetraciones no es necesario emplear formas de onda complejas, si no cuidar aspectos como una selección correcta del gas de protección y una velocidad de alimentación adecuada para obtener un comportamiento dinámico de la piletta favorable para la morfología y penetración máxima de la unión.

Hajro & Tasic [18] estudiaron el efecto del calor de aporte y la posición de soldeo en la geometría del cordón en un acero estructural S235JR de 6 mm de espesor empleando un modo convencional de transferencia de metal de aporte y uno avanzado (GMAW-P). Concluyeron que el calor de aporte tiene una gran influencia en la geometría del cordón (lo cual determina su resistencia efectiva y calidad) y que al realizar el soldeo de uniones en filete sobrecabeza deben emplearse parámetros que otorguen calores de aporte más bajos con la finalidad de maximizar la dilución, penetración y minimizar la sobremonta.

Baskoro et al. [19] realizaron una optimización paramétrica empleando el método de Taguchi utilizando la corriente de soldadura y la velocidad de avance como variables de entrada para obtener como salida la mínima distorsión angular y longitudinal posible en el soldeo de uniones en filete con preparación de bisel de acero estructural A36 de 5 mm de espesor. Concluyeron, con base al análisis de varianza que la corriente de soldadura afecta de manera muy significativa a la distorsión longitudinal (64.36 %) mientras que la distorsión angular se ve notablemente afectada por la velocidad de avance (53.38 %).

Sikstrom & Öberg [20] llevaron a cabo el monitoreo en tiempo real de la variación de la distancia de la tobera a la pieza de trabajo (GAP) durante el soldeo de uniones en filete de acero estructural S355 de 12 mm de espesor mediante un sistema robotizado de GMAW, logrando establecer un modelo relacional coherente entre el GAP y la profundidad de penetración de raíz para ser empleado en posteriores aplicaciones industriales.

Deshpande et al. [21] estudiaron la influencia de la corriente, voltaje y la velocidad de alimentación sobre la longitud de penetración de raíz empleando el proceso GMAW en la soldadura de juntas T de acero S235 de 3 mm de espesor. Mediante el uso del método de Taguchi determinaron que los parámetros que en gran medida influyen en la longitud de penetración son el voltaje y corriente de soldeo.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad evaluar el efecto de emplear los modos de transferencia de metal de aporte corto circuito y spray en la penetración de raíz, gargantas de la unión y cambios metalúrgicos en uniones en filetes de un solo lado, empleadas en la manufactura de estructuras metálicas.

2. Metodología

2.1. Proceso de soldadura GMAW

Se emplearon 10 probetas que consisten en una unión mediante punteo (empleando proceso SMAW) de perfiles PTR cuadrados (3 pulg x 1 pulg x 0.25 pulg) de acero AISI 1020 con soleras de ASTM A36 (7 pulg x 4 pulg x 0.2 pulg). Los cortes de ambos materiales se realizaron mediante el uso de una segueta continua con refrigeración constante para asegurar que los cortes fueran rectos y evitar los efectos adversos derivados de la afectación térmica.

El proceso de parametrización se realizó mediante el uso de un sistema semiautomatizado que consiste en una máquina multiprocesos de trabajo industrial pesado marca Infra® modelo Opus 560 (obteniendo los modos de transferencia spray y corto circuito) con un ciclo de trabajo del 100%, un alimentador de alambre de velocidad constante marca Infra® modelo S302T y un carro de corte recto marca COR*12M® modelo CG-100. Este último permite tener un control preciso sobre las variables del proceso como la velocidad de avance, GAP, los ángulos de trabajo y de desplazamiento. Todo el proceso de parametrización se llevó a cabo en polaridad inversa (DCEP).

2.2. Caracterización macrográfica

La toma de decisiones sobre la modificación de parámetros se llevó a cabo mediante inspección visual, para posteriormente realizar cortes de las secciones transversales de los cordones mediante el uso de un equipo de corte metalográfico marca STRUERS® modelo Labotom-3. Se realizó un desbaste empleando lijas de SiC marca Fandeli con

granulometría 80 a 600. Posteriormente, se realizó el ataque macrográfico empleando el reactivo Nital-10 por el método de swabbing con enjuague a chorro de agua y alcohol y secadas con aire tibio. Las macrografías se analizaron con el software de procesamiento de imágenes ImageJ® con el cual se cuantificó la penetración de raíz, dilución, garganta teórica, efectiva y real de cada unión.

2.3. Caracterización metalográfica

Para la caracterización metalográfica, se desbastaron las probetas que mejores condiciones presentaron para ambos modos de transferencia de metal de aporte con el uso de lijas de SiC marca Fandeli desde el grado 80 hasta 2000. Posteriormente se atacaron químicamente mediante inmersión con Nital-3 por 5 s para finalmente obtener y analizar metalografías mediante microscopía óptica (OM) de la zona de fusión (ZF) y zona de afectación térmica (ZAT) con el uso de un microscopio marca Optika® modelo XDS-3 MET

2.4. Caracterización mecánica

Mediante el uso de un microdurómetro marca MITUTOYO® modelo MVK-HVL se realizó un barrido en diagonal en las probetas que presentaron las mejores condiciones geométricas y de penetración de raíz para ambos modos de transferencia. Se realizaron 27 indentaciones aplicando una carga de 100 grf durante 10s; abarcando la zona de material base (MB), la ZAT y la ZF.

3. Resultados y Discusión

3.1. Réplica de parámetros de soldeo originales

Se procedió a replicar las condiciones bajo las cuales a nivel empresarial se llevan a cabo uniones en filete. Por lo que se parametrizó (**Tabla 1**) y analizó macrográficamente el cordón realizado de GMAW con el modo de transferencia corto circuito (GMAW-CC) con un electrodo ER70S-6 de 0.9 mm de diámetro (**Fig. 1**). Se determinó el porcentaje de dilución (**Ec.1**) y dimensiones de las uniones en filete (**Tabla 2**).

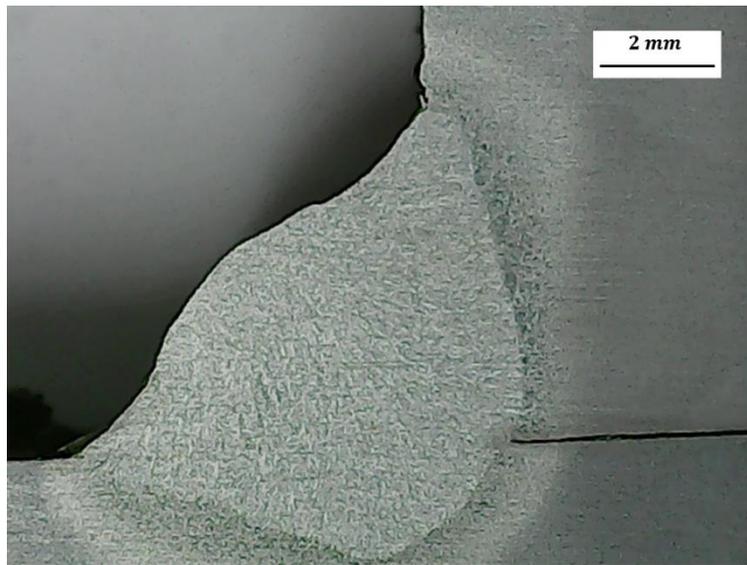


Figura 1. Macrografía de cordón realizado mediante GMAW-CC

Tabla 1. Parámetros de soldeo GMAW-CC replicado	
Voltaje	30 V
Velocidad de alimentación del electrodo.	400 pulg/min
Electrodo	ER70S-6 (0.9 mm)
Velocidad de avance	5.37 mm/s
Caudal de gas de protección	40 CFH
Composición de gas de protección	100% CO ₂
Gap 1	2 mm
Gap 2	2 mm
Dirección de soldeo	Arrastre
Angulo de desplazamiento	20°
Angulo de trabajo	45°

Tabla 2. Dimensiones Filete GMAW-CC replicado	
Penetración de raíz	1.419 mm
Garganta teórica	4.068mm
Garganta efectiva	4.661 mm
Garganta real	5.805 mm

$$\% \text{ Dilución } 30V = \left(\frac{7.274 + 6.894 + 1.284}{18.594 + 7.274 + 6.894 + 1,284} \right) \frac{mm^2}{mm^2} \times 100 = 45.38\% \quad (1)$$

Para el espesor de los materiales a unir se determina que la penetración de raíz es insuficiente a pesar de que los valores de voltaje y velocidad de alimentación son significativamente altos para el diámetro del electrodo empleado.

3.2. Parametrización de proceso

Se realizaron pruebas de cordoneo haciendo una variación de los parámetros hasta obtener buenas condiciones de penetración para ambos modos de transferencia de metal de aporte. Entre los parámetros que se variaron se encuentran: voltaje, velocidad de alimentación del electrodo, velocidad de avance, caudal de gas de protección, distancia de la tobera a la solera (Gap 1) y distancia de la tobera al PTR (Gap 2). En las **Tablas 3 y 4** se presentan los parámetros que permitieron obtener buenas condiciones de penetración.

Tabla 3. Parámetros de soldado para GMAW-Spray	
Voltaje	30.3 V
Velocidad de alimentación del electrodo.	350 pulg/min
Electrodo	ER70S-6 (1.2 mm)
Velocidad de avance	6.92 mm/s
Caudal de gas de protección	50 CFH
Composición de gas de protección	98% Ar - 2% CO ₂
Gap 1	2 mm
Gap 2	2 mm
Dirección de soldado	Arrastre
Angulo de desplazamiento	20°
Angulo de trabajo	45°

Tabla 4. Parámetros de soldado para GMAW-Corto Circuito	
Voltaje	30 V
Velocidad de alimentación del electrodo.	400 pulg/min
Electrodo	ER70S-6 (0.9 mm)
Velocidad de avance	5.38 mm/s
Caudal de gas de protección	50 CFH
Composición de gas de protección	100% CO ₂
Gap 1	2 mm
Gap 2	2 mm
Dirección de soldado	Arrastre
Angulo de desplazamiento	20°
Angulo de trabajo	45°

3.3. Porcentajes de dilución

Con el uso de la Ecuación 2 se puede cuantificar el porcentaje de dilución del material de aporte en el material base. En dicha ecuación la letra B representa el área de la sobremonta y las letras A₁, A₂ y A₃ corresponden a las áreas de penetración en el PTR, la solera y en la raíz, respectivamente

$$\% \text{ Dilución} = \left(\frac{A_1 + A_2 + A_3}{B + A_1 + A_2 + A_3} \right) \times 100 \quad (2)$$

La cuantificación de las áreas se llevó a cabo mediante el uso del software de procesamiento de imágenes Image J. En las Figuras 2 y 3 se muestran las macrografías de las condiciones corto circuito y spray.

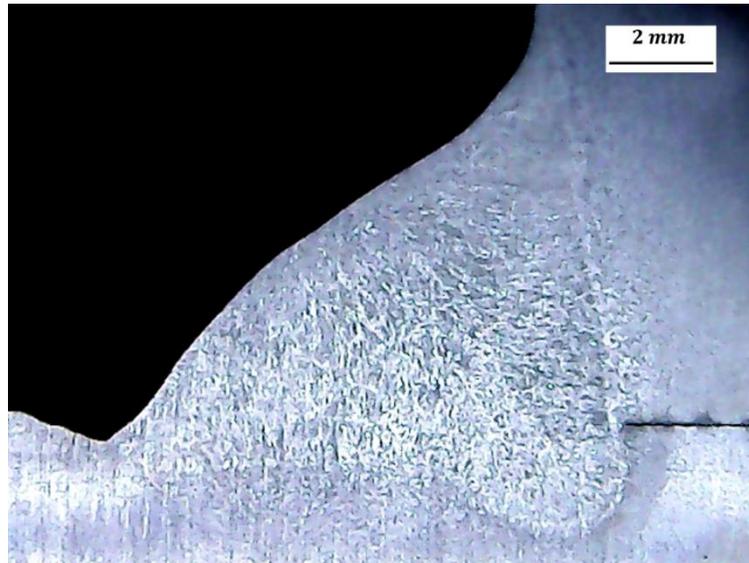


Figura 2. Macrografía de la sección transversal del cordón. Condición GMAW – Spray

Para la probeta de GMAW-Spray las áreas de penetración tienen un valor de 9.252 mm² para A₁, 8.542 mm² para A₂ y 3.673 mm² para A₃. El área de sobremonta tiene un valor de 30.058 mm². El valor cuantificado de las áreas descritas anteriormente se sustituyó en la **Ecuación 2** para obtener la **Ecuación 3** dando como resultado un porcentaje de dilución del material de aporte en el metal base de 41.66%. Se observa que la penetración de raíz de la condición GMAW-Spray es un poco mayor comparada con la condición de soldeo original, sin embargo, sigue estando lejos del valor requerido de 2.4 mm. Se observa que el alto aporte térmico del modo de transferencia empleado derivó en la formación de socavones en uno de los pies del cordón. El perfil del cordón obtenido es más suave y tiene tendencia a ser convexo. Uno de los pies del cordón muestra una morfología suavizada, pero en el otro se observa la presencia de un socavón derivado del alto aporte térmico, la presencia de este cambio abrupto representa un concentrador de esfuerzos significativo, por lo que se concluye que el modo spray no es viable de emplearse en esta aplicación.

$$\% \text{ Dilución } S = \left(\frac{9.252 + 8.542 + 3.673}{30.058 + 9.252 + 8.542 + 3.673} \right) \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^2} \times 100 = 41.66\% \quad (3)$$

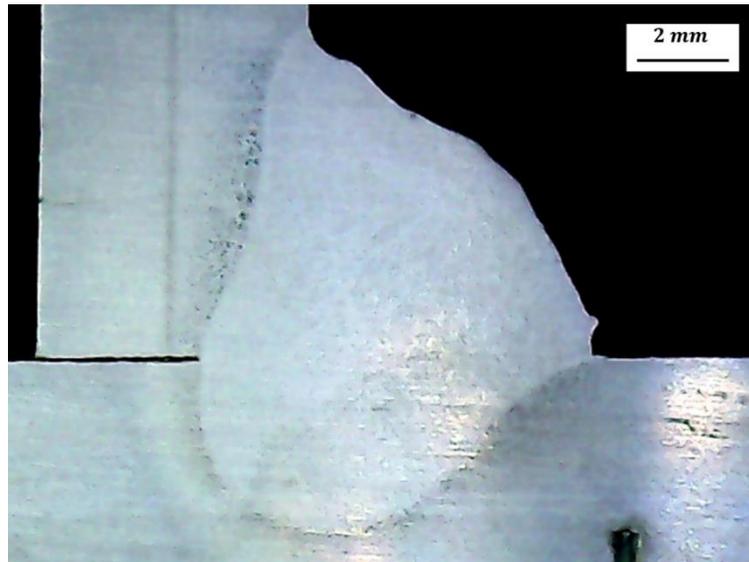


Figura 3. Macrografía de la sección transversal del cordón. Condición GMAW - Corto Circuito

Para la probeta de GMAW-CC las áreas de penetración tienen un valor de 9.096 mm² para A₁, 13.586 mm² para A₂ y 7.045 mm² para A₃. El área de sobremonta tiene un valor de 28.337 mm². El valor cuantificado de las áreas descritas anteriormente se substituyó en la **Ecuación 2** para obtener la Ecuación 4 dando como resultado un porcentaje de dilución del material de aporte en el metal base de 51.2%.

La penetración de raíz y dilución de GMAW-CC

$$\% \text{ Dilución CC} = \left(\frac{9.096 + 13.586 + 7.045}{28.337 + 9.096 + 13.586 + 7.045} \right) \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^2} \times 100 = 51.2\% \quad (4)$$

3.4. Cálculo de gargantas y penetración de raíz

Con el mismo software se procedieron a calcular las gargantas y penetración de raíz de las uniones en filete para ambas condiciones. Se puede observar que al tener gargantas de menor magnitud como es el caso del cordón soldado con GMAW-Spray (**Tabla 3**) la penetración de raíz y el porcentaje de dilución, el cual aproximadamente es 10% menor. Las gargantas de mayor magnitud como las que se obtienen en el caso del cordón soldado con GMAW-CC (**Tabla 4**) van acompañadas de un incremento

significativo de la penetración de raíz (34% mayor) y dilución. Este incremento representa que las uniones tendrán una mayor resistencia a esfuerzos aplicados.

Tabla 3. Dimensiones Filete GMAW- Spray

Penetración de raíz	1.777 mm
Garganta teórica	5.089 mm
Garganta efectiva	6.283 mm
Garganta real	6.848 mm

Tabla 4. Dimensiones filete GMAW- Corto Circuito

Penetración de raíz	2.385 mm
Garganta teórica	4.887 mm
Garganta efectiva	8.034 mm
Garganta real	9.158 mm

3.5. Análisis microestructural

En la **Figura 4** se puede observar que bien la morfología microestructural es similar en ambos modos de transferencia en la ZAT, sin embargo, se puede denotar un cambio muy contrastado en la interfaz entre la ZF y la ZAT. Para el modo de transferencia del metal de aporte Spray la interfaz ZF-ZAT muestra un engrosamiento de los granos y en el límite de grano austenítico se muestra la presencia de ferrita Alotriomórfica (**Fig 4a**). Por otro lado, se puede observar que en la ZF del modo de transferencia de metal de aporte CC existe una concentración significativamente mayor de óxidos globulares, lo que da pie a una mayor concentración de ferrita acicular (AcF) debido a que son puntos de alta energía que propician la formación de esta fase (**Figura 4b**).

Sin embargo, en la ZF se puede observar que existe un decremento significativo de ferrita Widmanstätten (WF) y Alotriomórfica (AF) al emplear el modo de transferencia Spray y se observa una menor cantidad de óxidos globulares en la ZF (**Figura 5**). El comportamiento de los óxidos es congruente con lo reportado por Menzel [22] quien describió que al reducir la cantidad de CO₂ y O₂ en las mezclas de gases protectores cuyo gas primario es el argón produce una reducción en los óxidos y genera una estructura granular más fina. El aumento observado de ferrita Widmanstätten es congruente con lo observado por Ebrahimnia et al [23], quienes concluyeron que al incrementar el contenido de CO₂ en el gas de protección el contenido de ferrita acicular decae mientras que el de ferrita Widmanstätten aumenta.

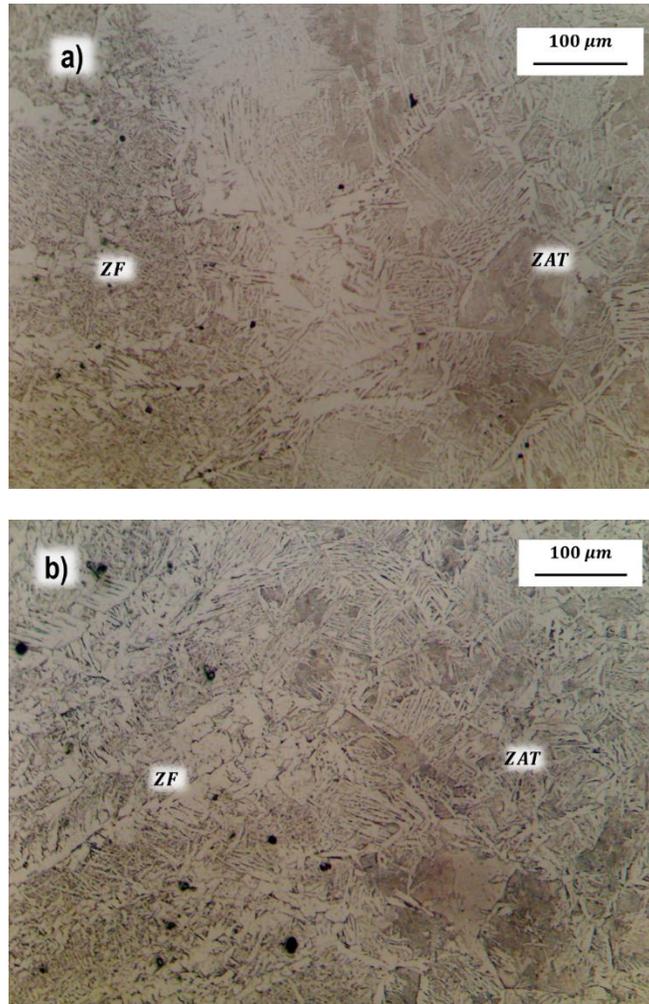


Figura 4. Metalografía comparativa (200X) de las interfaces entre la ZF y la ZAT del PTR de los cordones realizados mediante el modo de transferencia a) spray y b) corto circuito.

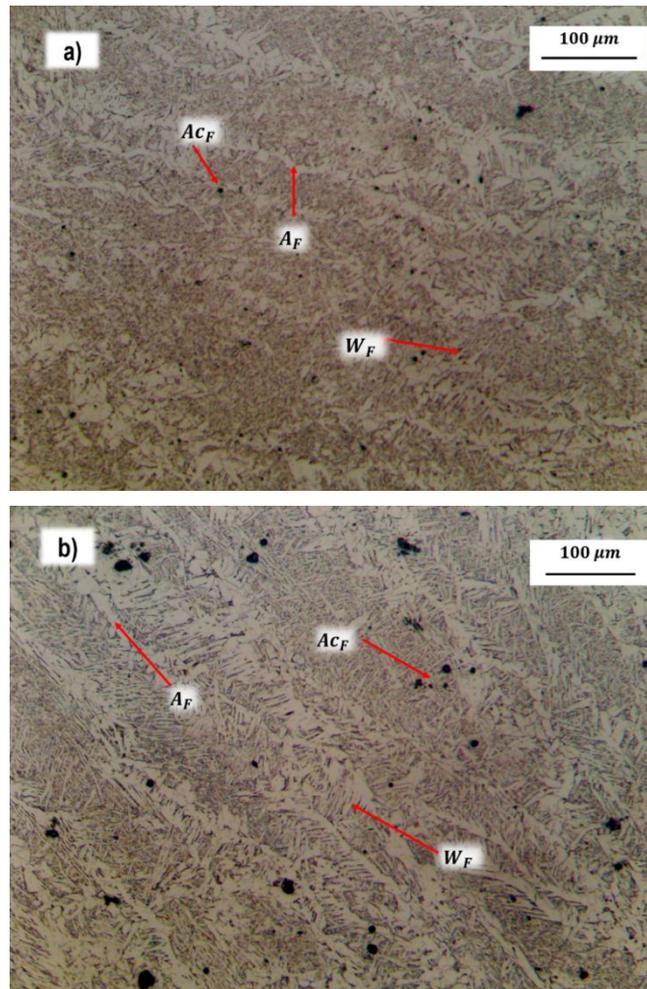


Figura 5. Metalografía comparativa (200X) entre las ZF de los cordones realizados por a) spray y b) corto circuito.

3.6. Perfiles de microdurezas

En la **Fig. 6** se muestran los perfiles de microdureza para ambas condiciones de soldadura. Se puede observar que no existe en ambos perfiles que puede derivarse de la diferencia en la composición química de ambos materiales soldados (AISI 1020 y ASTM A36). También se puede observar que los valores en ambos perfiles son similares pero el perfil obtenido con Corto Circuito tiene cambios más abruptos entre los valores obtenidos. Dicho efecto puede deberse a que la fluidodinámica de la piqueta de soldadura es más turbulenta cuando el metal de aporte se transfiere mediante el modo Corto Circuito.

Además, se puede observar que para ambos perfiles la magnitud de las microdurezas es distinta para ambos materiales base. Esto puede derivarse por dos factores principalmente; diferencias en las composiciones químicas y distintos tamaños de grano debido a distinto control de los tratamientos termomecánicos empleados.

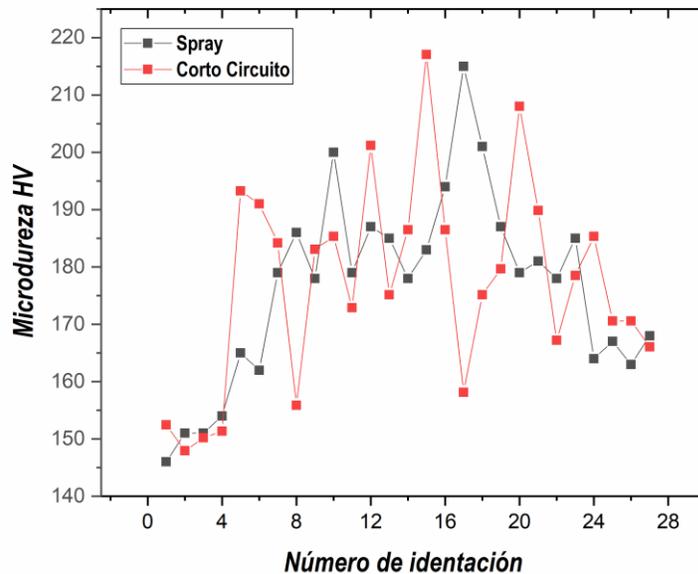


Figura 6. Perfil de Microdurezas para ambas condiciones de soldeo

Conclusiones

- 1) El modo de transferencia de metal de aporte Corto Circuito empleando como gas de protección 100% CO_2 permite obtener una penetración de raíz cercana a la condición de penetración profunda (2.385 mm).
- 2) El modo de transferencia Spray en conjunto con la mezcla de gas 98%Ar-2% CO_2 no es adecuado para el soldeo de este tipo de juntas debido a la formación de socavones derivados del alto aporte térmico y la baja penetración de raíz obtenida (1.777 mm).
- 3) Es notable el incremento de ferrita Widmanstätten y Acicular en el modo de transferencia corto circuito derivado del incremento de CO_2 en el gas de protección y un menor aporte térmico.

Sugerencias y recomendaciones

Al observar que emplear como gas de protección 100% CO_2 se incrementa la penetración de raíz y la dilución, se sugiere realizar una optimización paramétrica mediante diseños de experimentos o redes neuronales de esta condición que maximice ambos parámetros y que tome en cuenta otros parámetros macrográficos como puede ser la convexidad. Además, se sugiere, realizar ensayos destructivos a las uniones optimizadas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) por el apoyo al proyecto. Además, los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / I. T. Morelia por el apoyo en laboratorios y equipos. Los estudios de G. Granados fueron patrocinados por CONACYT, México (N.B. 1153336).

Referencias bibliográficas

- [1] P. Kah, R. Suoranta, and J. Martikainen, "Advanced gas metal arc welding processes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 1, pp. 655–674, 2013.
- [2] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering Technology*, Séptima ed. Hoboken: Prentice Hall, 2013.
- [3] MillerWelds, *Welding Process Training Series: Introduction to Welding*. Appleton: Miller Electric Mfg. Co, 2014.
- [4] U. K. Ghosh, *Design of Welded Structures. Principles and Practice*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.
- [5] K. Weman, *Welding processes handbook*, 2nd ed. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2012.
- [6] U. Kuhlmann, H.-P. Günther, and C. Rasche, "High-strength steel fillet welded connections," *Steel Constr.*, vol. 1, no. 1, pp. 77–84, 2008.
- [7] AWS, *Welding Handbook Volume 1: Welding Science and Technology*, Novena Ed. Miami: AWS (American Welding Society), 2001.
- [8] L. Jeffus, *Welding principles and applications*, 7th ed. Delmar Cengage Learning., 2012.
- [9] J.-S. Kim, A. Dae-Hwan, S.-Y. Lee, and L. Bo-Young, "A failure analysis of fillet joint cracking in an oil storage tank," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 6, pp. 845–849, 2009.
- [10] S. Memon, D. Fydrych, A. C. Fernandez, H. A. Derazkola, and H. A. Derazkola, "Effects of FSW tool plunge depth on properties of an Al-Mg-Si alloy T-joint: Thermomechanical modeling and experimental evaluation.," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 4754, 2021.
- [11] T. Sathish, S. Tharmalingam, V. Mohanavel, K. S. Ashraff Ali, A. Karthick, and S. Ravichandran, M. Rajkumar, "Weldability investigation and optimization of process variables for TIG-welded aluminium alloy (AA 8006)," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2021, 2021.
- [12] M. Ramarao, M. F. L. King, A. Sivakumar, V. Manikandan, M. Vijayakumar, and R. Subbiah, "Optimizing GMAW parameters to achieve high impact strength of the dissimilar weld joints using Taguchi approach.," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, pp. 1–6.
- [13] H. B. Cary and S. C. Helzer, *Modern Welding Technology*, Sexta edic. Upper Saddle River: Pearson Prentice-Hall, 2005.
- [14] S. Kou, *Welding Metallurgy*, Segunda Ed. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, 2003.
- [15] A. D. Althouse, C. H. Turnquist, W. A. Bowditch, K. E. Bowditch, and M. A. Bowditch, *Modern Welding*, 12th ed. Tinley Park: The Goodheart-Willcox Company, Inc., 2020.

- [16] C. Marconi, M. J. Castillo, M. Ramini, and H. Suoboda, "Effect of the shield gas, working angles and displacement angles on the characteristics of fillet joints obtained via GMAW using a high-strength microalloyed steel," *Weld. Int.*, vol. 32, no. 9, pp. 618-628, 2018.
- [17] J. C. Dutra, R. H. Gonçalves e Silva, K. C. Riffel, and C. Marques, "High-performance GMAW process for deep penetration applications," *Weld World*, vol. 64, pp. 999-1009, 2020.
- [18] I. Hajro and P. Tasić, "Influence of Heat Input and Welding Position on Geometrical Properties of GMAW Fillet Welds of Unalloyed Steel," *TEM J.*, vol. 9, no. 2, pp. 496-500, 2020.
- [19] A. S. Baskoro, R. Hidayat, A. Widjianto, M. A. Amat, and D. U. Putra, "Optimization of Gas Metal Arc Welding (GMAW) Parameters for Minimum Distortion of T Welded Joints of A36 Mild Steel by Taguchi Method," vol. 1000, pp. 356-363, 2020.
- [20] F. Sikstrom and A. E. Öberg, "Prediction of penetration in one-sided fillet welds by in-process joint gap monitoring—an experimental study," *Weld World*, 2017.
- [21] M. U. Deshpande, J. M. Dharmadhikari, and H. M. Kshirsagar, "Optimization of GMAW Process Parameters to Improve the Length of Penetration in EN 10025 S 235 Grade," *J. Weld. Join.*, vol. 35, no. 1, pp. 74-78, 2017.
- [22] M. Menzel, "The influence of individual components of an industrial gas mixture on the welding process and the properties of welded joints.," *Weld Int*, vol. 17, no. 4, pp. 262-264, 2003.
- [23] M. Ebrahimnia, M. Goodarzi, M. Nouri, and M. Sheikhi, "Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding," *Mater Des*, vol. 30, no. 9, pp. 3891-3895, 2009.



AMECSMI

Disponible en www.amecsmi.com
Todos los derechos reservados ©®