

## MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA JUNTA SOLDADA DE PLACAS BICAPA API X60/316L

Blanca Anilú Pichardo Álvarez<sup>1</sup>, Víctor Hugo López Morelos<sup>2\*</sup>,  
Rafael García Hernández<sup>3</sup>, Melchor Salazar Martínez<sup>4</sup>,

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Recibido: 02/07/2019      Aceptado: 14/09/2019      Publicado: 03/12/2019

**Resumen.** - : En este estudio se evaluó el comportamiento microestructural y mecánico de una junta soldada de placas de acero API Spec. 5L X60 revestidas de acero 316L con el proceso soldadura por arco metálico con protección de gas (por sus siglas en inglés GMAW). El revestimiento se elaboró por medio de deposición de soldadura sobre la placa, con un aporte térmico de 1.3 kJ/mm, corriente directa-polaridad invertida y la aplicación de un campo electromagnético de 4.5 mT. Para unir la junta de placas bimetálicas con preparación en V simple, se usó el electrodo ER316L en la pasada de raíz y para las pasadas subsecuentes se utilizó el electrodo ER70s-6. Para prevenir el efecto del sople magnético y estabilizar el arco eléctrico se aplicó un campo electromagnético de 3.5 mT durante el soldeo. En la caracterización microestructural de la junta soldada se identificó martensita en la interfase entre los dos aceros, además de crecimiento de grano en las zonas afectadas térmicamente del acero C-Mn. Los perfiles de microdureza registraron valores promedio de ~180 HV en el acero API X60, ~220 HV en el acero 316L y ~400 HV en la zona con formación de martensita. En los ensayos de tracción uniaxial, el límite elástico estuvo entre 400 y 450 MPa con una resistencia a la tensión de ~512 MPa. Los valores de los ensayos de impacto a 0 °C, fueron de 86 J para probetas de cara y 96 J en probetas de raíz, los resultados de las pruebas mecánicas estuvieron dentro del rango del material base API Spec. 5L X60. En conclusión, fue posible la obtención de placas bimetálicas de acero API Spec. 5L X60 con revestimiento de acero inoxidable 316L y su unión mediante el proceso GMAW.

**Palabras clave:** Soldadura; placa revestida; comportamiento mecánico; microestructura.

## MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A WELDED JOINT OF API X60/316L CLADDED PLATES

**Abstract.** - In this study, the microstructure and mechanical behavior of API X60/316L clad plates welded by the gas metal arc welding (GMAW) process were evaluated. The 316L stainless steel cladding was deposited onto API 5L X-60 plates by overlay welding with direct current – reverse polarity, heat input of 1.3 kJ/mm and applying a magnetic field of 4.5 mT. To weld the bimetallic plates with a single V groove joint, an ER316L-Si filler was used for the root pass whereas an ER70s-6 was fed for the subsequent welding passes. An electromagnetic field of 3.5 mT was applied to assist the stability of the electric arc during welding in order to avoid magnetic arc blow.

In the microstructural characterization of the welded joint, martensite was identified at the interface between both steels and grain growth in the heat affected zones of the C-Mn steel. Vickers microhardness profiles recorded average values of ~180 HV for the API X60 steel, ~220 HV in the 316L stainless steel and ~400 HV in the zone of martensite formation. In the tensile tests, yield strength was between 400 to 450 MPa with a tensile strength of ~512 MPa. In the Charpy impact tests, the results were 86 and 96 J for specimens with the notch in the face and in the root of the weld bead, respectively. The results of the mechanical properties were in the range of the API 5L X-60 base material. In conclusion, it was viable to clad plates of API Spec. 5L X60 steel with 316L stainless steel and weld the bimetallic plates by the GMAW.

**Keywords:** Welding; clad plate; mechanical behavior, microstructure.

### Introducción

En la industria del petróleo, el acero más utilizado para las líneas de transporte es el acero al carbono-manganeso, esto debido a su bajo costo, además de sus propiedades mecánicas. Sin embargo, es un material susceptible a la corrosión,

<sup>1</sup> Blanca Anilú Pichardo Álvarez. Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup> Víctor Hugo López Morelos. Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [vhlopez@umich.mx](mailto:vhlopez@umich.mx) (Autor correspondiente).

<sup>3</sup> Rafael García Hernández. Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>4</sup> Melchor Salazar Martínez. Instituto Politécnico Nacional, Cluster Politécnico, Papantla, Veracruz, México.

siendo esta última característica la responsable de fallas en las tuberías y elementos estructurales, dando como resultado pérdidas económicas significativas, accidentes catastróficos y contaminación al ecosistema. La corrosión externa presente en estos elementos es causada por el tipo de ambiente húmedo y salino al que están expuestos. Con lo que respecta al interior de los ductos, estos transportan gases y fluidos que son altamente corrosivos causantes del deterioro por corrosión dentro de las tuberías (Xu, 2013).

En México, algunos hidrocarburos han presentado altos contenidos de H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> que pueden inducir el agrietamiento en los materiales, por lo cual es considerado uno de los factores que pueden afectar la integridad estructural o reducir la vida de las tuberías de acero. La fragilización es un término general que incluye: agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo, agrietamiento cáustico, fatiga - corrosión, ampollamiento por hidrógeno, agrietamiento inducido por hidrógeno, susceptibilidad al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo en presencia de sulfuros (ISO, 2009). La industria del gas y petróleo ha sido de gran importancia debido a que es una de las principales fuentes de ingreso económico en nuestro país y se le ha dado mayor relevancia en las últimas décadas (Colmenares, 2008), por ello se requiere el uso de materiales y métodos adecuados, para que los procesos de extracción, refinación y transporte, sean realizados de una manera segura y duradera en operación.

Los aceros API (American Petroleum Institute) Spec. 5L de grado X52, X60 y X65, son los más utilizados en tuberías de diámetros desde 12" hasta 36". De acuerdo con la NRF-001 PEMEX, el acero API 5L X60 es un acero C-Mn C-Mn que aporta un buen comportamiento, con un límite de fluencia mínimo de 417 MPa, valor que indica la nomenclatura del grado de cada acero. De forma general la composición química de los aceros API Spec 5L se caracteriza por su contenido de carbono y manganeso, lo cual los hace aceros de alta resistencia y baja aleación. Microestructuralmente, estos aceros están constituidos por una matriz ferrítica con colonias de perlita. Debido a la alta resistencia mecánica por unidad de área de los aceros API se tienen estructuras de poco peso, facilitando el diseño al poderse emplear en claros grandes. Los aceros API son dúctiles y tenaces, pero muy susceptibles a la corrosión.

Las tuberías con revestimientos internos ofrecen una mayor resistencia a la corrosión, esto para satisfacer las necesidades que presentan los nuevos desafíos ya que los tiempos de extracción del petróleo barato y fácil en aguas someras ha terminado. Se estima que el 70 % de las reservas de petróleo restantes del mundo consisten en petróleo crudo con alto contenido de azufre o CO<sub>2</sub> que requiere materiales de alta calidad y resistentes a la corrosión. Para mantenerse al día con la demanda, las compañías petroleras deben identificar nuevas tecnologías para explotar estas reservas de petróleo pesado. Lo mismo ocurre con el gas, más del 50 % del gas de los campos del mundo es altamente corrosivo (standard, 2009). En estos entornos desafiantes, los encargados de desarrollar los procesos y tecnologías para la obtención del petróleo y gas deben aprovechar cada solución técnica disponible para mantener una producción óptima. Un elemento clave es la integridad de los ductos ascendentes y las líneas de flujo, que es donde entra en juego el tubo revestido resistente a la corrosión.

El acero inoxidable 316L es una versión del acero 316, en donde la L en la nomenclatura indica que este es de bajo carbono con un valor por debajo del 0.03%, lo que minimiza la precipitación de carburos perjudiciales en la zona afectada por el calor durante la soldadura, convirtiendo este acero en una opción para el revestimiento interno de la tubería (anónimo, 2015). Los requerimientos de las tuberías para el transporte de hidrocarburos son definidos por el API Spec 5L, esta norma aplica para tuberías de acero C-Mn, la API Spec 5LD para tubería bimetálica, tubería con revestimiento unido metalúrgicamente por laminado en caliente, tubería con revestimiento unido mecánicamente y tubería con revestimiento unido metalúrgicamente ya sea mediante material de aporte depositado en forma de cordones de soldadura o por unión por explosión (García, 2012).

Los materiales bimetálicos ofrecen grandes beneficios, sin embargo, también presentan problemas en las uniones de las secciones de este tipo de tubos, debido a que en el cordón se tendrá la interacción de dos materiales diferentes, se presentan zonas afectadas por formación de martensita derivada de la fase austenita presente en el acero 316L, esto ocasionado por la dilución y el rápido enfriamiento. La martensita es una microestructura débilmente estable, consiste en una solución sólida supersaturada de carbono en la fase  $\alpha$ , por lo cual se debe tener especial cuidado en el control del calor de aporte durante el proceso de la soldadura (Martínez, 2010).

La presente investigación está enfocada a estudiar la unión entre placas bimetálicas de acero API Spec 5L X60 con revestimiento de acero inoxidable 316L, unidas por el proceso de soldadura por arco metálico y protección gaseosa, con el propósito de obtener buenas propiedades en el cordón y en la zona afectada térmicamente. Se utilizó la aplicación de campos electromagnéticos externos para mejorar las características de la microestructura.

### **Metodología: materiales y métodos**

La composición química nominal del acero API Spec 5L X60 se lista en la Tabla 1. Las placas se obtuvieron de una tubería de 914 mm de diámetro con un espesor de 16 mm. Como material de aporte y para revestir las placas de acero API se utilizó el electrodo de acero inoxidable ER316L-Si de 1.2 mm de diámetro. El revestimiento se llevó a cabo por el método de depositación de soldadura con el proceso GMAW. Para la unión se utilizó un electrodo de bajo

carbono ER70s-6 con un diámetro de 1.6 mm y una composición química similar a la del material base. La composición química de los electrodos se presenta en la Tabla 1.

Se realizaron variaciones en los parámetros tales como voltaje e intensidad de campos magnéticos para determinar las mejores condiciones con las que se llevaría a cabo la depositación de soldadura para generar el revestimiento. En la

Tabla 1. Composición química del acero API 5L X60 y los electrodos ER 316L y ER70s-6 (% en peso).

Material	C	Mn	Ni	Cr	Nb	Cu	Si	S	P	V	Mo
APISPEC.5LX-60	0.08	1.15	0.30	0.01	0.004	0.03	0.26	0.01	0.01	0.06	0.01
ER-316L-Si	0.02	---	11.8	18.9	---	0.23	0.81	0.01	0.02	---	2.2
ER-70-6	0.06	01.6	0.15	0.15	---	0.50	0.97	0.04	0.03	0.03	0.15

En la Tabla 2 se presentan los valores que se utilizaron para el recubrimiento de aleación resistente a la corrosión, sobre el acero API Spec 5L X60. Una vez terminados los depósitos se procedió a cortar la placa revestida en 2 secciones las cuales se rectificaron con la finalidad de dejar un acabado liso como se presenta en la Figura 1. Se tuvo el cuidado de dejar un espesor de recubrimiento lo más cercano posible a 3 mm.

Tabla 2. Parámetros utilizados para aplicar revestimiento de acero inoxidable 316L por medio de depositación por soldadura.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Calor aportado (kJ/mm)	Gas utilizado	Velocidad de avance (mm/s)	Velocidad de alimentación (mm/s)	Distancia de trabajo (mm)	Flujo de gas (L/s)	Intensidad del campo magnético (mT)
22.5	267	1.252	98% Ar + 2% O <sub>2</sub>	3.6	120	10	0.236	4.5

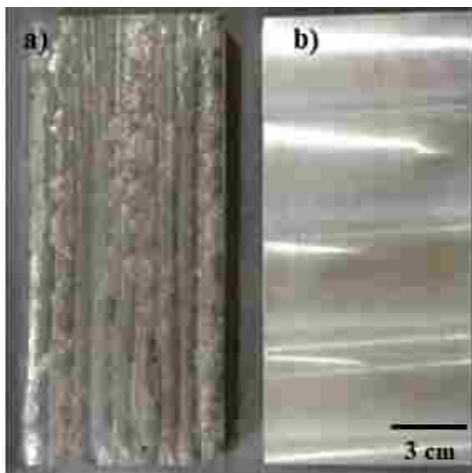


Figura 1. A) Placa con depósito de cordones y b) sección de placa con caras rectificadas.

La Figura 2 representa la preparación de la junta con un bisel a 30° y talón de raíz de 1 mm basado en la norma ISO 9692-4 para espesores menores de 18 mm. La soldadura se llevó a cabo con 4 pasadas, empezando con una pasada de raíz con el electrodo ER316L y las 3 subsecuentes con el electrodo ER70s-6. En la Figura 3 se puede observar que el arreglo de bobinas consta de 3 espiras de entrada y 2 de salida mismo que se utilizó para la depositación de soldadura para el revestimiento, las placas a unir se colocaron a mitad de las dos bobinas y el campo magnético se mantuvo durante 1 minuto al final de cada pasada.

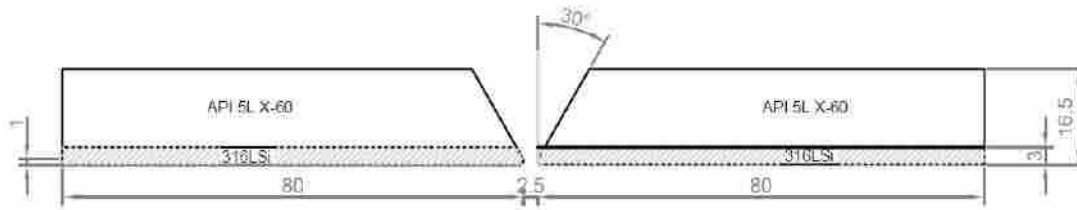


Figura 2. Diseño y dimensiones de la junta de placas bimetálicas.

Una vez preparadas las secciones a unir por el proceso de soldadura GMAW, se realizaron varias pruebas para ajustar los parámetros de soldadura más favorables. Se utilizó corriente directa – polaridad invertida alimentando el electrodo a una velocidad de 70 mm/s con 98% Ar – 2% O<sub>2</sub> (0.236 L/s) como gas de protección con una intensidad de campo magnético de 3.5 mT y un ángulo de la torcha a 90°. El resto de los valores se presentan en la Tabla 3



Figura 3. Arreglo experimental para soldar las placas bimetálicas con aplicación de campo magnético externo.

Terminada la junta y con la placa a temperatura ambiente se realizó el corte de las placas soldadas para obtener las diferentes probetas para llevar a cabo las diferentes caracterizaciones; se realizaron ensayos de tensión, impacto, microdureza y metalografía. Cada una de estas pruebas se llevaron a cabo con la finalidad de relacionar lo micro estructuralmente encontrado con el comportamiento mecánico de la junta soldada. Los cortes se realizaron con cinta sierra enfriada con refrigerante.

Tabla 3. Parámetros utilizados en la soldadura de las placas revestidas.

Número de pasada	Electrodo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad de avance (mm/s)	Diámetro electrodo (mm)	Temperatura interpasadas (°C)
Pasada de raíz	ER316L	22.5	335	3.6	1.2	24
Segunda pasada	ER70s-6	21	338	3.6	1.6	40
Tercera pasada	ER70s-6	21	335	3.6	1.6	80
Cuarta Pasada	ER70s-6	21	328	4.2	1.6	106

Terminada la junta y con la placa a temperatura ambiente se realizó el corte de las placas soldadas para obtener las diferentes probetas para llevar a cabo las diferentes caracterizaciones; se realizaron ensayos de tensión, impacto, microdureza y metalografía. Cada una de estas pruebas se llevaron a cabo con la finalidad de relacionar lo micro estructuralmente encontrado con el comportamiento mecánico de la junta soldada. Los cortes se realizaron con cinta sierra enfriada con refrigerante.

Se llevó a cabo la metalografía del material base API Spec 5L X-60 revisando el sentido longitudinal y transversal del material. El proceso de preparación fue el mismo para la probeta de la junta soldada con lijas de diferente granulometría y pulido a espejo con pastas de diamante hasta 1 cm. Con la finalidad de revelar la microestructura y las diferentes fases presentes se realizó ataque químico. Para el ataque químico del material base API Spec 5L X60 y la ZAT se utilizó nital al 2% (98% alcohol y 2% ácido nítrico) el método fue por inmersión por un tiempo de 4 segundos, las muestras fueron enjuagadas con agua y secadas con aire inmediatamente. Para el ataque del cordón de acero inoxidable 316L se utilizó una solución con 2 g cloruro de cobre, 40 mL de ácido clorhídrico, 60 mL de etanol. El método de

ataque fue por goteo durante un tiempo de 10 segundos, se enjuaga la muestra con agua y posteriormente con alcohol previo al secado. La caracterización microestructural se realizó por microscopía óptica y electrónica de barrido.

Para las mediciones de microdureza Vickers (por sus siglas en inglés, HV), se usaron las probetas caracterizadas microestructuralmente. Esta prueba se realizó tanto en el MB como en la junta soldada. Las mediciones se realizaron aplicando una carga de 100 g durante 15 s, de acuerdo con la norma ASTM E384. Para la junta soldada, se realizaron 3 barridos en forma transversal a la soldadura, con separación de 250  $\mu\text{m}$  entre mediciones, y en el área cercana a la interfase las mediciones fueron cada 100  $\mu\text{m}$ .

Muestras de la junta soldada se ensayaron a tensión con probetas de configuración rectangular de acuerdo a la norma ASTM E8/E8M. Las pruebas se realizaron en una máquina universal Zwick/Roell Z100 con una capacidad de 100 kN. La velocidad de avance del cabezal fue de 0.016 mm/s. La medición de la deformación en las probetas durante el ensayo se realizó con un extensómetro.

La evaluación de la tenacidad a la fractura se llevó a cabo mediante ensayos de impacto Charpy en probetas rectangulares de las juntas soldadas de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM E23. Se utilizaron las subdimensiones de viga simple Tipo A para especímenes planos de 5 mm de espesor. Se ensayaron 3 probetas con la muesca en corona y tres probetas con la muesca en la pasada de raíz. Las pruebas se realizaron a 0° C basado en la norma API Spec 5L. Esto debido a la temperatura del mar a un tirante de 90 m de profundidad a los cuales se reportan temperaturas de 4 °C. La temperatura para el ensayo se alcanzó al sumergir las probetas de manera individual en nitrógeno líquido durante 25 s, la temperatura fue monitoreada con un medidor de temperatura infrarrojo. Se realizó la prueba en una máquina con péndulo Charpy con una capacidad de 358 J.

## Discusión y contexto

### *Material base*

En la Figura 4 se muestran las metalografías por microscopía óptica del material base en su forma de fabricación. En las imágenes de la Figura 4a) se observa el material visto en la dirección de laminación del material y la 4b) corresponde a la cara en sección transversal. En estas metalografías se puede apreciar la presencia de las fases perlita (zonas más oscuras) y ferrita (zonas claras) en mayor cantidad. Estas fases son características de este tipo de aceros debido a los componentes aleantes que la conforman, principalmente su alto contenido de manganeso y carbono. Se realizaron mediciones de microdureza Vickers en el sentido de laminación y en el sentido transversal a la laminación con la finalidad de tener los valores promedio de cada cara del material base. En la cara transversal al sentido de laminación los valores medidos estuvieron en el rango de 180 a 200 HV mientras que en la cara en el sentido de laminación se midieron valores en el rango de 170 a 185 HV.

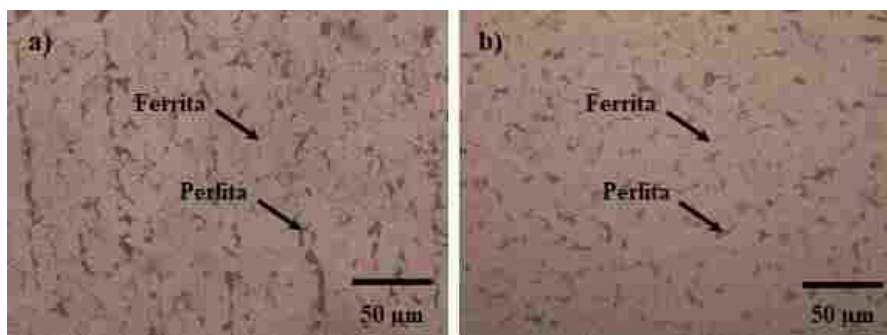


Figura 4. Microestructura característica del acero al carbono API Spec 5L X60; a) sentido de laminación y b) dirección perpendicular a la laminación.

### *Características macroestructurales de la junta soldada*

En la Figura 5 se presenta la macrografía de la sección transversal de la junta soldada después del ataque químico. En la imagen se revelaron cada una de las zonas que conforman la muestra. A simple vista se logra identificar el crecimiento columnar dendrítico en los 2 cordones superiores y sus respectivas zonas afectadas por el calor, al igual que la ZAT del segundo cordón y de los depósitos de soldadura que conforman el revestimiento. En color gris más oscuro se muestra la zona del revestimiento de acero inoxidable 316L y la pasada de raíz, mientras que el segundo cordón a pesar de ser de acero 70s-6 visualmente no se ve igual que los 2 cordones superiores aun cuando fueron depositados con el mismo electrodo. Sin embargo, tampoco presenta un color similar al acero inoxidable en la zona inferior, dejando ver un color de tono gris pero más claro que el acero inoxidable. Durante la depositación de esta

pasada hubo difusión de elementos de aleación por parte del acero inoxidable alterando la composición química de este cordón convirtiendo el acero al carbono de esta zona en un acero de baja aleación al tener ahora bajos porcentajes de Cr y Ni principalmente. Una observación importante es que el acero inoxidable que se encuentra entre la pasada de relleno y el material base presentó un cambio en su forma cóncava de la pasada de raíz, esto debido a la diferencia que tiene en la temperatura de fusión los 2 aceros involucrados, la del inoxidable estando entre 1370 °C y 1400 °C mientras que la del material respaldo con bajo contenido de carbono es de 1530 °C. Por esta razón, las implicaciones del SEMOT son que el investigador funge como guía y orientador que proporciona ejemplos y modelos de aprendizaje interdisciplinario, inspirando a los maestros de la Facultad para explorar nuevas disciplinas desde sus unidades de enseñanza-aprendizaje que se imparten desde las aulas.

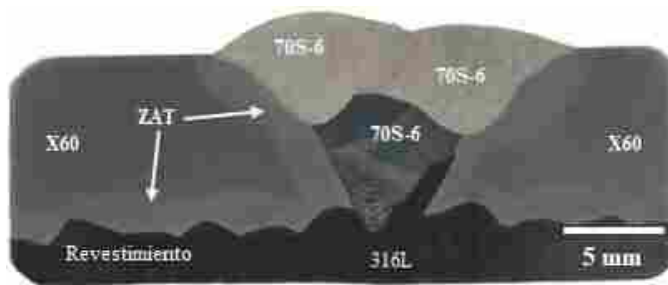


Figura 5. Macrografía de la sección transversal de la junta soldada.

#### *Características microestructurales de la junta soldada*

La unión soldada de las placas bimetálicas presentó una gran variedad de zonas debido principalmente a la diferencia en la composición química entre el acero C-Mn y el acero inoxidable 316L, así como a los ciclos térmicos y el calor aportado. En la junta se observó la variación en el tamaño y forma de los granos al igual que zonas en donde hubo refinamiento de grano por las pasadas de soldadura subsecuentes. También, fue evidente el crecimiento de los granos en las ZAT, alteración química y presencia de fases como la martensita, y zonas donde se observa claramente el crecimiento dendrítico en dirección a la salida del flujo del calor. Lo anterior se puede ver de manera ilustrativa en la Figura 6.

Se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) para observar cada una de las fases y zonas de la junta soldada. En la Figura 7 se presentan imágenes en la zona de unión del segundo cordón 70s-6 con el cordón de raíz 316L. Se realizaron análisis químicos puntuales, con la finalidad de conocer el porcentaje de elementos de aleación en esta área, ya que el segundo cordón presentó una apariencia a simple vista y textura diferente a los 2 cordones superiores. Además, los resultados de la prueba de dureza fueron muy elevados, todo esto característico de la fase martensita, la cual fue causada por enfriamiento rápido.

El barrido lineal de composición química muestra la presencia de Cr en mayor cantidad a la que hay en los cordones superiores de 70s-6. En la Figura 7c) se graficó el porcentaje de los elementos dejando ver como algunos de ellos se encuentran en mayor proporción como característica de los aceros involucrados como es el caso de Cr, característico de los aceros inoxidables en el cual disminuyó al pasar la zona de transición hacia el acero C-Mn. Se observó la presencia de contenidos de Cr según el análisis en un 4.02% valor que sobrepasa el porcentaje de Cr en este tipo de aceros ya que en comparación con el contenido de Cr de los cordones superiores del mismo electrodo tienen un valor para este elemento de 0.42%.



Figura 6. Caracterización metalográfica de la junta soldada de placas de acero al carbono API Spec 5L X60 con revestimiento de acero inoxidable 316 L.

La martensita tuvo presencia en toda el área correspondiente al segundo cordón de relleno y presentó su típica morfología acicular como se muestra en la Figura 7b). No se encontró la presencia de precipitados o carburos de cromo, sin embargo, esta fase es la razón de los valores altos medidos en la prueba de microdureza.

#### *Perfiles de microdureza.*

Los perfiles de microdureza se hicieron para evaluar y comparar los valores en cada una de las zonas de la junta soldada. Se realizando 3 líneas de mediciones en diferentes niveles de espesor de la junta cómo se presenta en la Figura 8. Se comenzó con un barrido de mediciones en los cordones superiores, Figura 9a), en donde los valores tuvieron un comportamiento poco variable, las mediciones más bajas estuvieron en el material base, hubo un incremento de 20 HV en la ZAT, y en el cordón se registraron valores de hasta 270 HV. Posteriormente se hicieron mediciones en la zona central de la probeta en donde el comportamiento de estos valores fue muy drástico de forma comparativa entre la zona del material base y la zona del cordón. En la gráfica de la Figura 9b) se puede apreciar que el material presenta una microdureza similar a la del MB, sin embargo, al empezar la medición en la zona de la interfaz los valores incrementan considerablemente al igual que toda el área del cordón con valores de hasta 420 HV, duplicando el valor de la microdureza del material base. Esto se debe a la presencia de la martensita formada en esa área causada por la composición química que se genera durante la realización de la soldadura y el enfriamiento rápido.

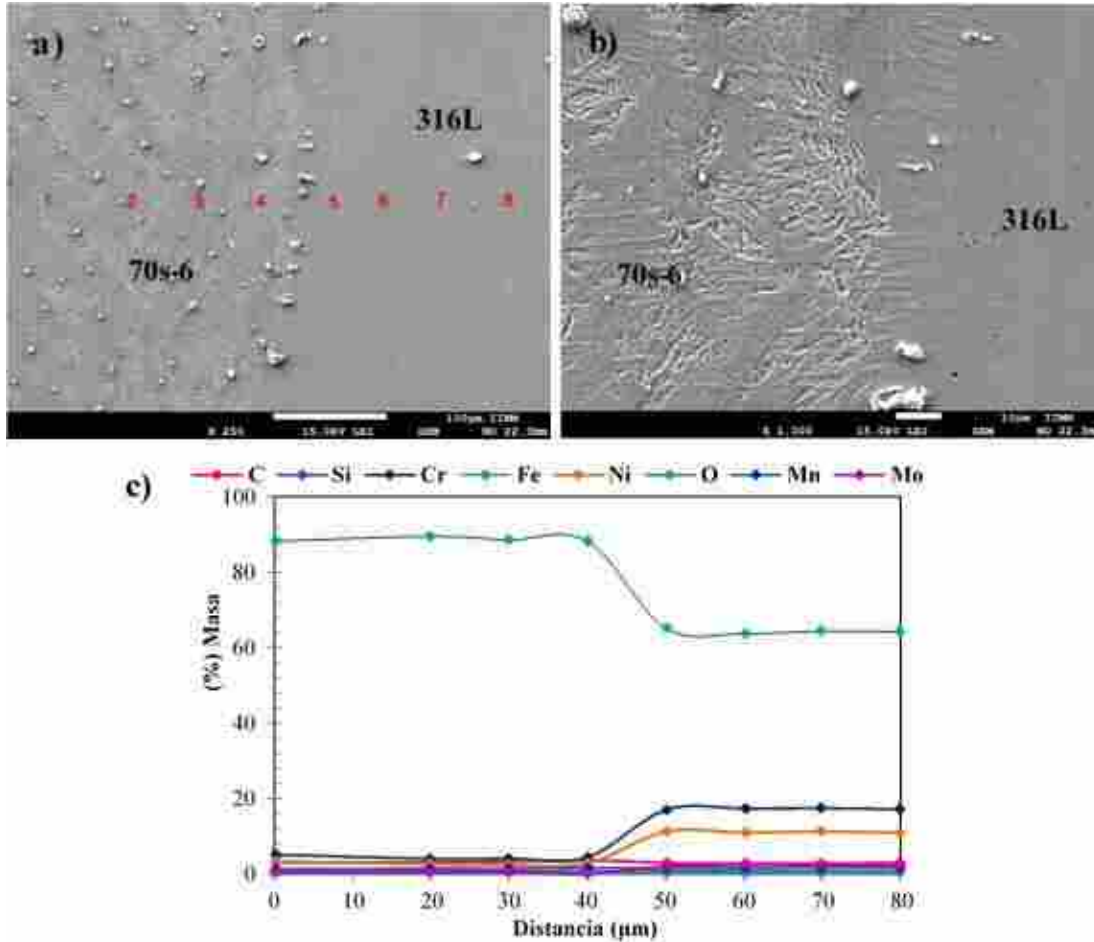


Figura 7. Detalles microestructurales por MEB en la interfase en la línea de fusión entre la pasada de raíz y el segundo cordón de 70s-6 a baja, a), y alta, b), magnificación. c) Barrido de composición química a través de la interfase con los números indicados en la imagen a).

En las mediciones del cordón de raíz y la zona donde se encuentra el revestimiento de acero inoxidable, Figura 9c), los valores fueron similares en todas sus mediciones en un rango de 200 HV a 250 HV, lo cual indica un comportamiento estable de esta zona y aceptable para aceros API.



Figura 8. Niveles en que se realizaron los barrios de microdureza Vickers en la junta soldada.



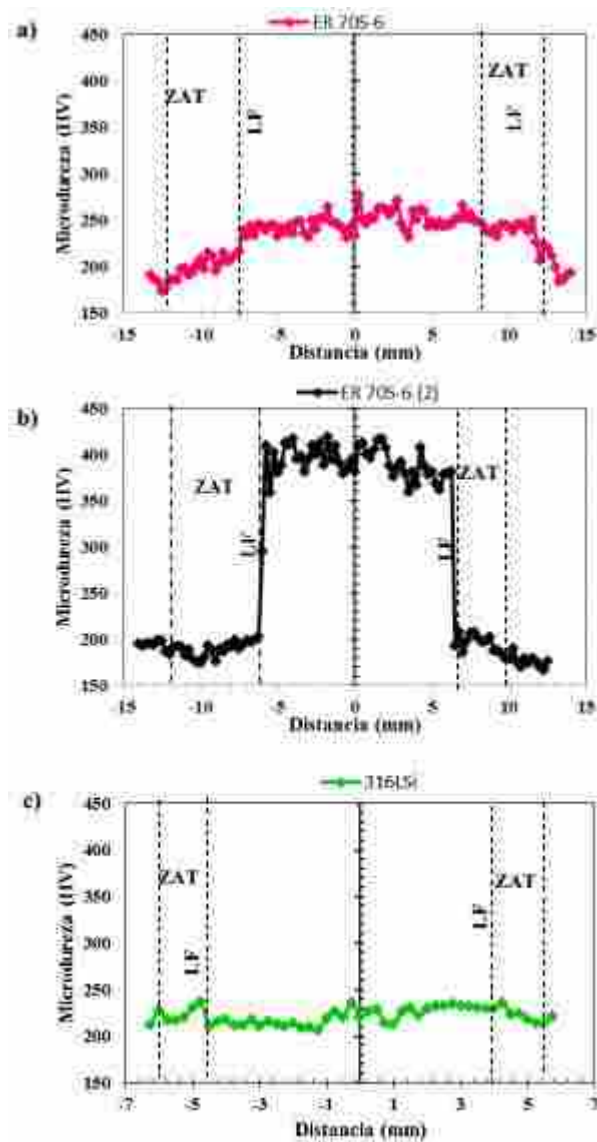


Figura 9. Perfiles de microdureza de la junta soldada; a) pasada de vista, b) pasada de relleno y c) pasada de raíz.

#### *Resistencia mecánica de la junta soldada*

En la Tabla 4 se presenta el promedio de la resistencia máxima, límite de fluencia y energía absorbida al impacto de la junta soldada. Estos ensayos se realizaron con la finalidad de tener una referencia y poder evaluar la eficiencia mecánica en la junta soldada para relacionar el efecto de la microestructura con la respuesta mecánica. Los valores se encuentran aproximados a los del material base y se determinan como aceptables.

No se tienen valores registrados de esta prueba en especímenes de materiales bicapa, para poder tener una comparación. Por lo cual se toma como referencia los valores del material base, el cual presenta un límite de fluencia mínimo de 417 MPa, un % de elongación trasversal de 48% y una resistencia última a la tensión de 517 MPa.

Se llevó a cabo un análisis de falla en donde se obtuvieron las fractografías mostradas en la Figura 10 en donde se aprecian claramente las características de la fractura. La primera imagen, Figura 10a), fue tomada en la zona del acero 70s-6 y la tercera, Figura 10c) en la zona del recubrimiento de acero inoxidable 316L. En estas imágenes se pueden

ver la formación de microhoyuelos ovalados, los cuales son característicos de una falla dúctil causada por una intensa deformación plástica que da lugar a una lenta propagación de la grieta. La fractura dúctil comienza con la formación de un cuello y de cavidades dentro de sección reducida de la probeta, donde posteriormente, los microhuecos resultantes experimentan un período de crecimiento y eventual coalescencia, produciendo una fisura en el interior de la muestra, la cual se propaga hacia la superficie con dirección perpendicular a la tensión aplicada. Cuando se acerca a la superficie, la grieta cambia su dirección a 45° con respecto al eje de tensión y resulta una fractura con una sección cóncava y una convexa (Hertberg, 1989). La fractografía de la Figura 10b) presenta las características de la fractura en la línea de fusión entre los 2 aceros en donde se aprecia una falla dúctil en ambos aceros. Sin embargo, se diferencian uno del otro por los diferentes tamaños en los micros hoyuelos, esto debido a la composición y características de cada acero. Esta imagen corresponde a una probeta de tensión que falló en el material base y se observan características de fractura frágil en la interfase API-X60/316L por la presencia de una banda de martensita en esta región del revestimiento.

Tabla 4. Resultados de las propiedades mecánicas de la junta soldada.

Espécimen	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Energía CVN Cara (J)	Energía CVN Raíz (J)
Junta soldada	512.7	430.25	86.3	95.6
API Spec. 5L X60	517 Min	417 Min	27 Min	27 Min

El valor promedio de energía absorbida de tres probetas deberá ser el mínimo solicitado en la norma con un valor de 27 J. Al acero API utilizado es este trabajo registró 70 J. Los valores obtenidos para la junta soldada quedaron por arriba de ambos valores, como se muestra en la Tabla 4, en donde se puede observar que las probetas de raíz sometidas a la prueba presentaron valores más elevados, esto debido a que el acero inoxidable presenta mayor oposición a la propagación de la grieta por impacto comparado con el acero al carbono. En las probetas de cara los valores fueron más bajos y en dos casos las probetas no se fracturaron por completo quedando unidas en el acero inoxidable.

La tenacidad es una medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturarse. Se evaluó la capacidad de la soldadura a soportar un impacto, las observaciones de las fracturas en el MEB revelaron falla de tipo dúctil para la región que corresponde al metal de soldadura del electrodo ER70s-6, Figura 10d), y al revestimiento de acero inoxidable 316L, Figura 10f). En correlación con el perfil de microdureza en la pasada de relleno, la falla en esta región es de carácter frágil como se puede observar en la fractografía de la Figura 10e). La fractura frágil se produce a lo largo de planos cristalográficos llamados planos de fractura y tiene una rápida propagación de la grieta, estos mecanismos de fractura son por clivaje, los cuales vistos en el MEB se manifiestan en formas continuas conocidas como patrones de río. Esta fractura ocurre transgranularmente, cortando los granos (Hertberg, 1989).

## Conclusiones

En conclusión, este tipo de uniones requiere un alto cuidado en la limpieza durante todo el proceso de soldeo. Otro factor que resulta crucial es el mantener la estabilidad del arco durante la pasada de raíz principalmente. Para evitar el desvío del arco se usó la interacción de un campo electromagnético de 3.5 mT perpendicular al sentido del arco, evitando el desvío u oscilación causado por soplos magnéticos. Los parámetros evaluados para la unión de las placas bimetalicas variaron respectivamente, de modo que al haber una variación de electrodos para llevar a cabo la unión el potencial empleado fue de 22.5 V para la pasada de raíz y para las pasadas subsecuentes 21 V. Todas las pasadas con un campo magnético de 3.5 mT.

La martensita formada tanto en la pasada de relleno como en la línea de fusión de los depósitos de soldadura para el revestimiento, fue martensita de bajo carbono, debido al porcentaje de elementos aleantes en los aceros involucrados. El rápido enfriamiento fue uno de los factores que dieron lugar a la formación de esta fase de alta dureza en conjunto con la diferencia en la composición química. La dureza en la pasada de relleno dio valores muy elevados; en promedio de 420 HV, a pesar de que se volvió a aplicar calor con las pasadas subsecuentes este no fue suficiente para alcanzar la temperatura de austenización y estabilizar la fase dejado como fase predominante la martensita.

Con los ensayos mecánicos se definió como aceptable el comportamiento mecánico de la junta soldada, ya que el valor promedio en la resistencia máxima a la tensión fue de 512.7 MPa. La prueba de impacto solicita un valor mínimo de 27 J cuando la prueba se realiza a 0 °C en aceros al C-Mn y los valores obtenidos en las probetas de la junta soldada fueron superiores. Considerando que los aceros al carbono presentan propiedades mecánicas óptimas para la industria del gas y petróleo, si este tipo de aceros revestidos conservan dichas propiedades, incluso cuando se le incorpora una capa de acero resistente a la corrosión, este tipo de recubrimientos resulta ser de gran beneficio para el transporte de gases y fluidos altamente corrosivos de la industria petrolera.

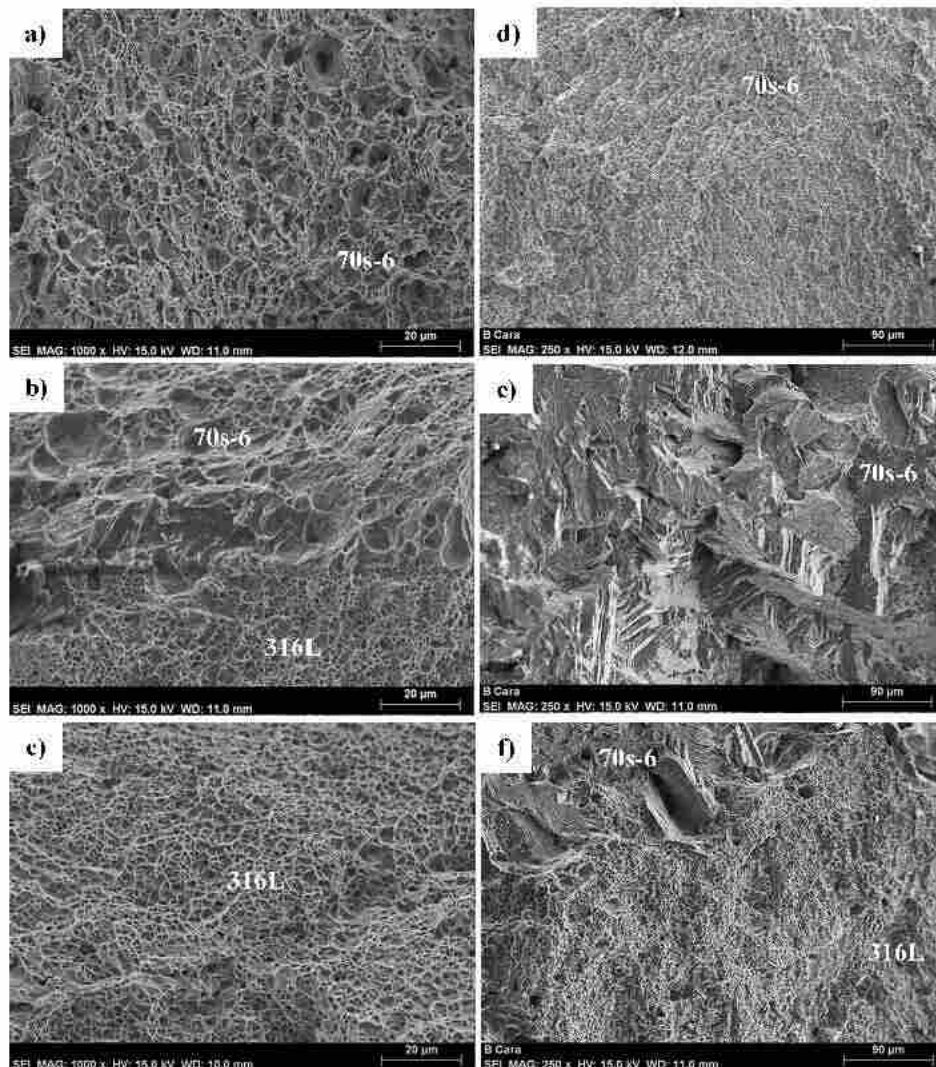


Figura 10. Imágenes de la falla del ensayo de tensión; a), b) y c), e impacto d), e) y f) en las diferentes zonas.

*Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH por el apoyo para la realización de este estudio y a CONACyT por la beca otorgada a Blanca A. Pichardo A.*

### Bibliografía

- Xu L, Li M, Jing H, Han Y. Electrochemical Behavior of corrosion resistance of X65/Inconel 625 welded joints. *International Journal of Electrochemical Science*. 8, 2069-2079, 2013.
- ISO. Petroleum and natural gas industries Materials for use in H<sub>2</sub>S-containing environments in oil and gas production. 2, 54, 2009.
- Colmenares F. Petróleo y crecimiento económico en México 1938-2006. *Economía unam*. 5(15), 53-65, 2008.
- 5LD A S, PIPE L S. Specification for CRA Clad or Lined Steel Pipe. Third Edition. 2009. Aceros inoxidables 316 y 316L. 67, 2015.
- García R, López V H, Curiel F, Estrella S. Uso de la interacción electromagnética en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos, para mejorar sus propiedades de resistencia a la corrosión y mecánicas en la zona afectada térmicamente.
- Martínez-Ortiz P, Espina-Hernández J, Hallen J, Linares R. Caracterización de aceros API-5L por medio de la medición de ruido magnético Barkhausen. *Científica*. 14(2), 81-87, 2010.
- Hertzberg R W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 1989.

## MIEMBROS DEL CONSEJO DE POSGRADO DE LA MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

**Julio César Cruz Argüello** nació en Oxtutzcab, Yucatán, México el 29 de Noviembre de 1982. Recibió el título de Ingeniero en Sistema de Energía por la Universidad de Quintana Roo, en 2006 y los grados de Maestro y Doctor en Electroquímica del CIDETEQ, Querétaro en 2008 y 2012, respectivamente, durante el proceso de formación realizó estancia en el CNR-ITAE en Italia y en Tozzi Energy Renewable. Actualmente es profesor investigador titular C en la División de Estudios de Posgrado e Investigación en la Maestría en Construcción e Ingeniería Eléctrica en el Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Chetumal y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I) desde el 2013 hasta la fecha. Es líder del cuerpo académico de Construcción Sustentable ante PRODEP, es perfil deseable PRODEP desde el 2013 hasta la fecha. Es líder de dos proyectos cátedras CONACYT asignándole 1 y 2 cátedras en el 2015 y 2018 respectivamente. Ha publicado más de 20 artículos de investigación a nivel nacional e internacional indizadas en CONACYT y en el JCR. Ha obtenido premios en diferentes concursos a nivel estatal, regional, nacional e internacional, obteniendo más de 15 premios por su distinción como asesor y como autor desde el 2013. Ha sido responsable técnico y colaborador de proyectos financiados por sectoriales SEP-CONACYT, TecNM, Cátedras CONACYT, Problemas Nacionales, PRODEP, la industria entre otros. Es representante en la mesa del Grupo Técnico de Fomento de la Investigación, Ciencia y Tecnología e Innovación Tecnología en la Comisión Estatal para la Planeación de la Educación Superior del Estado de Quintana Roo. Perteneció al RECEA por parte del CONACYT y del COQCYT desde el 2013 hasta la fecha es evaluador del Sistema Estatal de Investigadores desde el 2012. Perteneció a la Sociedad Mexicana de Hidrogeno, a la Sociedad Mexicana de Electroquímica y a la Sociedad Mexicana de Materiales, ha participado en redes temáticas del CONACYT. Colabora con Instituciones de Educación Superior y Centros CONACYT y a nivel Internacional. Sus áreas de interés son Materiales Innovadores de la construcción, tecnologías de los materiales, Construcción Sustentable y Energías Renovables así como celdas de combustible e hidrogeno.

**Mayra Polett Gurrola** nació en Fresnillo, Zacatecas el 10 de Julio de 1987. Cursó la carrera de Ingeniería Química en la Universidad Autónoma de Zacatecas, UAZ (2005-2009); la Maestría en Electroquímica (2011-2013) y Doctorado en Electroquímica (2013-2017) en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. Realizó diversas estancias durante sus estudios de posgrado en diferentes instituciones como: la Universidad Autónoma de Madrid (Madrid, España-2013); Texas A&M University (College Station, Texas, USA-2014); Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (San Luis Potosí, México-2014); Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (Delegación Iztapalapa, México-2015) y el Institute Di Technologie Avanzate Per L'Energia "Nicola Giordano" del CNR (Messina, Italia -2017 y 2018). Cuenta con una solicitud de patente. Dentro de su desarrollo profesional, la Dra. Gurrola ha contribuido de manera activa en la escritura y sometimiento de proyectos en diversas convocatorias CONACYT (PEI, Ciencia Básica, Fronteras de la Ciencia) y la Secretaria de Energía (Innovate-UK y Sustentabilidad Energética), entre otras. Actualmente, la Dra. Gurrola se encuentra como Cátedra-Conacyt comisionada al Tecnológico Nacional de México dentro del Instituto Tecnológico de Chetumal en la División de Estudios de Posgrado e Investigación, así como líder socio ITCHETUMAL-LABMYN. Forma parte del comité directivo de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Membranas. Ha impartido cursos y seminarios en diversas instituciones de educación superior como: el Instituto Tecnológico de Orizaba; la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, a través de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno; la Unidad Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Guanajuato del Instituto Politécnico Nacional, entre otras. Ha dirigido tesis de alumnos de licenciatura, así como de maestría. A la fecha, tiene a su cargo un alumno de doctorado, dos de maestría y dos de licenciatura. Dentro de su desarrollo como investigadora, la Dra. Gurrola ha publicado 15 artículos científicos en revistas internacionales indizadas en el JCR con alto factor de impacto, dentro de las que destacan Journal of Power Sources, Renewable Energy y Journal Electroanalytical Chemistry

**Eduardo González Bucio** nació en la Ciudad de México, México. Recibió el título de Ingeniero Civil en el Instituto Tecnológico de Chetumal en 1990 y el grado de Maestro en el Instituto Tecnológico de Durango en 1996. Actualmente, es docente en el área de ciencias de la tierra del Instituto Tecnológico de Chetumal, integrante del consejo de posgrado de la maestría en Construcción Sustentable, miembro de la academia de ingeniería civil, miembro activo del colegio de ingenieros civiles, coordinador departamental de tutorías, jefe de proyectos de docencia, coordinador del módulo dual, jefe de vinculación departamental, integrante del comité de seguimiento de egresados.