



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL SILICIO EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A588 MEDIANTE EL PROCESO SAW

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GARCÍA JARAMILLO IVÁN ANDRES

ivan.garcia@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.

carlos.diaz@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO, M.Sc.

homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, noviembre 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **IVÁN ANDRES GARCÍA JARAMILLO**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Homero Barragán, M.Sc.

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Iván Andres García Jaramillo**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Iván Andres García Jaramillo

DEDICATORIA

A la memoria de mi amigo y abuelito Jaime Jaramillo Garcés QEPD.

A mis padres Iván y Elizabeth.

A mis hermanos Belén y Daniel.

AGRADECIMIENTO

A Dios por su gran generosidad en todos los aspectos de mí vida.

A mis padres Iván y Elizabeth, por confiar en mí y porque cada día me impulsan con su gran ejemplo de trabajo, humanidad y de amor incondicional.

A mis hermanos, a Belén y su maravillosa familia y a Daniel, su presencia en mi vida ha sido llena de felicidad y de triunfos. Son ustedes mis mejores amigos y mis grandes inspiraciones.

A mis abuelitos, su gran amor no conoce tiempo ni espacio.

A toda mi familia por sus palabras de aliento a lo largo de todo mi camino de estudios.

A Vanessa por todo su amor y apoyo durante la realización de este proyecto.

Al Ing. Carlos Díaz por su gran guía durante todo el proceso de realización de este proyecto, su predisposición, y por compartir sin dudar sus conocimientos en todo momento.

Al Ing. Homero Barragán por su amistad y colaboración en todas las etapas superadas a lo largo del proceso.

Al Ing. Gabriel Velasteguí por su gran compromiso en la realización de este proyecto, su apoyo desde el inicio ha sido invaluable.

Al Ing. Oscar Sotomayor por sus consejos y por su apoyo incondicional en la obtención y selección del ferrosilicio.

A la Ing. Verónica Sotomayor y al Ing. Santiago Camacho por su recibimiento, consejos y soporte en la realización de ensayos no destructivos.

Al Sr. Jorge Guzmán por su gran amistad, sus consejos y su gran compromiso en todo momento.

Al Sr. René James por su consejo, su buena voluntad y por brindarme su amistad y confianza.

A la Ing. Patricia Proaño y Andrés López por sus consejos y gran apoyo durante mi estadía en el Laboratorio de Metalografía.

Al Sr. Fabian Peñalosa por su buena voluntad en todo momento para el uso de equipos e instalaciones del Laboratorio de Fundición.

A todo el personal que trabaja en la Gloriosa Facultad de Ingeniería Mecánica.

A Kelvin Arias, Xavier Sandoval, Gabriel Anchundia, Miguel Oña, Mireya Osorio, Edison Quinapallo, Evelin Majin, por su incondicional amistad y confianza. Y a todos aquellos amigos que han caminado conmigo y que no he nombrado, gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| CERTIFICACIÓN..... | i |
| DECLARACIÓN..... | ii |
| DEDICATORIA..... | iii |
| AGRADECIMIENTO..... | iv |
| ÍNDICE DE CONTENIDO..... | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | x |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| Objetivo general..... | 2 |
| Objetivos específicos..... | 2 |
| 1. MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 1.1. Soldadura..... | 3 |
| 1.1.1. Soldadura por arco sumergido..... | 3 |
| 1.1.1.1. Electrodo..... | 5 |
| 1.1.1.1. Electrodo EM12K..... | 6 |
| 1.1.2. Fundente..... | 7 |
| 1.1.2.1. Fundente F7A2..... | 8 |
| 1.2. Silicio..... | 9 |
| 1.2.1. Ferrosilicio..... | 10 |
| 1.3. Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA)..... | 11 |
| 1.3.1. Grupo A..... | 13 |
| 1.3.2. Grupo B..... | 13 |
| 1.4. Acero ASTM A588..... | 13 |
| 1.5.1. Soldabilidad..... | 15 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 17 |
| 2.1. Preparación del ferrosilicio..... | 17 |
| 2.1.1. Molienda del ferrosilicio..... | 17 |
| 2.1.1.1. Procedimiento..... | 19 |
| 2.1.2. Tamizado del ferrosilicio..... | 19 |
| 2.1.2.1. Procedimiento..... | 20 |
| 2.2. Caracterización del metal base..... | 21 |
| 2.2.1. Ensayos de composición química mediante espectrometría de chispa..... | 21 |
| 2.2.1.1. Equipo..... | 21 |
| 2.2.1.2. Procedimiento..... | 21 |
| 2.2.2. Ensayo de tracción..... | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.2.1. Probetas..... | 22 |
| 2.2.2.2. Equipo | 23 |
| 2.2.3. Ensayos metalográficos..... | 23 |
| 2.2.3.1. Probetas..... | 24 |
| 2.2.3.2. Equipo | 25 |
| 2.2.4. Ensayo de dureza | 26 |
| 2.2.4.1. Probetas..... | 26 |
| 2.2.4.2. Equipos | 27 |
| 2.3. Adición del ferrosilicio | 27 |
| 2.3.1. Procedimiento | 28 |
| 2.4. Proceso de soldadura..... | 29 |
| 2.4.1. Probetas..... | 30 |
| 2.4.2. Equipo | 31 |
| 2.4.3. Procedimiento | 32 |
| 2.5. Caracterización de las juntas soldadas..... | 32 |
| 2.5.1. Ensayo de tracción de sección reducida..... | 33 |
| 2.5.2. Ensayo de doblado | 34 |
| 2.5.3. Ensayo de dureza | 35 |
| 2.5.4. Radiografía Industrial..... | 35 |
| 2.5.5. Tintas penetrantes | 38 |
| 2.5.6. Ensayo metalográfico | 40 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 41 |
| 3.1. Resultados | 41 |
| 3.1.1. Material base..... | 41 |
| 3.1.1.1. Composición química del metal base..... | 41 |
| 3.1.1.2. Ensayo de tracción | 42 |
| 3.1.1.3. Análisis metalográfico | 43 |
| 3.1.1.4. Ensayo de dureza | 44 |
| 3.1.2. Ensayos en la junta soldada..... | 44 |
| 3.1.2.1. Ensayo de tracción | 45 |
| 3.1.2.2. Ensayo de doblado lateral | 46 |
| 3.1.2.3. Ensayo de dureza | 49 |
| 3.1.2.4. Inspección radiográfica | 53 |
| 3.1.2.5. Inspección por tintas penetrantes..... | 54 |
| 3.1.2.6. Análisis metalográfico | 56 |
| 3.1.2.7. Resultados del análisis micrográfico..... | 59 |
| 3.1.1. Resultados de macrografías del fundente y ferrosilicio | 67 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.2. | Discusión..... | 69 |
| 3.2.1. | Metal base..... | 69 |
| 3.2.2. | Comportamiento de la junta soldada..... | 70 |
| 3.2.3. | Granulometría del fundente y ferrosilicio..... | 73 |
| 4. | CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS | 74 |
| 4.1. | Conclusiones..... | 74 |
| 4.2. | Trabajos futuros | 75 |
| | Referencias..... | 76 |
| | ANEXO I. | 79 |
| | COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL FERROSILICIO..... | 79 |
| | ANEXO II. | 80 |
| | RESULTADOS DE ESPECTROMETRÍA POR CHISPA DEL MATERIAL BASE | 80 |
| | ANEXO III. | 84 |
| | RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL MATERIAL BASE Y DE LAS JUNTAS SOLDADAS | 84 |
| | 85 | |
| | ANEXO IV..... | 87 |
| | REPORTE DE INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA..... | 87 |
| | ANEXO V..... | 92 |
| | REPORTE DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES | 92 |
| | ANEXO VI..... | 96 |
| | WPS Y PQR | 96 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Clasificación de los procesos de soldadura según la American Welding Society (AWS). | 4 |
| Figura 1.2. Proceso de soldadura por arco sumergido en la zona del arco eléctrico..... | 5 |
| Figura 1.2. Bobina de electrodo para proceso SAW. | 7 |
| Figura 1.3. Macrografía del fundente Lincolnweld 960..... | 8 |
| Figura 1.3. Silicio | 9 |
| Figura 1.4. Microestructura general de acero (a) acero estructural, (b) HSLA..... | 12 |
| Figura 2.1. Proceso de investigación | 18 |
| Figura 2.2. Mortero y mazo de hierro..... | 19 |
| Figura 2.3. Ferrosilicio finamente triturado | 19 |
| Figura 2.4. Proceso de tamizado del ferrosilicio con el tamiz número 12..... | 20 |
| Figura 2.5. Dimensiones disponibles para probetas de ensayo de tracción..... | 22 |
| Figura 2.6. Dimensiones finales de la probeta de tracción. | 23 |
| Figura 2.7. Metalografía de una probeta de acero (500x). | 23 |
| Figura 2.8. Probeta del cordón de soldadura pulida..... | 24 |
| Figura 2.9. Máquina pulidora de paño | 25 |
| Figura 2.10. Proceso de aplicación de carga del ensayo de dureza según la norma ASTM. | 26 |
| Figura 2.11. Probeta de material base post ensayo de dureza. | 27 |
| Figura 2.11. Mezcla fundente-ferrosilicio al 5% de ferrosilicio. | 29 |
| Figura 2.12. Diseño de la junta con cotas en milímetros..... | 30 |
| Figura 2.13. Ubicación de probetas para ensayos mecánicos de la junta soldada para placas mayores a 10 mm. | 30 |
| Figura 2.14. Soldadura de probeta P3..... | 32 |
| Figura 2.15. Dimensiones de las probetas para ensayo de tracción de sección reducida según la AWS..... | 33 |
| Figura 2.16. Maquinado de probeta para ensayo de tracción..... | 33 |
| Figura 2.17. Dimensiones de probetas para ensayo de doblado..... | 34 |
| Figura 2.18. Funcionamiento del ensayo radiográfico..... | 35 |
| Figura 2.19. Equipo de control de la fuente de rayos X. | 36 |
| Figura 2.20. Disposición de películas radiográficas. | 37 |
| Figura 2.21. Diagrama de tiempo de exposición vs. Espesor del material | 37 |
| Figura 2.19. Tinta penetrante (izq) y revelador (der)..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.1. Probeta traccionada de material base..... | 42 |
| Figura 3.2. Superficie de fractura de la probeta MB1..... | 43 |
| Figura 3.3. Gráfico de variación de la resistencia a la tracción en función del contenido de ferrosilicio..... | 46 |
| Figura 3.4. Probetas para ensayo de doblado lateral..... | 46 |
| Figura 3.5. Gráfico de incidencia de discontinuidades en las probetas ensayadas por doblado. | 49 |
| Figura 3.6. Gráfico de dureza en las distintas zonas de la soldadura a medida que incrementa el contenido de silicio. | 52 |
| Figura 3.7. Identificación de posiciones de escoria alargada de la probeta P3, a) fotografía de la zona identificada y b) radiografía. | 54 |
| Figura 3.8. Área total de la ZAC en función del contenido de silicio..... | 59 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Corriente según el diámetro de alambre para SAW..... | 6 |
| Tabla 1.2. Requerimientos de composición química para electrodos sólidos. | 7 |
| Tabla 1.3. Composición del fundente. | 8 |
| Tabla 1.4. Propiedades físicas generales del ferrosilicio: | 10 |
| Tabla 1.4. Composición química del ferrosilicio comercializado | 11 |
| Tabla 1.5. Requerimientos de composición química para la especificación ASTM A588. | 14 |
| Tabla 1.6. Requerimientos mínimos para tracción. | 14 |
| Tabla 1.7. Consumibles recomendados para la soldadura de aceros HSLA para estructuras. | 16 |
| Tabla 2.1. Descripción de los tamices utilizados. | 20 |
| Tabla 2.2. Especificaciones del espectrómetro de chispa del Laboratorio de Fundición de la EPN..... | 21 |
| Tabla 2.3. Características de la maquina universal de ensayos. | 23 |
| Tabla 2.4. Características de los equipos para metalografía. | 25 |
| Tabla 2.5. Especificaciones del durómetro Rockwell. | 27 |
| Tabla 2.6. Porcentaje en peso de ferrosilicio en el fundente para SAW..... | 28 |
| Tabla 2.9. Requerimientos para ensayo mecánicos para placas soldadas..... | 31 |
| Tabla 2.10. Características del equipo de soldadura | 31 |
| Tabla 2.11. Descripción del equipo de doblado..... | 34 |
| Tabla 2.12. Características del equipo radiográfico | 36 |
| Tabla 3.1. Resultados de composición química del metal base | 41 |
| Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción del material base | 42 |
| Tabla 3.3. Macrografías y micrografías del metal base..... | 43 |
| Tabla 3.4. Resultados de dureza del material base. | 44 |
| Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción a las juntas soldadas..... | 45 |
| Tabla 3.6. Valores promedio de resistencia a la tracción..... | 45 |
| Tabla 3.7. Resultados de ensayo de doblado lateral con sus respectivas imágenes. | 47 |
| Tabla 3.8. Índice de presencia de defectos en el ensayo de doblado. | 48 |
| Tabla 3.9. Resultados de ensayo de dureza para la probeta P1 (0% de ferrosilicio en el fundente)..... | 49 |
| Tabla 3.10. Resultados de ensayo de dureza para la probeta P2 (1% de ferrosilicio en el fundente)..... | 50 |
| Tabla 3.11. Resultados de ensayo de dureza para la probeta P3 (2,5% de ferrosilicio en el fundente)..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Tabla 3.12. Resultados de ensayo de dureza para la probeta P4 (5% de ferrosilicio en el fundente)..... | 51 |
| Tabla 3.13. Durezas y desviación estándar de valores de dureza de cada zona de la soldadura..... | 52 |
| Tabla 3.14. Tipo de discontinuidades identificadas en los cordones de soldadura..... | 53 |
| Tabla 3.15. Resultados de la inspección por tintas penetrantes..... | 54 |
| Tabla 3.16. Resultados del análisis macrográfico..... | 56 |
| Tabla 3.17. Área total de la zona afectada por el calor..... | 58 |
| Tabla 3.18. Resultados de análisis micrográfico de las juntas soldadas..... | 60 |
| Tabla 3.19. Resultados de macrografías al fundente y ferrosilicio..... | 68 |

RESUMEN

El presente trabajo describe el estudio de soldabilidad de un acero A588 a medida que se incrementa la cantidad de silicio en el fundente del proceso de soldadura por arco sumergido con el fin de conocer los rangos en que este proceso genera una mejora o decremento en el comportamiento de la soldadura, ya que no se ha realizado estudios previos. El proceso se lleva a cabo mediante la adición de ferrosilicio en proporciones definidas al fundente granulado del proceso SAW. Las muestras obtenidas tienen como fin ser estudiadas mediante ensayos no destructivos, ensayos mecánicos y análisis metalográfico. Los resultados reflejan la influencia beneficiosa del ferrosilicio sobre la microestructura del material a medida que el contenido de silicio e inclusiones incrementa en el fundente, causando mayor formación de ferrita acicular. Se observa estabilidad en los valores de resistencia a la tracción y un incremento de la dureza del cordón de soldadura. Se confirma con los resultados de ensayos no destructivos que el incremento de contenido de silicio no produce defectos de soldadura.

Palabras clave: Soldabilidad, ferrosilicio, aleación, microestructura, inclusiones.

ABSTRACT

The present work describes the weldability study of an A588 steel as the amount of silicon in the flux of the submerged arc welding process is increased in order to know the ranges in which this process generates an improvement or decrease in the welding behavior, since no previous studies have been carried out. The process is carried out by adding ferrosilicon in defined proportions to the granulated flux of the SAW process. The samples obtained are intended to be studied by non-destructive testing, mechanical testing and metallographic analysis. The results reflect the beneficial influence of ferrosilicon on the microstructure of the material as the content of silicon and inclusions increases in the flux, causing greater formation of acicular ferrite. Stability in the tensile strength values and an increase in the hardness of the weld seam are observed. It is confirmed with the results of non-destructive tests that the increase in silicon content does not cause welding defects.

Keywords: Weldability, ferrosilicon, alloy, microstructure, inclusions.

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL SILICIO EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A588 MEDIANTE EL PROCESO SAW

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un gran nivel de desarrollo de la tecnología de soldadura que permite obtener cada vez mejores resultados en cuanto a sus propiedades mecánicas y químicas, con menores pérdidas energéticas, así como económicas. Dichas propiedades son resultado del estudio de diversos elementos relacionados con el material base y de aporte, procedimiento de soldadura, diseño de las juntas, elementos aleantes, entre otros. Los elementos químicos que componen el cordón de soldadura están íntimamente relacionados al desempeño que la junta presentará en su ciclo de vida y determinan en gran cantidad la capacidad de cumplir su función. Existe literatura técnica que otorga un acercamiento a los porcentajes adecuados de diversos elementos aleantes en el acero, sin embargo, no existe suficiente información del comportamiento de la soldadura de aceros mientras se varia la composición de silicio en la misma.

El silicio es un componente ampliamente utilizado en la metalurgia en forma de una aleación de hierro denominada ferrosilicio, usado como agente desoxidante, así mismo incrementa la resistencia en el acero en la cantidad correcta, pero puede generar fisuras por pérdida de ductilidad resultando en una incidencia negativa en la soldabilidad del acero. El presente proyecto de titulación pretende crear una referencia válida de la variación de propiedades mecánicas de la junta soldada, así como cambios a nivel microestructural influenciados por el contenido de silicio, con el fin de obtener datos de los rangos de porcentajes que mejor se ajusten a un incremento de resistencia mecánica, así como rangos no deseables para una soldabilidad idónea.

La recolección de datos es posible gracias a la realización de ensayos mecánicos, ensayos no destructivos y análisis metalográfico de probetas obtenidas con un proceso de soldadura por arco eléctrico, variando de manera progresiva el contenido de ferrosilicio en el fundente del proceso SAW.

Objetivo general

Analizar la influencia del silicio en la soldabilidad del acero ASTM A588 mediante el proceso SAW.

Objetivos específicos

- Determinar las propiedades mecánicas generadas a medida que se varia la mezcla de ferrosilicio y fundente del proceso SAW en la soldadura.
- Estudiar la microestructura generada en la soldadura a según la proporción de mezcla.
- Analizar la relación entre propiedades mecánicas y cambios microestructurales generados en proceso SAW

1. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo presenta una revisión bibliográfica de los conceptos que se abordan en el proceso de cumplimiento de los objetivos de estudio. En este capítulo se esclarecen los conceptos esenciales para la comprensión del presente proyecto, como la selección de materiales y procesos.

1.1. Soldadura

La soldadura se encuentra definida por la American Welding Society (AWS) como una coalescencia localizada de metales o no metales mediante el calentamiento de estos a una temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión y con o sin la aplicación de material de aporte. Por lo tanto, la soldadura puede realizarse cuando (1) se aporta calor suficiente para el ablandamiento o fusión de los materiales a unirse, (2) se aplique una presión suficiente para generar coalescencia de estos o (3) se aplique calor y presión para forzar la unión de los materiales [1].

Los procesos de soldadura se agrupan según distintos criterios que pueden ser:

- (1) Según el nivel de participación del factor humano en el momento de efectuar el depósito
- (2) De acuerdo con la temperatura de trabajo y tipo de material de aporte utilizado
- (3) Agrupación según a la American Welding Society, cuyos lineamientos son los que se toman en consideración en el presente trabajo.

La American Welding Society (AWS) clasifica los procesos de soldadura como se muestra en la figura 1.1.

1.1.1. Soldadura por arco sumergido

La soldadura por arco sumergido o (SAW, por sus siglas en inglés) es un proceso en el que se produce la coalescencia de metales mediante el calentamiento de estos con el arco eléctrico formado entre el material y el electrodo. La particularidad del proceso es que el arco eléctrico y el metal fundido se encuentran sumergidos en una capa de fundente que se coloca en la zona a soldar. Este proceso no requiere de aplicación de presión y el material de aporte es el mismo electrodo, también se puede aportar con material extra en forma de alambre, fundente o metal granulado [2].

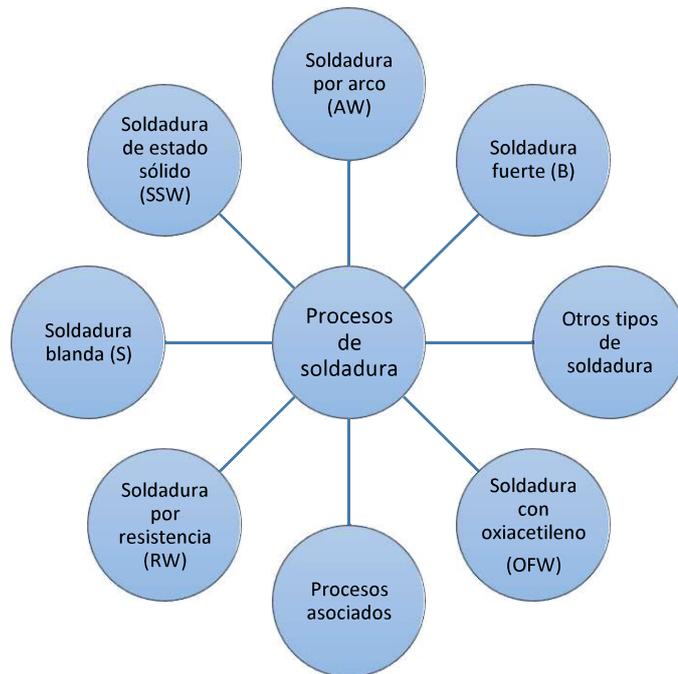


Figura 1.1. Clasificación de los procesos de soldadura según la American Welding Society (AWS).

(Fuente: [1])

El uso del fundente en el proceso de soldadura es fundamental, sus principales características se hallan descritas por la AWS y menciona:

- (1) Evita problemas durante el proceso de soldadura como inestabilidad del arco, emisión de radiación, salpicaduras, emisión de vapores.
- (2) Infiere en las propiedades mecánicas y químicas finales del cordón de soldadura.

El efecto de protección atribuido al fundente se explica en su comportamiento durante el proceso de soldadura, donde el calor aportado por el arco eléctrico funde parte del fundente junto al metal de aporte y metal base formando el “baño de soldadura”, mismo que permanece bajo una capa de escoria que es expulsada junto a las burbujas de gas producidas para formar una capa protectora que separa a la zona soldada de la atmósfera. La capa producida contiene entonces impurezas disueltas del material base y del material de aporte, como también la escoria del fundente. La disposición y zonas generadas durante el proceso de soldadura se muestran en la figura 1.2.

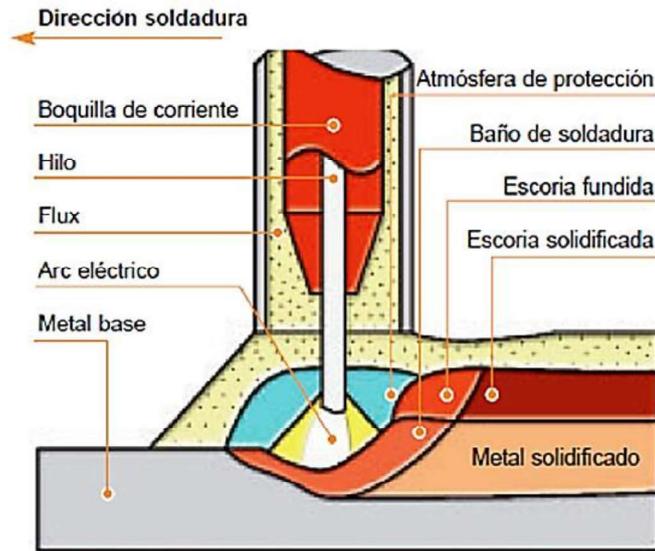


Figura 1.2. Proceso de soldadura por arco sumergido en la zona del arco eléctrico.

(Fuente: [3])

Cabe mencionar que uno de los beneficios ambientales del proceso de soldadura por arco sumergido es su baja tasa de emisión de gases hacia la atmósfera gracias a la pesada capa de fundente utilizada [1].

1.1.1.1. Electrodo

El electrodo en el proceso de soldadura por arco sumergido o SAW como se lo denominará de aquí en adelante es un alambre continuo que tiene dos funciones: (1) actuar como material de aporte y (2) ser la zona de contacto para la generación del arco eléctrico, la alimentación del material de aporte se realiza por lo general de forma automática.

Se lo comercializa comúnmente en presentación de bobinas de entre 10 y 500 Kg, donde el alambre de acero se encuentra cubierto por una capa de cobre que mejora la conductividad eléctrica, previene la corrosión y disminuye la fricción durante el proceso de alimentación de este. Debido a la versatilidad del proceso es posible utilizar varios hilos simultáneamente o bandas [3].

Al ser un proceso de alta tasa de depósito es común la comercialización de hilos de diámetro entre 1.6mm y 6.4 mm, la intensidad de corriente asociada al tamaño de este se presenta en la tabla 1.1.

Como se observa en la tabla 1.1. los rangos de corriente se solapan para diferentes valores de diámetro de electrodo, lo que permite jugar con dichos valores según la necesidad, por ejemplo:

Diámetros de electrodos pequeños generan mayor penetración y un baño de soldadura más estrecho que un diámetro elevado debido al efecto de concentración de la corriente.

Así también se genera un encendido y estabilidad del arco eléctrico superiores en diámetros pequeños. Es decir que para una aplicación de soldadura de depósito que no requiere una gran penetración no se deben seleccionar electrodos de diámetro reducido.

Tabla 1.1. Corriente según el diámetro de alambre para SAW.

| Alambre para soldadura por arco sumergido: Diámetro versus Rango de corriente | | |
|---|-------|--------------------|
| Diámetro del alambre | | Rango de corriente |
| mm. | pulg. | Amperios [A] |
| 1,6 | 1/16 | 150-350 |
| 2 | 5/64 | 200-500 |
| 2,4 | 3/32 | 300-600 |
| 3,2 | 1/8 | 350-800 |
| 4 | 5/32 | 400-900 |
| 4,8 | 3/16 | 500-1200 |
| 5,6 | 7/32 | 600-1300 |
| 6,4 | 1/4 | 700-1600 |

(Fuente: [2])

La AWS describe su clasificación según la siguiente estructura:

E-X-XX-Y

Donde:

- E: Electrodo.
- X: L, M o H, es el grado de contenido de manganeso (Mn) bajo, medio y alto, respectivamente.
- XX: Porcentaje de contenido de carbono multiplicado por 100.
- Y: Puede o no presentar la denominación K, que se refiere a que el acero es calmado.

1.1.1.1. Electrodo EM12K

EM12K es la denominación de la norma ANSI/AWS A5.17 otorgada a un electrodo sólido para proceso SAW compuesto de acero de bajo carbono y medio manganeso con una amplia gama de aplicaciones industriales, tales como: construcción de vigas, puentes, soldadura de relleno en general y entre otros. Se comercializa en bobinas con peso mínimo de 10 Kg como se observa en la figura 1.2 [4].

La nomenclatura describe un electrodo de medio contenido de manganeso (Mn), contenido de carbono en el rango de 0,05% y 0,15%, y de acero calmado (K).



Figura 1.2. Bobina de electrodo para proceso SAW.

(Fuente:[5])

La norma ANSI/AWS A5.17 establece los requerimientos químicos para los distintos tipos de electrodos sólidos utilizados en el proceso SAW, donde se observa el electrodo EM12K.

Tabla 1.2. Requerimientos de composición química para electrodos sólidos.

| Clasificación electrodos | Número UNS (3) | Porcentaje en peso (1) (2) | | | | | |
|-------------------------------|----------------|----------------------------|-------------------|-----------|-------|-------|--------|
| | | C | Mn | Si | S | P | Cu (4) |
| Electrodos de bajo manganeso | | | | | | | |
| EL8 | K01008 | 0,1 | 0,25/0,60 | 0,07 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |
| EL8K | K01009 | 0,1 | 0,25/0,60 | 0,10/0,25 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |
| EL12 | K01012 | 0,04/0,14 | 0,25/0,60 | 0,1 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |
| Electrodos de medio manganeso | | | | | | | |
| EM12 | K01112 | 0,06/0,15 | 0,80/1,25 | 0,1 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |
| EM12K | K01113 | 0,05/0,15 | 0,80/1,25 | 0,10/0,35 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |
| EM13K | K01313 | 0,06/0,16 | 0,90/1,40 | 0,35/0,75 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |
| EM14K | K01314 | 0,06/0,19 | 0,90/1,40 | 0,35/0,75 | 0,025 | 0,025 | 0,35 |
| | | | (Ti 0,03/0,17) | | | | |
| EM15K | K01515 | 0,10/0,20 | 0,80/1,25 | 0,10/0,35 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |
| Electrodos de alto manganeso | | | | | | | |
| EH11K | K11140 | 0,07/0,15 | 1,40/1,85 | 0,80/1,15 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |
| EH12K | K01213 | 0,06/0,15 | 1,50/2,00 | 0,25/0,65 | 0,025 | 0,025 | 0,35 |
| EH14 | K11585 | 0,10/0,20 | 1,71/2,20 | 0,1 | 0,03 | 0,03 | 0,35 |

(Fuente: [6])

1.1.2. Fundente

La AWS define al fundente como un compuesto granular de mineral fusible de composición variable, que protege al baño de soldadura de la atmósfera con una capa de escoria. Como se menciona en la sección 1.1.1, el fundente tiene características desoxidantes, y de limpieza del baño de soldadura. El tipo de influencia que el fundente ejerce en la soldadura es lo que definirá su clasificación que en términos generales es: (1) neutrales, (2) activos y (3) de aleación, así también se pueden clasificar los fundentes mediante su método de manufactura que incluye los tipos: (1) fundidos, (2) aglomerados, (3) mezclados mecánicamente, (4) cohesionados [2].

La neutralidad del fundente es un indicador del cambio en la composición química del metal soldado, principalmente causado por el contenido de manganeso (Mn) y de silicio (Si) del fundente.

La nomenclatura que permite identificar el fundente según sus características principales es una combinación de 4 letras de la forma: F-X-Y-Z.

Donde:

- F: Fundente
- X: Resistencia mínima a la tracción en múltiplos de 69 MPa (10000 psi).
- Y: Condición de tratamiento térmico de la probeta, la letra A en caso de ausencia de tratamiento térmico y la letra B en caso de tratamiento térmico.
- Z: Indica la menor temperatura de ensayo Charpy-V para obtener una energía de impacto de 27 J. Dichos datos se encuentran descritos en tablas.

1.1.2.1. Fundente F7A2

El F7A2 es un fundente granulado neutro que puede usarse en combinación con distintos materiales de aporte. Su nomenclatura describe un fundente que proporcionará una resistencia mínima a la tracción de 70000 psi, sin tratamiento térmico post-soldadura y con una temperatura mínima de -6,66°C (-20°F) en el ensayo Charpy [7].

El fundente se puede observar en la figura 1.3. tras realizarse una toma macrográfica de este.

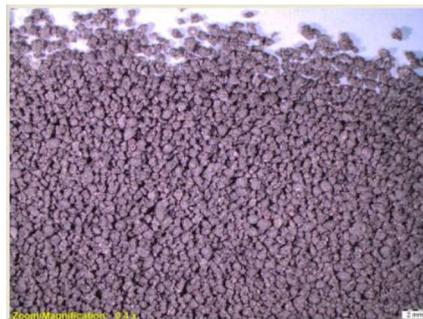


Figura 1.3. Macrografía del fundente Lincolnweld 960.

(Fuente: Propia)

La composición química del fundente se observa en la tabla 1.3., dichas características se le atribuyen al fundente del fabricante Lincoln Electric con su producto Lincolnweld 960.

Tabla 1.3. Composición del fundente.

| Consumible | Composición Química, wt% | | | |
|------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------|------------------|
| | SiO ₂ +TiO ₂ | Al ₂ O ₃ +MnO | CaO+MgO | CaF ₂ |
| S-717 | 10 | 30 | 35 | 10 |

(Fuente: [7])

1.2. Silicio

El silicio (Si) es un elemento químico metaloide de gran abundancia posicionándose como el segundo elemento más abundante presente en nuestro planeta en forma de dióxido de silicio (SiO_2) más conocido como sílice [8]. Se presenta en la figura 1.3. una muestra de silicio purificado.



Figura 1.3. Silicio

(Fuente: [9])

Entre sus principales características físicas se describen:

- Estado sólido
- Color grisáceo
- Brilloso
- Alta dureza
- Alto punto de fusión

Una de las aplicaciones tecnológicas más importantes del silicio es su uso como semiconductor, que se puede definir en términos generales como un elemento que por lo general no es conductor, pero conduce la corriente eléctrica a altas temperaturas o cuando se combina en pequeña proporción con otro elemento [9].

Otro uso importante del silicio se encuentra en la metalurgia donde se conoce que el silicio es utilizado como un desoxidante económico, y que como una ventaja de su presencia en el acero permite:

- Aumentar la resistencia
- Aumentar la tenacidad

Se ejemplifica lo mencionado en los aceros con un contenido de silicio de entre 1% y 2% denominados aceros navales, cuyo uso está dirigido a aplicaciones industriales con requerimientos de alto punto de fluencia. Así mismo, existen aplicaciones para maquinaria eléctrica en donde el acero presenta propiedades magnéticas como resultado de un 3% de silicio en su composición [10]. Para ilustrar esto se hace mención al acero ASTM A867 que se caracteriza por su amplio uso en la fabricación de relés y solenoides por sus

características magnéticas y de resistencia eléctrica, esto se logra con un contenido de silicio que varía de 1,1% a 4% de porcentaje en peso según el requerimiento [11].

Los aceros de forma general no presentan restricciones del contenido de silicio en su composición química, esta omisión se halla fundamentada en que la cantidad de silicio está determinada por el tipo de método de desoxidación durante la fabricación del acero. Por tanto, el contenido de silicio puede variar de colada a colada.

En productos de acería se debe considerar que el contenido de silicio no puede ser establecido independientemente del método de desoxidación, y por lo tanto al solicitar productos siderúrgicos es preferible citar especificaciones de sociedades reguladoras como ASTM, SAE, ASME, entre otras, en casos donde se requieren restricciones del contenido de silicio, cuando se conoce que este genera un cambio en el comportamiento del acero [12].

1.2.1. Ferrosilicio

Es una aleación de hierro y silicio caracterizada por su contenido de silicio que puede variar entre 40% y 80% de silicio [13]. El ferrosilicio es usado principalmente en la fundición de acero y sus principales funciones son[14]:

- Desoxidar la colada
- Agregar elementos aleantes
- Fabricar algunas ferroaleaciones en calidad de reductor
- Grafitizante para la producción de fundición gris
- Medio para la adición de silicio (Si) como elemento de aleación, para mejorar la resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas
- Producción de aceros especiales con bajo contenido de aluminio (Al)

Sus principales características físicas se describen en la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Propiedades físicas generales del ferrosilicio:

| Propiedad | Descripción |
|---------------------|---------------------------|
| Estado físico | Sólido |
| Color | Gris Oscuro |
| Olor | Inodoro |
| Punto de fusión | 1210-1360°C |
| Punto de ebullición | 2355°C |
| Densidad relativa | 3,4-5,1 g/cm ³ |

(Fuente: [15])

La composición del ferrosilicio dependerá de los requerimientos del usuario, a pesar de aquello se presenta en la tabla 1.4, la composición química de una muestra de ferrosilicio del mercado ecuatoriano y distribuido por la empresa Fundireciclar S.A., misma que se usa en el presente estudio. Se adjunta la composición en el ANEXO I.

Tabla 1.4. Composición química del ferrosilicio comercializado

| Ferrosilicio 75% | |
|------------------|--------------------|
| Elemento | Porcentaje en peso |
| Silicio (Si) | 77,42% |
| Aluminio (Al) | 1,35% |
| Carbono (C) | 0,03% |
| Azufre (S) | 0,006% |
| Fósforo (P) | 0,0% |

(Fuente: Propia)

1.3. Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA)

Los aceros constituyen la gama de materiales metálicos de mayor uso, principalmente por su bajo costo de fabricación dentro de una gran cantidad de diferentes especificaciones que cubren un amplio rango de límites a la fluencia, desde 200 MPa hasta 1400 MPa, en aceros de resistencia moderada y excelente resistencia, respectivamente [12].

El acero se puede clasificar de forma general en una variedad de sistemas dependiendo de:

- Composición, como aceros al carbono, baja aleación o inoxidables.
- Métodos de manufactura, como por horno eléctrico, de hogar abierto, de oxígeno básico.
- Método de acabado, como rolado en caliente o en frío.
- Forma del producto, como barra, placa, hoja, tira, tubería o formas estructurales.
- Tipo de desoxidación, como calmado, semi calmado, efervescente.
- Microestructura, como ferrítico, perlítico y martensítico.
- Requerimientos de resistencia, como los clasifica la ASTM.
- Tratamiento térmico, como recocido, templado o revenido.
- Descriptores de calidad, como forjado o grado comercial.

De las clasificaciones mencionadas es la clasificación por composición química la más ampliamente utilizada de forma internacional y de ahí que se denominen aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés), o simplemente microaleados. Los HSLA son un grupo de aceros diseñados para proveer propiedades mecánicas, así como, resistencia a la corrosión atmosférica y tenacidad superiores a la de los aceros

convencionales al carbono. No se consideran aceros aleados puesto que su objetivo es satisfacer ciertas propiedades mecánicas, y no así composiciones químicas. Su rango de resistencia a la fluencia es de 289-482 MPa (42-70 ksi), aproximadamente [12].

La AWS menciona que la soldabilidad de la mayoría de los aceros HSLA es muy similar a la del acero dúctil (buena soldabilidad), es decir, que para contenidos de carbono no mayores al 0.20 por ciento y 1 por ciento de manganeso, se puede soldar sin necesidad de precalentamiento, post-calentamiento, o procedimientos especiales de soldadura [16].

Una de las principales diferencias entre un acero de grado estructural y un HSLA es su composición química, en donde los aleantes del HSLA tienen como función:

- Incrementar la resistencia de la ferrita
- Promover la templabilidad
- Controlar el tamaño de grano

En la figura 1.4. se observa la diferencia de la estructura formada en un acero estructural y un HSLA. El acero HSLA presenta menor tamaño de grano e incremento de la perlita, lo que influye en su mayor resistencia.

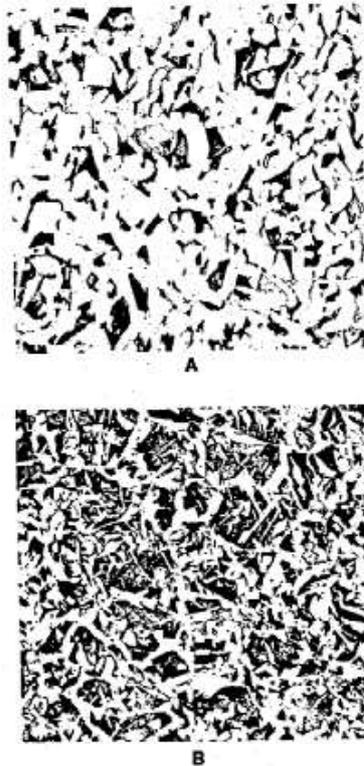


Figura 1.4. Microestructura general de acero (a) acero estructural, (b) HSLA.

(Fuente: [16])

Los aceros HSLA se pueden dividir en dos grupos generales: A y B

1.3.1. Grupo A

Son aquellos aceros diseñados para presentar alta resistencia y en su composición se incluyen elementos como vanadio, columbio y nitrógeno para mejorar la resistencia a la fluencia mediante el refinamiento de grano y el endurecimiento por precipitación. Dichos aceros tienen una soldabilidad considerada excelente [17]. Se consideran aceros del grupo A:

- A441
- A572
- A633
- A225

Debido a sus excelentes características se los utiliza principalmente en:

- Recipientes de presión
- Tubería
- Edificaciones
- Puentes
- Equipo de construcción y maquinaria
- Equipo para rieles férreas

1.3.2. Grupo B

Son aquellos aceros diseñados para presentar alta resistencia y una mejorada resistencia a la corrosión atmosférica que los aceros al carbono. Para su fabricación se utilizan elementos aleantes que incluyen Cu, Ni, Cr, P y Si en distintas proporciones, pudiendo alcanzar en algunos casos una resistencia a la corrosión cuatro veces mayor a la de un acero al carbono. Son adecuados para aplicaciones con temperaturas bajas de trabajo [17]. Se consideran aceros del grupo B:

- A242
- A588

1.4. Acero ASTM A588

El acero ASTM A588 es un acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA) perteneciente al grupo B, cuyas características principales son la tenacidad, durabilidad y resistencia a la corrosión, por tanto, su uso principal incluye aplicaciones estructurales como edificaciones y puentes [18]. Se describe de forma ampliada las características de los aceros HSLA en la sección 1.3.

En el Ecuador el acero ASTM A588 es el más utilizado para la construcción de puentes gracias a sus propiedades mecánicas, y resistencia a la corrosión. Otra de sus características es la formación de una “patina” de color marrón que protege al material de la atmósfera. Es necesario mencionar que el acero A588 se ha utilizado mundialmente para la construcción de puentes durante décadas. Sin embargo, existen aceros que superan el desempeño de este, con un valor comercial igual o menor, pero que por desconocimiento o falta de coordinación entre diseñadores, comerciantes y constructores no han podido incursionar de forma completa en el país. Por este motivo se considera al acero A588 el más utilizado para la construcción de puentes en la actualidad [19].

Los requerimientos químicos para cumplir la especificación ASTM A588 se muestran en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Requerimientos de composición química para la especificación ASTM A588.

| Elemento | Composición, % | | |
|-----------|----------------|-----------|------------|
| | Grado A | Grado B | Grado K |
| Carbono | 0,19 máx | 0,20 máx | 0,17 máx |
| Manganeso | 0,80-1,25 | 0,75-1,35 | 0,50-1,20 |
| Fósforo | 0,030 máx | 0,030 máx | 0,030 máx |
| Azufre | 0,030 máx | 0,030 máx | 0,030 máx |
| Silicio | 0,30-0,65 | 0,15-0,50 | 0,25-0,50 |
| Níquel | 0,40 máx | 0,50 máx | 0,40 máx |
| Cromo | 0,40-0,65 | 0,40-0,70 | 0,40-0,70 |
| Molibdeno | ... | ... | 0,10 máx |
| Cobre | 0,25-0,40 | 0,20-0,40 | 0,30-0,50 |
| Vanadio | 0,02-0,10 | 0,01-0,10 | ... |
| Columbio | ... | ... | 0,005-0,05 |

(Fuente: [18])

Como parte de los requerimientos para conformidad con la norma se describen también los requerimientos de tracción mostrados en la tabla 1.6.

Tabla 1.6. Requerimientos mínimos para tracción.

| Placas y barras | |
|--|------------------------------------|
| Propiedad | Espesor menor o igual a 4 pulgadas |
| Resistencia a la tracción, min, MPa, (ksi) | 485 (70) |
| Punto de fluencia, min, Mpa, (ksi) | 345 (50) |
| Elongación en 8 pulgadas. (200 mm), min, % | 18 |
| Elongación en 2 pulgadas. (50 mm), min, % | 21 |

(Fuente: [18])

1.5.1. Soldabilidad

La soldabilidad ha sido definida por la American Welding Society (AWS) como la capacidad de un metal de ser soldado bajo condiciones de fabricación impuestas, en una estructura correctamente diseñada y que cumpla satisfactoriamente su función esperada[1].

Se utiliza también el cálculo del carbono equivalente (CE) que se muestra en la ecuación 1.1, mismo que se determinó de forma experimental y que permite obtener una buena aproximación de la soldabilidad del acero en función de su composición química, la AWS menciona para aceros de baja aleación el siguiente modelo:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Ecuación 1.1. Carbono equivalente para aceros de baja aleación según la AWS.

(Fuente: [17])

El cálculo de carbono equivalente para acero ASTM A588 es 0,45 y por tanto requiere aplicarse el método de control de hidrogeno. El control de hidrogeno demuestra que se requiere una temperatura de soldadura de 20°C.

La soldabilidad incluye diversos parámetros que se describen a continuación:

- Metalurgia del metal base y de aporte
- Diseño de la junta
- Preparación de la soldadura
- Tratamientos térmicos antes y después de soldar

En términos generales se describe:

- Precalentamiento: Es un proceso en el cual el material base es calentado a una temperatura previo al proceso de soldadura con el objeto de mejorar el grado de enfriamiento, mismo que evita la transformación martensítica en la zona afectada por el calor (ZAC) y controla su dureza. De manera menos directa puede influir en la reducción de esfuerzos internos [17].

La AWS define que para el acero A588 en espesores de hasta 19 mm no se requiere precalentamiento.

- Proceso de soldadura: Los HSLA pueden soldarse mediante todos los procesos de soldadura con arco eléctrico, incluyendo el proceso SAW.
- Material de aporte: El acero A588 se puede usar sin recubrimientos ni pintura, con esa consideración la selección de material de aporte deberá presentar una resistencia a la corrosión y color similar. Se muestra en la tabla 1.7, los consumibles recomendados por la AWS para la soldadura de aceros HSLA.

- Tratamiento térmico post-soldadura: El tratamiento térmico post-soldadura no es común en aceros HSLA, sin embargo, para aplicaciones especiales se debe referir a las recomendaciones del fabricante del acero.

Tabla 1.7. Consumibles recomendados para la soldadura de aceros HSLA para estructuras.

| Acero ASTM | Proceso de soldadura | | | |
|--|----------------------------------|----------------|--------------------|---|
| | Electrodo revestido | Arco sumergido | Protección por gas | Núcleo de fundente |
| A242 | E7015 E7016 E7018 E7028 | F7XX- EXXX | ER 70S-X | E7XT-1 E7XT- 4,5,6,7,8 E7XT-11 E7XT-G |
| A441 | | | | |
| A572, Grado 42 | | | | |
| A588* (4 pulg o menos) | | | | |
| A633, Grado A,B,C,D (2.5 pulg. o menos) | | | | |
| A572 Grado 60,65 | E8015-XX E8016-XX E8018-XX | F8XX- EXXX | ER80S-XX | EOXTX- XX |
| A633 Grado E | | | | |
| | | | | |

*Para construcción de puentes la resistencia del metal depositado en el Ensayo Charpy-V debe ser de 27 J a -18°C.

(Fuente: [17])

2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo los objetivos del presente proyecto es necesaria la realización de ensayos sobre el material base y sobre las juntas soldadas con el proceso de soldadura SAW con fundente en las diferentes concentraciones de ferrosilicio, con el objeto de determinar las propiedades mecánicas, composición y su microestructura.

El análisis de la soldabilidad requiere del estudio del comportamiento de la soldadura en relación con sus propiedades mecánicas, su microestructura y de los defectos que aparecen debido a la variación del contenido de silicio. La caracterización mecánica se logra mediante los ensayos de tracción de sección reducida, doblado lateral y dureza, que permiten obtener datos importantes como módulo de Young, módulo de elasticidad, y UTS (esfuerzo último a la tracción). Los Ensayos No Destructivos permiten identificar y cuantificar los defectos presentes en la soldadura e incluyen los ensayos de Rayos X y Tintas Penetrantes. En relación con el estudio de la microestructura se realizan macrografías y micrografías para el estudio de fases.

El proceso se muestra en la figura 2.1, donde se presenta el método utilizado para la variación de contenido de silicio y los ensayos a realizarse para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

2.1. Preparación del ferrosilicio

El ferrosilicio es comercializado en forma de rocas para su adición en la fundición, sin embargo, para el presente proyecto requieren ser trituradas para alcanzar un tamaño de grano que facilite su mezcla con el fundente del proceso de soldadura, se inicia el proceso con una muestra de 250 gr, que por su baja cantidad puede ser triturada manualmente.

Las rocas de ferrosilicio presentan dimensiones que según datos del fabricante rondan de 10-100 milímetros. Cabe mencionar que la muestra de ferrosilicio fue donado por la empresa Fundireciclar S.A. gracias a la gestión realizada por el Ing. Oscar Sotomayor, quien también colaboró en la selección de este material como fuente de aporte de silicio al proceso de soldadura.

2.1.1. Molienda del ferrosilicio

La molienda se realiza en un mortero de hierro fundido facilitado por el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional. La figura 2.2. muestra las herramientas utilizadas.

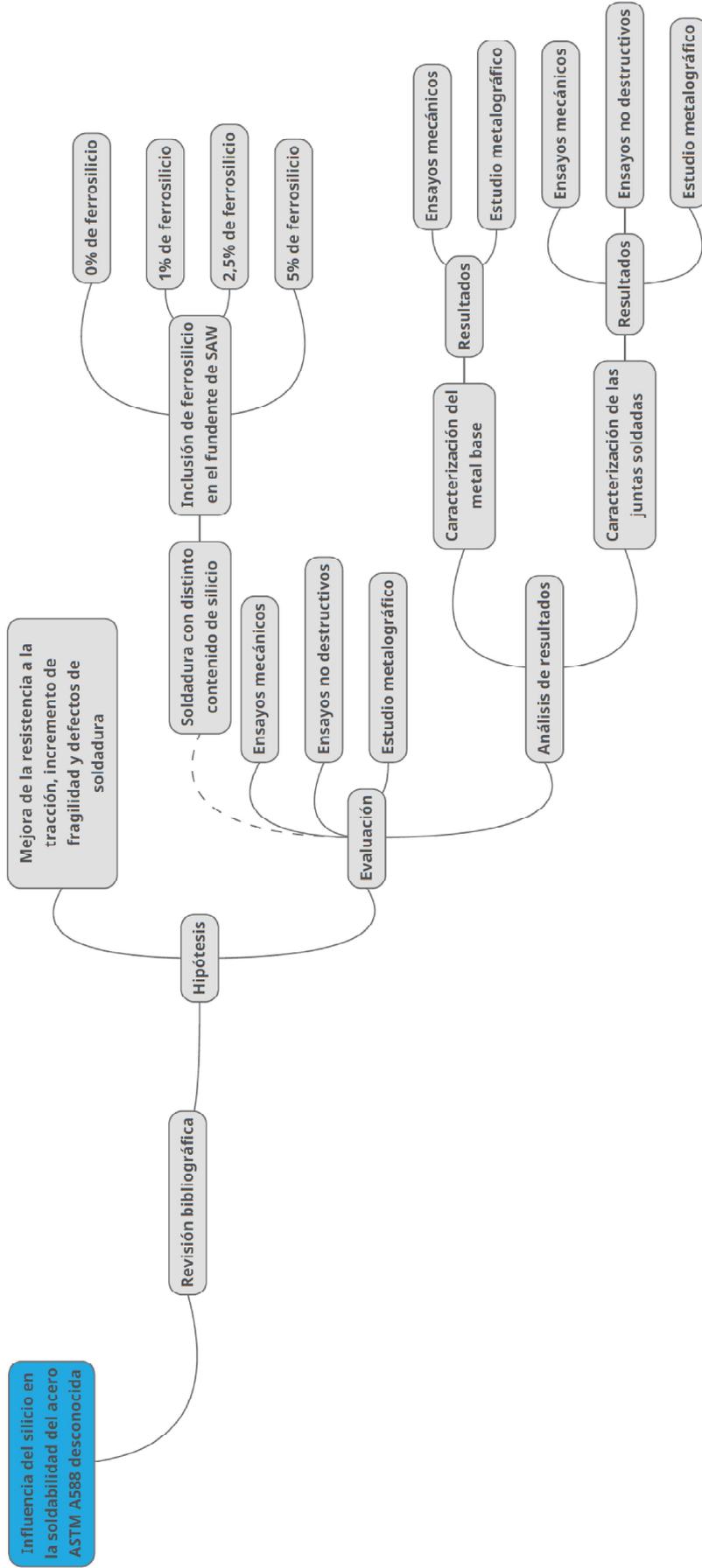


Figura 2.1. Proceso de investigación
(Fuente: Propia)



Figura 2.2. Mortero y mazo de hierro
(Fuente: Propia)

2.1.1.1. Procedimiento

El proceso consiste en reducir el tamaño de las rocas de ferrosilicio mediante la aplicación de fuerza por parte del operador con un mortero de hierro.

Detallando el proceso:

- Lavado del mortero y mazo
- Secado del mortero y mazo
- Triturado una porción pequeña de material
- Tamizado
- Repetir el triturado y tamizado hasta completar toda la muestra de ferrosilicio

Es necesario mencionar que el proceso se debe realizar con equipo de protección personal para evitar la inhalación de partículas contaminantes. La figura 2.3 muestra el ferrosilicio una vez que se concluye el proceso de triturado.



Figura 2.3. Ferrosilicio finamente triturado
(Fuente: Propia)

2.1.2. Tamizado del ferrosilicio

El proceso de tamizado es de gran importancia puesto que permite obtener una granulometría similar en el ferrosilicio y el fundente de proceso SAW, con el único objeto

de generar una mezcla tan homogénea como sea posible. El proceso de tamizado se realizó en el Laboratorio de Fundición de la EPN, quienes disponen de una serie tamices. Se utilizaron dos tamaños de tamices que se describen en la tabla 2.1.:

Tabla 2.1. Descripción de los tamices utilizados.

| Características de los tamices | |
|--------------------------------|------------|
| Número de tamiz | Apertura |
| 12 | 1,70 mm |
| 20 | 341 micras |

(Fuente: Propia)

2.1.2.1. Procedimiento

Como se menciona en la sección 2.1.1. el proceso de molienda requiere de un tamizado de forma alternada, es decir, se tritura el material y posteriormente se tamiza hasta que no haya presencia de rocas de tamaño superior al previsto por el tamiz.

El proceso se realiza de la siguiente manera:

- Triturado de una muestra de ferrosilicio
- Tamizado con tamiz número 12
- Repetir los pasos anteriores hasta que todo el material atraviese el tamiz
- Triturado del ferrosilicio
- Tamizado con tamiz número 20
- Repetir los dos pasos anteriores hasta que todo el material atraviese el tamiz

Se muestra en la figura 2.4 el proceso de tamizado con que no permite el paso de granos de mayor tamaño.



Figura 2.4. Proceso de tamizado del ferrosilicio con el tamiz número 12.

(Fuente: Propia)

2.2. Caracterización del metal base

Caracterizar el material base permite comprobar que este cumpla las especificaciones de la norma ASTM A588 como se define en los objetivos de estudio, y da paso a la realización de ensayos sobre un material base con propiedades conocidas. El cumplimiento de requisitos de composición química y de propiedades mecánicas permiten clasificar al material dentro de la especificación ASTM A588.

2.2.1. Ensayos de composición química mediante espectrometría de chispa

El acero A588 debe cumplir requerimientos de composición química que se ajusten a su clasificación, para lo cual se realiza el análisis de composición química mediante un espectrómetro de chispa con la colaboración del Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional. Dicho análisis muestra el contenido porcentual de los elementos constitutivos del material base, mismos que se relacionan con sus propiedades mecánicas.

2.2.1.1. Equipo

Para el análisis se empleó un siguiente equipo:

Tabla 2.2. Especificaciones del espectrómetro de chispa del Laboratorio de Fundición de la EPN.

| Especificaciones del equipo de espectrometría | |
|---|--------------------------------------|
| Fabricante | Bruker |
| Modelo | Q2 ION Ultra compact Metals Analyzer |
| Voltaje | 100-240 V (50-60Hz) |
| Potencia | 200W |
| Dimensiones | 400x1280x390 mm |
| Consumo de gas | 2,5 l/min |
| Software | Elemental Suite |

(Fuente: [20])

2.2.1.2. Procedimiento

El análisis de composición química inicia con el uso de gas argón para protección atmosférica de la cámara de análisis, seguidamente se realiza la calibración del equipo a los valores establecidos por el fabricante mediante el uso de una probeta patrón, una vez calibrado el equipo se procede al montaje de la probeta a analizarse misma que debe presentar una superficie limpia y con pulido fino. En la probeta de dimensiones 30x30x12 mm se realiza entonces tres tomas de datos mediante chispa, mismos que serán analizados y mostrados en el software Elemental Suite.

2.2.2. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción permite obtener información de ductilidad y resistencia de los materiales bajo cargas axiales. La caracterización mecánica del material base es un requerimiento fundamental, ya que establece los parámetros respecto a los que se evaluarán las posteriores juntas soldadas. Para la validez del ensayo es necesario tomar en consideración los lineamientos definidos por la norma ASTM, misma que describe el dimensionamiento de las probetas del mismo según el espesor del material.[21]

El ensayo consiste en la preparación de la máquina o calentamiento de la misma en casos de periodos largos inactividad, medición del área de sección reducida, marcado de la zona de sujeción de la galga extensométrica según los requerimientos de la norma, encerado de la máquina (fuerza cero), sujeción de la probeta, y ensayado de las probetas. La carga de tracción se detendrá cuando las probetas se fracturen.

2.2.2.1. Probetas

Para el ensayo de tracción del material base se consideran los requerimientos de la norma E8 a partir de las características del material a ensayarse: (1) Presentación del material (placa, eje, tubería), y (2) espesor del material, en este caso 12 mm. La forma final se logra mediante arranque de viruta en el Laboratorio de Máquinas Herramientas de la EPN con el uso de una limadora y acabado manual. La norma ASTM E8 presenta diversos requerimientos dimensionales como se muestra en la figura 2.5 con texto adaptado al idioma español.

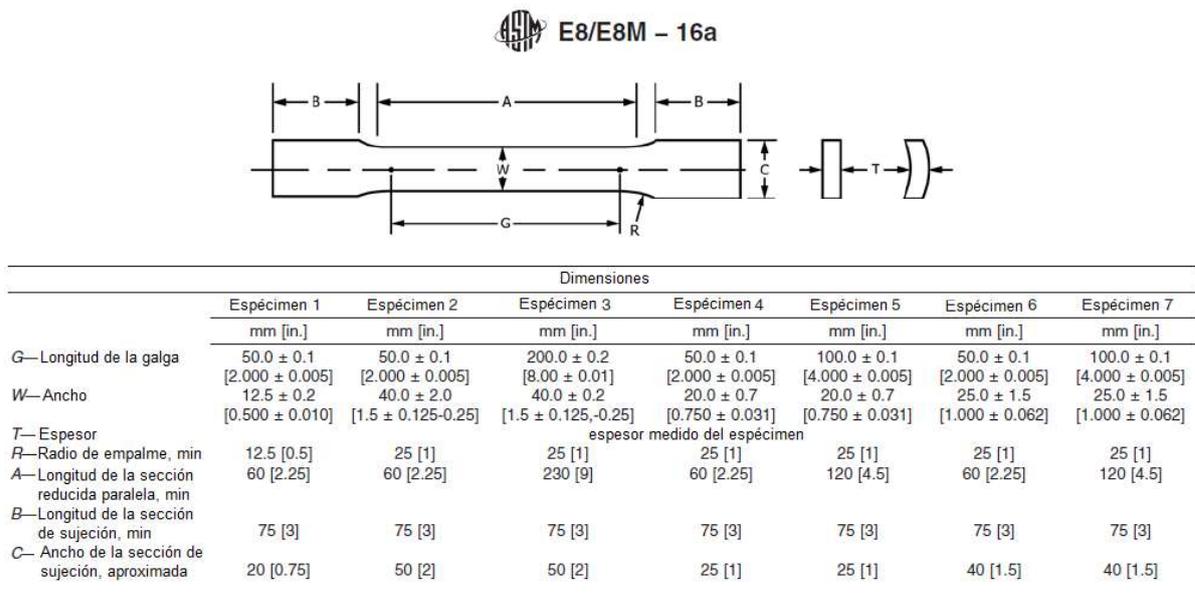


Figura 2.5. Dimensiones disponibles para probetas de ensayo de tracción.

(Fuente: [21]).

Se muestra el esquema final de las probetas en la figura 2.6.

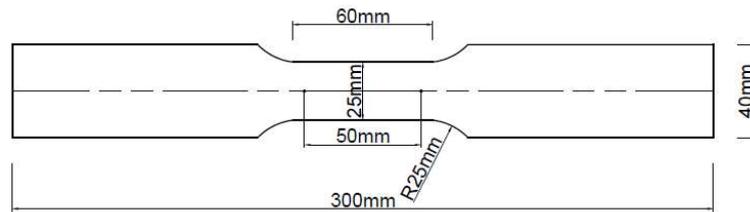


Figura 2.6. Dimensiones finales de la probeta de tracción.

(Fuente: Propia)

2.2.2.2. Equipo

El procedimiento de ensayo se realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN, en donde se contó con una maquina universal de ensayos con las características presentadas en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Características de la maquina universal de ensayos.

| | |
|------------|--------------|
| Fabricante | Tinius Olsen |
| Modelo | Super L |
| Capacidad | 3000 kN |
| Peso | 1180 Kg |

(Fuente: [22])

2.2.3. Ensayos metalográficos

Los ensayos metalográficos incluyen dos procesos principales (1) macrografías y (2) micrografías, mismas que otorgan información acerca de las zonas formadas durante el proceso de soldadura como son zona afectada por el calor (ZAC), zona de fusión, material base, pases de soldadura, así como también, la microestructura y discontinuidades presentes en la soldadura. El proceso se realizó en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN junto al personal especializado. Se muestra en la figura 2.7 una metalografía con aumento de 500x realizada en el LMDF.



Figura 2.7. Metalografía de una probeta de acero (500x).

(Fuente: Propia)

2.2.3.1. Probetas

Los ensayos metalográficos requieren de la preparación de probetas en donde la zona a ser estudiada presente una superficie completamente pulida conocida como acabado de tipo espejo, que se caracteriza por la ausencia completa de rayones visibles en el microscopio. En la figura 2.8. se observa una probeta pulida para la realización de micrográficas previo al ataque químico con nital al 10%.



Figura 2.8. Probeta del cordón de soldadura pulida.

(Fuente: Propia)

El proceso de preparación de probetas se describe de la siguiente manera:

- Extracción: Se obtiene una muestra de la zona de soldadura mediante corte refrigerado con el fin de generar el menor impacto sobre la microestructura generada originalmente en el proceso de soldadura
- Montaje: La muestra es cubierta por resina para la conformación de una probeta de fácil manipulación
- Desbaste grueso: La superficie de estudio y la opuesta son desbastadas de manera que sean lisas y paralelas, el proceso se realizó en la desbastadora del LMDF.
- Desbaste fino: En este proceso se busca reducir la mayor parte de rayones mediante un lijado en agua en serie con las siguientes medidas de mayor a menor tamaño de grado respectivamente, 320, 240, 600 y 1200.
- Pulido: Es el proceso final de acabado mediante el uso de una pulidora de paño, acompañada de alúmina como partículas pulidoras. Se debe realizar un enjuague con agua y una posterior limpieza de la superficie con alcohol de alta concentración para detener cualquier posible proceso de corrosión. El equipo se muestra en la figura 2.9.

Como se observa en el procedimiento descrito, la preparación de las probetas se realiza con refrigeración en todo momento de manera que la microestructura no se vea afectada por recalentamiento durante los procesos de corte. En el proceso de preparación de probetas se puede incluir el ataque químico con nital al 10% de concentración con el objetivo de revelar la microestructura del acero.



Figura 2.9. Máquina pulidora de paño
(Fuente: Propia)

2.2.3.2. Equipo

El proceso de obtención de metalografías se realiza mediante el uso de dos microscopios pertenecientes al LMDF de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo utilizado se caracteriza por su capacidad de obtener imágenes de gran calidad de la superficie de materiales metálicos, con lentes que permiten la captura de imagen con escalas de entre 200 micras y 2 milímetros para el presente proyecto. En la tabla 2.4. se puede observar las características principales de los equipos.

Tabla 2.4. Características de los equipos para metalografía.

| Microscopio estereoscópico | | |
|-------------------------------------|------------------|--|
| Características | | Imagen |
| Fabricante | Olympus |  |
| Modelo | SXZ7 | |
| Magnificación | 7:1 8x – 112x | |
| Microscopio metalográfico invertido | | |
| Características | | Imagen |
| Fabricante | Olympus |  |
| Modelo | GX41 | |
| Objetivos | 5x-100x | |

Fuente: ([23],[24])

2.2.4. Ensayo de dureza

Es un procedimiento experimental en el cual se realiza una indentación en el material con el objeto de medir la profundidad generada y obtener una medida de dureza que represente dicha deformación. El presente proyecto usa el método de dureza Rockwell, mismo que requiere seguir un procedimiento específico, con indentadores, y máquinas previamente aprobadas para el ensayo mencionado. El equipo para ensayo de dureza Rockwell utilizado forma parte del LMDF. Se observa el procedimiento de aplicación de carga en la figura 2.10, la imagen se adaptó para el presente estudio.

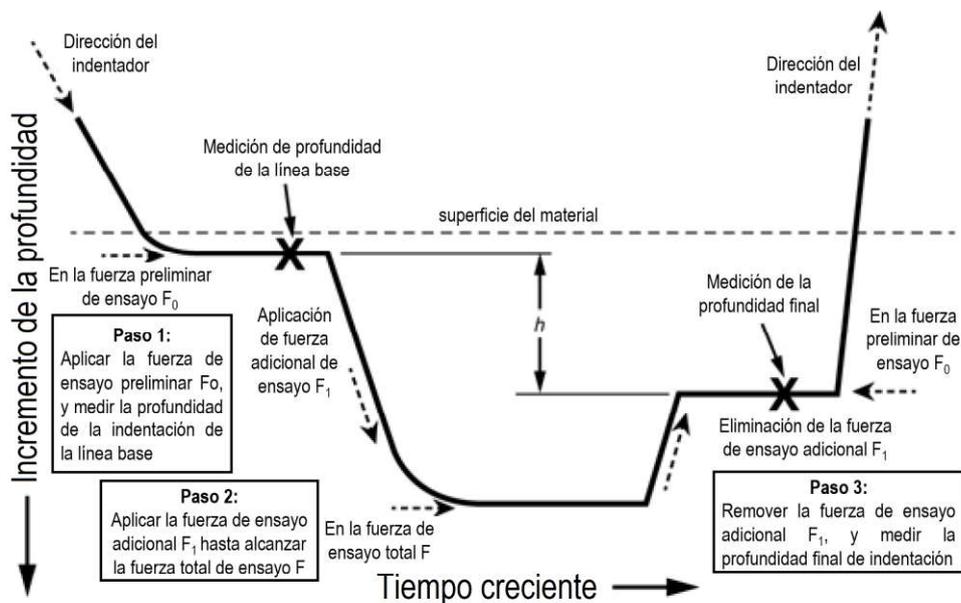


Figura 2.10. Proceso de aplicación de carga del ensayo de dureza según la norma ASTM.

(Fuente: [25])

El procedimiento consiste en la aplicación de una carga preestablecida con el indentador normalizado, se aplica una carga adicional preestablecida y finalmente se retira la carga adicional hasta alcanzar la carga inicial, esto genera una profundidad que se relaciona a la dureza establecida por la escala Rockwell.[25]

El ensayo consiste en la toma de varias muestras de dureza en distintas zonas de la superficie preparada del material base, que permiten obtener una dureza promedio mediante el modelo matemático descrito en la misma norma ASTM.

2.2.4.1. Probetas

Las probetas utilizadas para ensayos de dureza fueron las mismas que se utilizaron para el estudio metalográfico que se describió en la sección 2.3.3.1. En la superficie se realizaron las mediciones respectivas que se muestran en la figura 2.11.



Figura 2.11. Probeta de material base post ensayo de dureza.

(Fuente: Propia)

2.2.4.2. Equipos

El ensayo de dureza requiere de un equipo estandarizado para dureza Rockwell, mismo que forma parte del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla. La tabla 2.5. muestra las especificaciones del equipo.

Tabla 2.5. Especificaciones del durómetro Rockwell.

| Durómetro Rockwell | |
|--------------------|------------------|
| Características | |
| Fabricante | Hardrocker |
| Modelo | HR-150A |
| Carga menor | 10 kgf |
| Carga mayor | 60, 100, 150 kgf |
| Visualización | Analógica |



(Fuente: [26])

2.3. Adición del ferrosilicio

El presente estudio es posible gracias a la capacidad del proceso SAW de incluir elementos aleantes en el fundente granulado, de manera que es posible agregar el ferrosilicio pulverizado y con granulometría conocida al fundente F7A2. Como se menciona en la sección 1.3.1. el ferrosilicio es una aleación capaz de ser el vehículo de otros elementos aleantes, aparte de actuar principalmente como desoxidante y descontaminante.

En el presente estudio se selecciona ferrosilicio con 75% de contenido de silicio (Si), convirtiéndolo en el principal elemento aleante.

La mezcla de ferrosilicio-fundente se realiza en 4 proporciones distintas para la observación de los cambios en propiedades mecánicas y microestructura a medida que se incrementa el contenido de silicio.

La cantidad de ferrosilicio agregado es arbitraria puesto que no existe literatura de experimentos similares, sin embargo, considerando el trabajo realizado por J. Park y K. Kang en 2006, donde se analiza el efecto del ferrosilicio en la composición de las

inclusiones en acero y se agrega un máximo de 3.3% en peso, se decide para el presente estudio incluir un valor máximo de 5% en peso de ferrosilicio en el fundente F7A2.

Es muy imperativo que existan valores referenciales para determinar el comportamiento de la unión soldada una vez que introduce el silicio, por tal motivo se recopilan datos de forma experimental de una muestra de soldadura en condiciones estándar, es decir, con el fundente libre de ferrosilicio. Los porcentajes de mezcla definitiva se describen en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Porcentaje en peso de ferrosilicio en el fundente para SAW.

| Porcentaje de ferrosilicio | Identificación de la mezcla |
|----------------------------|-----------------------------|
| 0% | P1 |
| 1% | P2 |
| 2.50% | P3 |
| 5% | P4 |

(Fuente: Propia)

2.3.1. Procedimiento

La preparación de la mezcla se llevó a cabo considerando las proporciones descritas en la tabla 2.6. y se describe de la siguiente manera:

- 1) Pesar de 1000 gramos de fundente
- 2) Retirar fundente con una medida de 0.5 gramos hasta alcanzar el peso que sumado al ferrosilicio sumen 1000 gramos.
- 3) Agregar ferrosilicio hasta completar 1000 gramos.
- 4) Mezclar

El proceso de mezclado se repite siempre antes de agregarlo a la junta a soldarse, pues el ferrosilicio al ser más denso segregará, es decir, se deposita en el fondo del recipiente.

Es importante mantener el fundente sellado en su empaque original hasta los instantes previos a la preparación de la mezcla para evitar la absorción de humedad. Martin, A. expresa que el fundente requiere secado si no se encuentra sellado por al menos 6 meses.[3]

En la figura 2.11 se observa una mezcla de 1000 gramos antes de ser homogenizada de los cuales 50 gramos son ferrosilicio, que presenta una coloración gris.



Figura 2.11. Mezcla fundente-ferrosilicio al 5% de ferrosilicio.

(Fuente: Propia)

2.4. Proceso de soldadura

El proceso de soldadura se realiza en el Laboratorio de Soldadura y Taller de Procesos de Producción Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, en colaboración con el personal especializado. Los detalles de WPSs y PQRs se adjuntan en el ANEXO VI.

El proceso de soldadura seleccionado para la inclusión del silicio en el cordón es el proceso por arco sumergido (SAW), en virtud de la capacidad de incluir elementos aleantes en el fundente de soldadura granulado.

El acero ASTM A588 tiene buena soldabilidad por procesos con arco eléctrico, punto que se menciona en la sección 1.5., esto incluye la correcta selección de parámetros iniciales:

- 1) Proceso de soldadura: Soldadura por arco sumergido
- 2) Material base: Acero ASTM A588 de 12 mm de espesor, de gran soldabilidad y principal material de construcción de puentes en el mercado local
- 3) Electrodo: EM12K de 2 mm de diámetro, electrodo de proceso SAW usado en combinación con el fundente F7A2
- 4) Fundente: F7A2, fundente de mínima resistencia a la fluencia de 70000 psi recomendado como consumible para acero ASTM A588 por la AWS. El fundente se conserva sellado en su embalaje original hasta que se inicie el proceso de soldadura.
- 5) Tratamientos térmicos: No son necesarios, según la AWS.
- 6) Diseño de la junta: Se muestra en la figura 2.12, según los requerimientos mínimos para una junta calificada bajo la AWS D1.1.

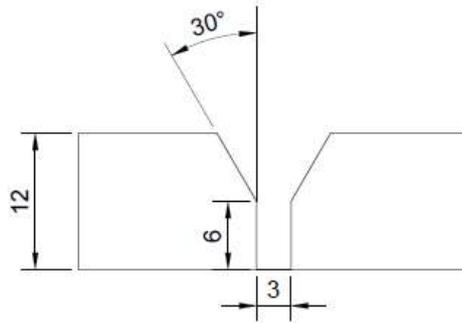


Figura 2.12. Diseño de la junta con cotas en milímetros.

(Fuente: Propia)

2.4.1. Probetas

La junta soldada se basa en las dimensiones y disposición definida por la AWS D1.1. que se muestra en la figura 2.13, específicamente el esquema (2).

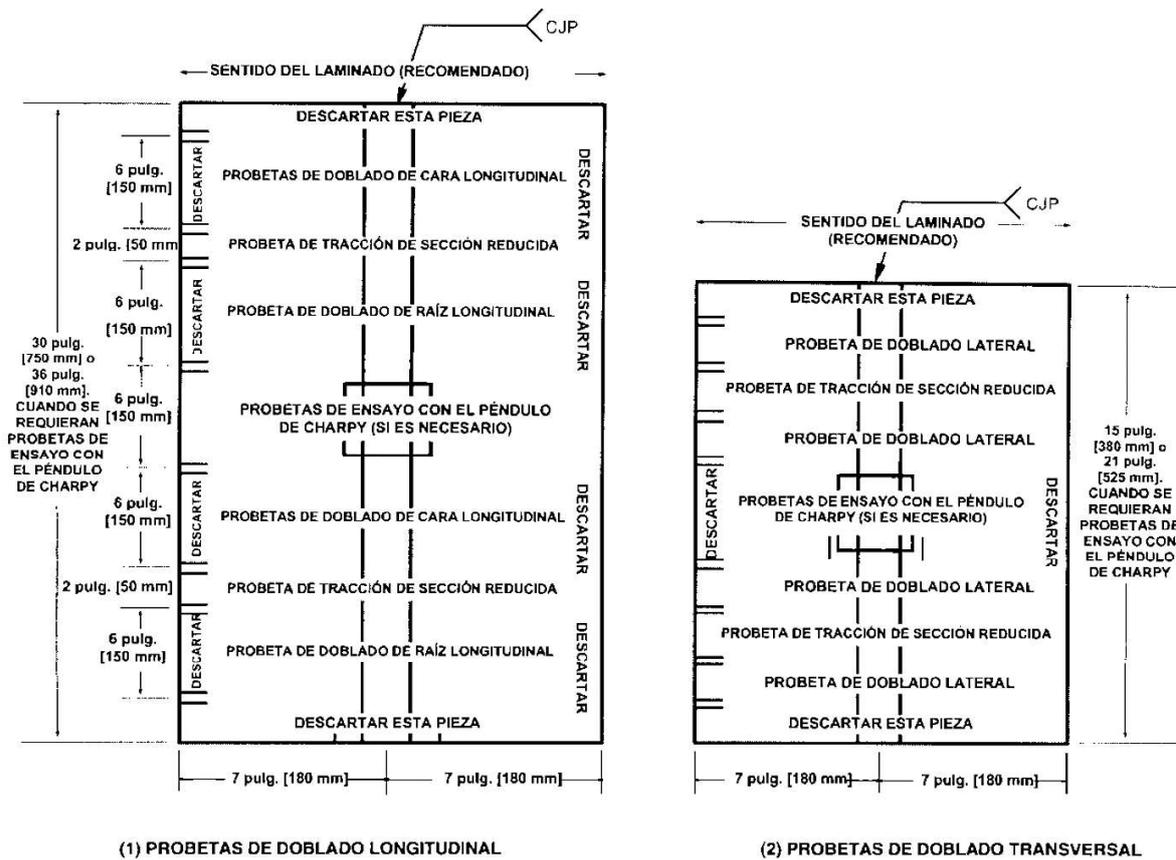


Figura 2.13. Ubicación de probetas para ensayos mecánicos de la junta soldada para placas mayores a 10 mm.

(Fuente:[27])

Como se describe en la sección 2.3. se caracterizan cuatro juntas soldadas con variación de ferrosilicio en el fundente. Las cuatro juntas soldadas mantienen las mismas dimensiones, así como también la dirección de laminado para evitar disminución de la resistencia a la fluencia.

La selección de dicha disposición de probetas se realiza en función del espesor del material como se observa en la tabla 2.9. y por tanto al presentar un espesor de 12 mm se deben realizar 2 ensayos de tracción de sección reducida y 4 ensayos de doblado lateral.

Tabla 2.9. Requerimientos para ensayo mecánicos para placas soldadas.

| Espesor nominal de la placa ensayada (mm) | Tracción de sección reducida | Doblado de raíz | Doblado de cara | Doblado lateral |
|---|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $3 \leq T \leq 10$ | 2 | 2 | 2 | Nota |
| $10 \leq T \leq 25$ | 2 | --- | --- | 4 |
| 25 o más | 2 | --- | --- | 4 |

Nota: Para un espesor pared o placa de 10 mm, se puede reemplazar un ensayo de doblado lateral por cada uno de los ensayos de doblado de raíz y de cara requeridos

(Fuente:[27])

2.4.2. Equipo

Se utilizan los equipos descritos a continuación:

- Soldadora de proceso SAW
- Alimentador automático de electrodo
- Carro semiautomático para avance de soldadura
- Mesa especial para proceso SAW
- Grata
- Amoladora

La tabla 2.10. presenta las características de equipo de soldadura.

Tabla 2.10. Características del equipo de soldadura

| Características de la máquina soldadora | |
|---|-------------------|
| Fabricante | Lincoln Welding |
| Modelo | R3S-400 |
| Fuente | Voltaje constante |
| Voltaje | 230-460 V |
| Corriente | 34-68 A |
| Características de la alimentadora de alambre | |
| Fabricante | Lincoln Welding |
| Modelo | Wire-Matic 255 |
| Capacidad | 1.27-15.2 m/min |

(Fuente:[28])

2.4.3. Procedimiento

Una vez obtenidas las probetas según los requerimientos del código AWS D1.1. se desarrolla el proceso de soldadura de la siguiente forma:

- Biselado: Obtención de la geometría de la junta mostrada en la figura 2.12.
- Soldadura de placas de respaldo para evitar el pandeo
- Soldadura de pase de raíz con proceso GMAW para garantizar una unión de calidad en cada probeta. Se utiliza gas de protección CO₂
- Soldadura con proceso SAW: A partir del segundo pase se realiza el proceso común de soldadura mediante arco sumergido con las distintas composiciones de mezcla fundente-ferrosilicio como se describe en el punto 2.3. Se realizan en promedio 4 pases con proceso SAW por probeta.

El proceso de soldadura se muestra en la figura 2.14, con la probeta identificada como P3, es decir con contenido de 2,5% de ferrosilicio en el fundente.



Figura 2.14. Soldadura de probeta P3.

(Fuente: Propia)

El proceso SAW se caracteriza por la formación de una capa de escoria muy grande que cubre toda la cara del cordón de soldadura, esta escoria se desprende con poco o nada de esfuerzo en casi todos los pases.

Como una medida para garantizar la calidad de la soldadura se realiza un proceso de desbaste de la cara del cordón de soldadura previo a los siguientes pases, este proceso no se realiza en el último pase.

El detalle del proceso de soldadura de muestra en el ANEXO II.

2.5. Caracterización de las juntas soldadas

Tras realizarse el proceso de soldadura es necesario evaluar el comportamiento mecánico, así como, las características microestructurales de las juntas soldadas. Como se describe

en la sección 2.4. se realizan ensayos de tracción de sección reducida y ensayos de doblado lateral.

2.5.1. Ensayo de tracción de sección reducida

Los fundamentos y procedimientos del ensayo de tracción se revisan en la sección 2.2.2. en la caracterización del metal base en lineamiento con la norma ASTM, sin embargo, para caracterizar las juntas soldadas se toma como referencia el código AWS D1.1.

2.5.1.1. Probetas

La AWS presenta requerimientos dimensionales mínimos para las probetas a ensayarse. Se muestra en la figura 2.15. la geometría de las probetas requeridas.

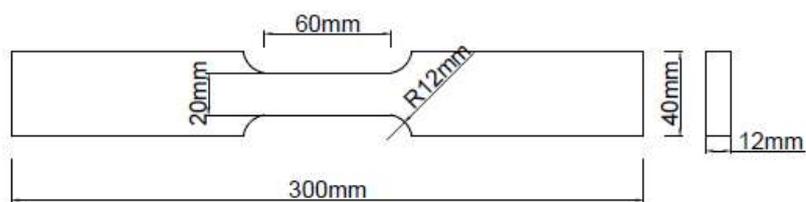


Figura 2.15. Dimensiones de las probetas para ensayo de tracción de sección reducida según la AWS.

(Fuente: Propia)

El maquinado de la zona de sección reducida es obligatorio para la obtención de caras paralelas, la figura 2.16 muestra el proceso de maquinado de una probeta. Previo al proceso de maquinado se marca la zona del cordón de soldadura para posterior análisis.



Figura 2.16. Maquinado de probeta para ensayo de tracción.

(Fuente: Propia)

2.5.2. Ensayo de doblado

El ensayo de doblado permite obtener información de la ductilidad de los materiales mediante la evaluación de la capacidad de resistirse al desgarramiento o a otras irregularidades presentes durante el proceso de doblado. El ensayo permite detectar problemas de soldadura como fusión incompleta, fisuramiento, delaminación, macro discontinuidades [29].

Una vez que se dobla las probetas se debe buscar evidencia de fisuras o irregularidades en la superficie convexa de la probeta, que serán cotejadas con los requerimientos de las normas o códigos aplicados, para determinar si el material aprueba el ensayo [30].

2.5.2.1. Probetas

La figura 2.17. presenta las dimensiones de las probetas según el código AWS, cuyo requerimiento principal es la formación de superficies paralelas en la probeta mediante maquinado. Es también necesario que la superficie que será sometida a tracción (convexa) presente buena calidad para la observación de irregularidades, esto se logra con un afinado mediante disco de polifán.

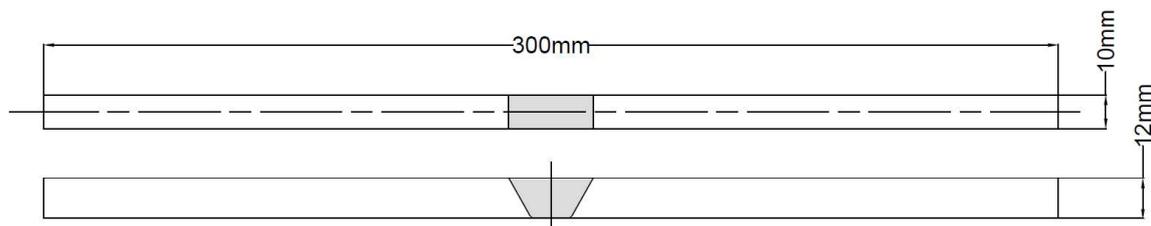


Figura 2.17. Dimensiones de probetas para ensayo de doblado.

(Fuente: Propia)

2.5.2.1. Equipos

El ensayo se lleva a cabo en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional mediante el uso de una prensa hidráulica diseñada para el proceso de doblado, cuyas características se describen en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Descripción del equipo de doblado.

| Características de la máquina dobladora | |
|---|----------|
| Fabricante | --- |
| Capacidad | 2000 psi |
| RPM del motor | 1720 |
| Potencia | 2 HP |

(Fuente: Propia)

2.5.2.2. Procedimiento

El proceso de doblado consiste únicamente en el posicionamiento de la probeta en los dos apoyos con la cara pulida hacia abajo y seguidamente se inicia el doblado. El proceso finaliza cuando la probeta se flexione por completo o se fracture.

2.5.3. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se describe en la sección 2.2.4. para determinar la dureza del metal base, sus principios y procesos son los mismo que se aplicarán a las probetas de juntas soldadas para correlacionar las zonas generadas por la soldadura con su dureza.

2.5.4. Radiografía Industrial

El ensayo radiográfico se realiza en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional con la colaboración de especialistas.

El ensayo radiográfico es un ensayo no destructivo para inspección de materiales y que permite la identificación de defectos gracias a la capacidad de la radiación electromagnética de atravesar los materiales mediante el uso de radiación de onda corta, en este caso Rayos X [31].

Se muestra en la figura 2.18 un esquema del funcionamiento básico del proceso de generación de una imagen radiográfica, donde la radiación emitida por la fuente atraviesa un objeto que presenta una absorción de la radiación distinta en las zonas de distinto espesor o de discontinuidades, finalmente la intensidad con que la radiación atraviesa el material se refleja en las distintas intensidades del color en la película radiográfica.

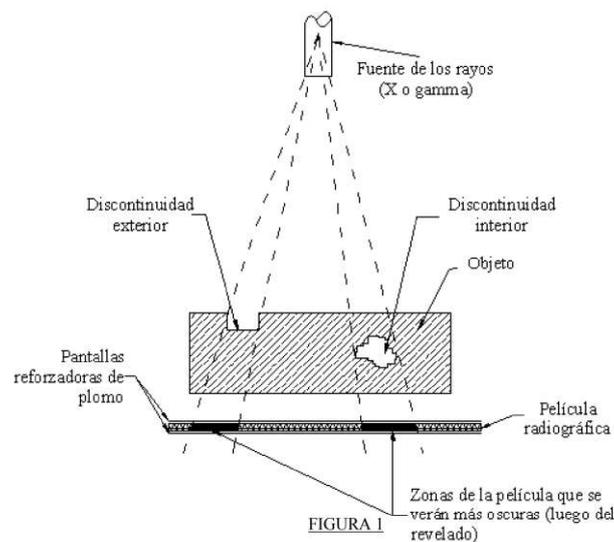


Figura 2.18. Funcionamiento del ensayo radiográfico.

(Fuente: [32])

2.5.4.1. Equipo

El Laboratorio de Ensayos No Destructivos tiene la capacidad y autorización para la realización de ensayos radiográficos dentro de un área controlada para reducir al mínimo la contaminación con radiación ionizante a los técnicos. Cuenta con una fuente de rayos x contenida dentro de un bunker de concreto que se describe en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Características del equipo radiográfico

| Características del equipo radiográfico | Descripción |
|---|--------------------------------|
| Fabricante | Balteau |
| Modelo | Baltographe BF 200/10 |
| Alimentación de la red | 10 A - 50 Hz - 220 V - 2500 VA |
| Alto voltaje mínimo útil | 40 kV |
| Alto voltaje máximo útil | 220 kV reales a 10 mA |
| Fuente | 3,2 x 3,2 mm |
| Ángulo de haz | 40° |

(Fuente: [33])

El equipo es controlado de manera manual para mantener los niveles adecuados de corriente durante el proceso. Se muestra el equipo en la figura 2.19.



Figura 2.19. Equipo de control de la fuente de rayos X.

(Fuente: Propia)

2.5.4.2. Probetas y materiales

El proceso requiere de la utilización de una película radiográfica sensible a los cambios de intensidad de la radiación X, en este estudio se utilizan 2 películas Structurix D7 por cada probeta. Las dimensiones de la película son: 70 [mm] x 250 [mm].

Las probetas para realización de ensayos radiográfico mantienen las dimensiones obtenidas en el proceso de soldadura, es decir, no se extraen probetas antes del presente ensayo. La longitud del cordón vuelve necesaria la irradiación al material en dos etapas como se muestra en la figura 2.20, donde se observa la disposición de las películas R1 y R2, una a continuación de la otra.

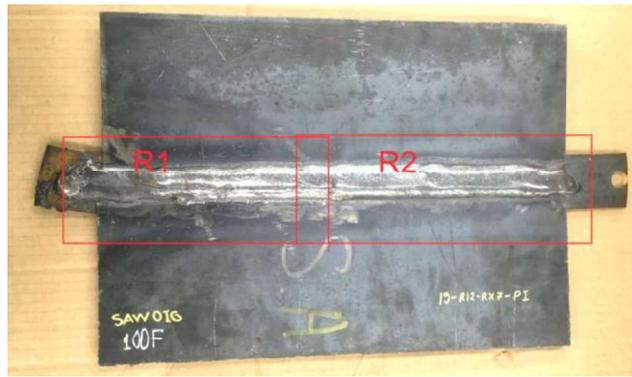


Figura 2.20. Disposición de películas radiográficas.

(Fuente: Propia)

2.5.4.3. Procedimiento

Para la obtención de imágenes radiográficas se requiere de un proceso cuidadoso de elección de parámetros, que se describen de la siguiente manera:

- Cálculo del espesor promedio del cordón de soldadura: Mediante el uso de una galga de soldadura se toman 6 medidas de alturas, para la obtención de un solo valor promedio
- Cálculo del tiempo del diagrama de exposición: Se determina mediante el diagrama de tiempo de exposición que muestra en la figura 2.21, donde se observa la correlación de espesor promedio previamente calculado de 18 mm y tiempo teórico de 5 minutos a 160 kV.

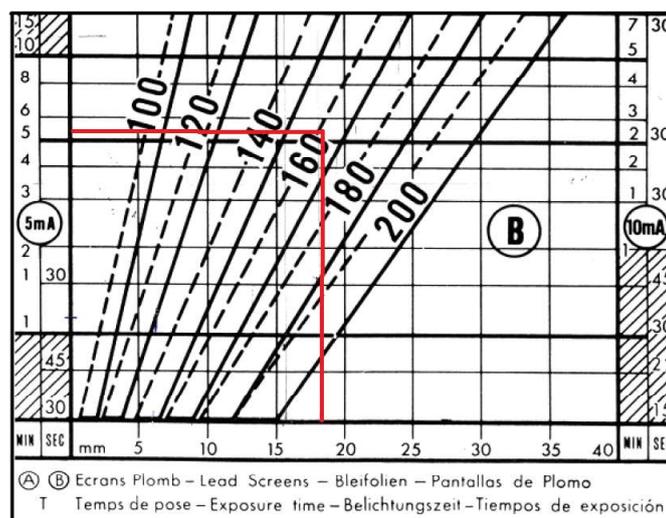


Figura 2.21. Diagrama de tiempo de exposición vs. Espesor del material

(Fuente: [34])

Los valores mostrados son teóricos y deben ser ajustados a las condiciones de funcionamiento del equipo (años de servicio, capacidad del sistema de enfriamiento), por lo tanto y de manera experimental se determinan los siguientes valores promedio:

Potencia: 160 kV

Corriente: 5 mA

Tiempo de exposición tabulado: 2 minutos con 30 segundos. El tiempo mostrado se determina en base al periodo funcionamiento máximo del equipo, pero se fundamenta en el obtenido con la ecuación 2.1.

Cálculo del tiempo de exposición con los factores corrección según la ecuación:

$$t_{exp} = t_c \cdot f_n \cdot f_p \cdot f_D \cdot f_v$$

Ecuación 2.1 Modelo para cálculo del tiempo de exposición

(Fuente: [34])

Donde:

- t_{exp} : tiempo de exposición
- t_c : tiempo del diagrama de exposición
- f_n : factor de corrección por densidad
- f_p : factor de corrección por película
- f_D : factor de corrección por distancia
- f_v : factor de corrección por varios (mA, kV, material, técnica, etc.)

La distancia mínima determinada es de 50 centímetros.

- Selección del Indicador de Calidad de Imagen (ICI): Se realiza en función del espesor radiográfico, cuyos valores se hallan tabulados en la norma ASTM [34].
- Recaldeo del equipo: Una vez definidos los parámetros del ensayo radiográfico es necesario preparar el equipo con los valores corriente y voltaje necesario en caso de no haber sido utilizado en la última hora previa al ensayo.
- Proceso de revelado: Es proceso de revelado se realiza en el Cuarto Oscuro de la Escuela Politécnica Nacional, siguiendo el siguiente proceso: (1) Baño de revelado, (2) baño de parada, (3) baño de fijado, (4) lavado final, que se realiza en tiempo medido en minutos de 5, 1, 10 y 1, respectivamente [34].

2.5.5. Tintas penetrantes

Es una técnica de inspección superficial que permite detectar e identificar discontinuidades en el material analizado mediante la aplicación de líquidos con características especiales

de mojabilidad, tensión superficial y viscosidad. El líquido aplicado deberá presentar una alta mojabilidad, lo que traduce en que esté se extenderá continuamente tendiendo a formar una capa molecular [35].

2.5.5.1. Materiales

Para llevar a cabo la inspección mediante tintas penetrantes es necesario contar con los siguientes elementos:

- Solvente comercial (thinner)
- Franelas
- Equipo de protección personal: Guantes y mascarilla con filtro orgánico
- Desengrasante en spray Met-L-Chek E-59A
- Tinta penetrante lavable con agua (Tipo: Tinta visible de color rojo) Met-L-Chek VP-30
- Agua
- Revelador Met-L-Chek D-70

La figura 2.19. muestra la combinación de penetrante y revelador utilizado en el proceso de inspección.



Figura 2.19. Tinta penetrante (izq) y revelador (der).

(Fuente: Propia)

2.5.5.2. Procedimiento

El proceso de aplicación de la técnica sigue los pasos descritos a continuación:

- Limpieza inicial con el uso de solvente para la eliminación de grasas y contaminantes adheridos durante el transporte, manipulación y almacenaje de las probetas soldadas.
- Limpieza profunda con desengrasante en toda la zona de soldadura.
- Aplicación de la tinta penetrante mediante aspersion, se realizarán los pases necesarios hasta cubrir adecuadamente todo el cordón de soldadura.
- Espera de 5 minutos para completa penetración de la tinta.

- Remoción de la tinta penetrante con franelas humedecidas en agua.
- Aplicación del revelador, se realizarán los pases necesarios para cubrir toda la zona del cordón de soldadura y alrededores.
- Espera de 5 minutos hasta el secado completo del revelador.
- Registro de resultados e inspección en busca de indicaciones de defectos en la junta soldada.
- Limpieza final de la probeta con desengrasante y solvente comercial.
- Aplicación de alcohol para detener posibles procesos de corrosión.

2.5.6. Ensayo metalográfico

El análisis metalográfico es indispensable para determinar el tipo de grano generado por la soldadura y se lo describe en la sección 2.2.3. para el análisis metalográfico del metal base, es decir que las probetas y procedimiento son los mismos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo incluye los resultados de los ensayos realizados tanto al material base como a las juntas soldadas con la variación de contenido de ferrosilicio. Los ensayos se han realizado bajo los lineamientos del código AWS D1.1 y pretenden describir de manera experimental los fenómenos que se generan en las propiedades mecánicas y en la microestructura de las juntas soldadas. Cabe recordar que la referencia de estudio es la soldadura realizada sin adición de ferrosilicio.

Los resultados mostrados se analizan en busca de señales de mejora o decremento de la soldabilidad del material.

3.1. Resultados

Los resultados de los ensayos sobre el material base, así como los de las juntas soldadas se presentan tabulados y/o graficados para su posterior interpretación y análisis. Los ensayos realizados se han descrito por completo en la sección 2 del presente documento.

3.1.1. Material base

Los resultados de análisis al material base permiten determinar si este cumple los requerimientos de composición química y de propiedades mecánicas de la norma ASTM A588 y establece valores referenciales para el análisis de los resultados de las juntas soldadas.

3.1.1.1. Composición química del metal base

Para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos del presente estudio es necesario evaluar la composición química del metal base con respecto a los requerimientos químicos de la norma ASTM A588, dicho análisis se realizó en el Laboratorio de Fundición. Los resultados se observan en la tabla 3.1. Se adjunta el informe en el ANEXO II.

Tabla 3.1. Resultados de composición química del metal base

| Análisis de composición química | |
|---------------------------------|-----------|
| Elemento | Valor [%] |
| Carbono [C] | 0,15 |
| Silicio [Si] | 0,155 |
| Manganeso [Mn] | 1,227 |
| Fósforo [P] | 0,0063 |
| Cromo [Cr] | 0,34 |
| Níquel [Ni] | 0,0099 |

Continuación de la tabla 3.1.

| | |
|----------------|---------|
| Cobre [Cu] | 0,0044 |
| Aluminio [Al] | 0,016 |
| Niobio [Nb] | 0,0059 |
| Hierro [Fe] | 98,08 |
| Azufre [S] | <0,0030 |
| Molibdeno [Mo] | <0,0050 |
| Cobalto [Co] | 0,0061 |
| Titanio [Ti] | <0,0020 |
| Vanadio [V] | <0,0030 |
| Wolframio [W] | <0,02 |
| Boro [B] | 0,0016 |
| Estaño [Sn] | <0,0020 |
| Total | 99,9 |

3.1.1.2. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción realizado sobre el material base de especificación ASTM A588 se realiza a dos probetas construidas bajo requerimientos de la norma ASTM E8 y presenta los resultados de la tabla 3.2. Se adjunta el informe en el ANEXO III.

Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción del material base

| Id | Ancho promedio | Espesor promedio | Límite de fluencia | | Resistencia a la tracción | | % Elongación en 50 mm |
|-----|----------------|------------------|--------------------|-------|---------------------------|-------|-----------------------|
| | mm | mm | ksi | MPa | ksi | MPa | |
| MB1 | 24,99 | 12,08 | 54,8 | 377,5 | 78,4 | 540,7 | 36,3 |
| MB2 | 25,07 | 12,13 | 54,1 | 373,2 | 76,6 | 528,2 | 36,5 |

Los resultados presentados indican que el material base cumple con los requerimientos de tracción que describen una resistencia a la tracción mínima de 485 MPa y un punto de fluencia de 345 MPa, estos valores se observan en la sección 1.4.

Se presenta en la figura 3.1 y figura 3.2 la probeta MB1 traccionada y la superficie de fractura de la probeta, respectivamente.



Figura 3.1. Probeta traccionada de material base.

Se observa en la figura 3.1 la zona de estricción donde se genera la fractura del material, esta condición se observa en materiales dúctiles, mientras que en la figura 3.2 se evidencia la fractura tipo copa y cono, en el tramo izquierdo y derecho de la probeta.



Figura 3.2. Superficie de fractura de la probeta MB1.

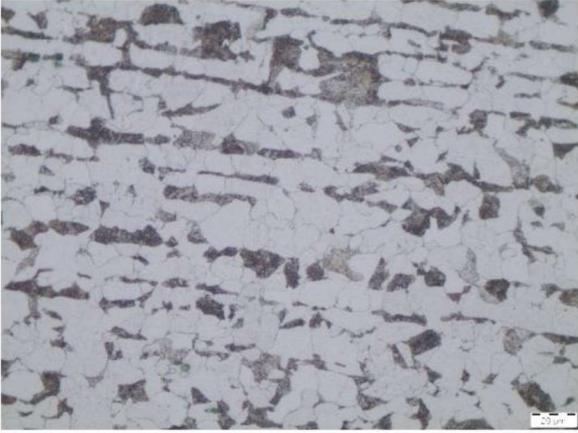
3.1.1.3. Análisis metalográfico

El análisis metalográfico del material base permite observar el tipo de microestructura presente en el material como resultado de método de fabricación. Las imágenes macrográficas del material base se muestran en la tabla 3.3 con su respectiva descripción. Se observa en la tabla 3.3 la microestructura ferrítico-perlítica de grano fino que permite obtener buenas propiedades mecánicas en el acero A588. En la sección 1 del presente estudio se menciona que el material base utilizado es un acero de amplio uso en la construcción de estructuras y por tanto su costo debe ser reducido, esto se logra entre diversas causas por el método de fabricación laminado en caliente. La fuerte influencia del método de fabricación mencionado se evidencia en la disposición de las fases microestructurales formadas, como se muestra en la tercera imagen de la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Macrográficas y micrográficas del metal base.

| Id. | Aumento | Ataque | Descripción | Imagen |
|-----|---------|--------|--|--------|
| MB | 100x | No | Presencia de inclusiones no metálicas. | |

Continuación de la tabla 3.3.

| | | | | |
|----|------|--------------|--|---|
| MB | 100x | Nital al 10% | Matriz de ferrita con presencia de perlita. Se observa la dirección de laminado |  |
| MB | 500x | Nital al 10% | Presencia de ferrita (blanca) con presencia de gran cantidad de perlita (negra). Disposición de granos característica de acero laminado en caliente. |  |

La estructura observada es característica de los aceros HSLA y denota la fuerte influencia de la dirección de laminado en la disposición de los granos. La microestructura formada está constituida por ferrita y perlita.

3.1.1.4. Ensayo de dureza

Los resultados de las muestras de dureza se presentan en la tabla 3.4. con su respectivo promedio en escala Rockwell B.

Tabla 3.4. Resultados de dureza del material base.

| Ensayo de dureza | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|----|----------|
| Número de muestra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Promedio |
| Dureza HRB | 79 | 80 | 80 | 83 | 81 | 80,6 |

3.1.2. Ensayos en la junta soldada

Los resultados mostrados pertenecen a los ensayos realizados al cordón de soldadura en las cuatro composiciones de fundente-ferrosilicio.

3.1.2.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción a las probetas de juntas soldadas se realiza a un total de 8 probetas, 2 para cada composición. Según la nomenclatura de la tabla 2.6. en la sección 2.3. Los resultados se presentan a continuación en la tabla 3.5. Todas las probetas superan la resistencia a la tracción del metal base. Se adjunta el informe en el ANEXO III

Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción a las juntas soldadas.

| Identificación | Carga máxima registrada | | Resistencia a la tracción | | Observación | Calificación |
|----------------|-------------------------|--------|---------------------------|-------|-------------|--------------|
| | lbf | N | ksi | MPa | | |
| P1 | 29946 | 133206 | 78,9 | 543,8 | FMB | Aprobado |
| | 30082 | 133810 | 74 | 510,4 | FMB | Aprobado |
| P2 | 29828 | 132683 | 79,4 | 547,3 | FMB | Aprobado |
| | 29260 | 130156 | 76,6 | 528,2 | FMB | Aprobado |
| P3 | 29335 | 130489 | 75,7 | 522,1 | FMB | Aprobado |
| | 30105 | 133912 | 77,3 | 532,7 | FMB | Aprobado |
| P4 | 28174 | 125325 | 76,1 | 525 | FMB | Aprobado |
| | 30820 | 137096 | 76,3 | 526,2 | FMB | Aprobado |

*FMB: Falla en metal base

Los datos de resistencia a la tracción promedio para cada junta se presentan en la tabla 3.6, junto a un cálculo de variación porcentual respecto a resistencia de P1 (soldadura sin ferrosilicio).

Tabla 3.6. Valores promedio de resistencia a la tracción

| Identificación | Contenido de silicio | Resistencia a la tracción [MPa] | Variación porcentual respecto a P1 |
|----------------|----------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| P1 | 0% | 527,1 | ... |
| P2 | 1% | 537,75 | 2,0% |
| P3 | 2,50% | 527,4 | 0,1% |
| P4 | 5% | 525,6 | -0,3% |

Los datos presentados en la tabla 3.6 se presentan graficados en la figura 3.2 que permite asimilar de mejor manera la información tabulada y puede mostrar una tendencia en el comportamiento mecánico de la junta soldada. Los datos reflejan un incremento de la resistencia a la tracción de la junta soldada P2, esta mejora es del 2% de la resistencia de una soldadura sin aleante. Las composiciones con contenido de ferrosilicio P3 y P4, no presentan una variación considerable de la resistencia a la tracción, ya que son menores al 1%.

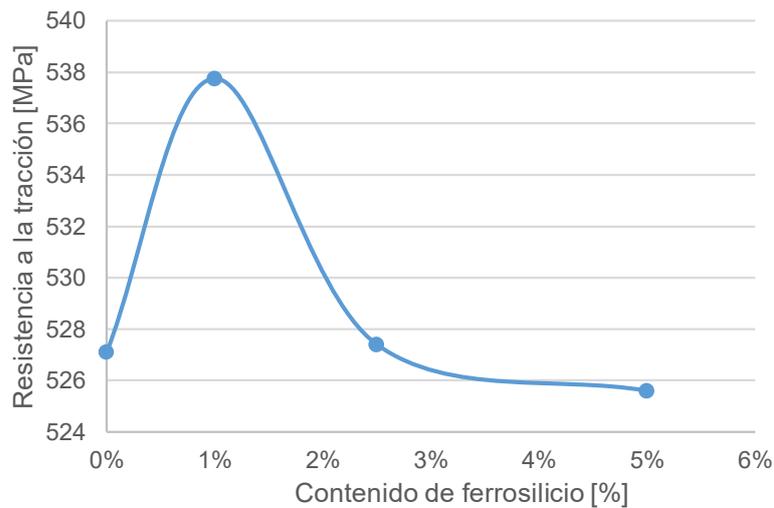


Figura 3.3. Gráfico de variación de la resistencia a la tracción en función del contenido de ferrosilicio

3.1.2.2. Ensayo de doblado lateral

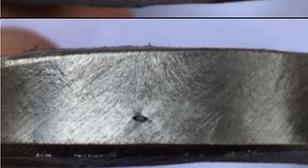
El ensayo de doblado se realiza a 16 probetas en total, 4 para cada composición como se menciona en el código AWS D1.1 y también se califica respecto a los criterios de aceptación. Las probetas en conformidad dimensional con el código se muestran en la figura 3.4, previo al ensayo.



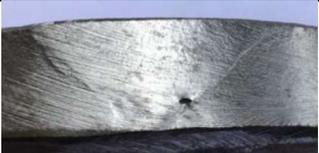
Figura 3.4. Probetas para ensayo de doblado lateral.

La tabla 3.7. muestra los resultados del ensayo de doblado a las probetas soldadas, y se describe si califican bajo los requerimientos del código AWS D1.1 en función del tamaño máximo de discontinuidades de 3 mm. Cabe mencionar que se mantiene la identificación de las probetas en función del contenido de silicio en el fundente: P1 (0% de ferrosilicio), P2 (1% de ferrosilicio), P3 (2,5% de ferrosilicio) y P4 (5% de ferrosilicio). Se ensayan 4 probetas de cada composición.

Tabla 3.7. Resultados de ensayo de doblado lateral con sus respectivas imágenes.

| Identificación | Observaciones | Calificación | Imagen |
|----------------|------------------------------------|--------------|---|
| P1-A | Discontinuidad de 0,5 mm | Aprobado |  |
| P1-B | No presenta | Aprobado |  |
| P1-C | Discontinuidad de 0,4 mm | Aprobado |  |
| P1-D | No presenta | Aprobado |  |
| P2-A | Discontinuidad de 3 mm y de 0,2 mm | Aprobado |  |
| P2-B | No presenta | Aprobado |  |
| P2-C | Discontinuidad de 3,5 mm y 0,2 mm | Rechazado |  |
| P2-D | Discontinuidad de 1,5 mm | Aprobado |  |
| P3-A | Discontinuidad de 0,4 mm | Aprobado |  |
| P3-B | Discontinuidad de 1.2 mm | Aprobado |  |
| P3-C | No presenta | Aprobado |  |

Continuación de la tabla 3.7.

| | | | |
|------|--------------------------|----------|--|
| P3-D | No presenta | Aprobado |  |
| P4-A | No presenta | Aprobado |  |
| P4-B | Discontinuidad de 1 mm | Aprobado |  |
| P4-C | Discontinuidad de 1 mm | Aprobado |  |
| P4-D | Discontinuidad de 1,4 mm | Aprobado |  |

Los resultados muestran que todas las probetas analizadas se flexionaron satisfactoriamente sin presentar fractura completa. Todos los defectos observados cuidadosamente presentan en común inclusiones de escoria de tamaño no superior a 1,5mm, mismas que son el punto de inicio de fisuramiento de las probetas P2-A y P2-C. Se muestra en la tabla 3.8 la incidencia de defectos en la soldadura y el contenido de ferrosilicio.

Tabla 3.8. Índice de presencia de defectos en el ensayo de doblado.

| Identificación de composición | Contenido de ferrosilicio en el fundente | Cantidad de discontinuidades |
|-------------------------------|--|------------------------------|
| P1 | 0% | 2 |
| P2 | 1% | 3 |
| P3 | 2,5% | 2 |
| P4 | 5% | 3 |

Los resultados del ensayo de doblado reflejan discontinuidades incluso en el proceso de soldadura que no contiene ferrosilicio, al observar la figura 3.5 se evidencia mayor presencia de defectos en las soldaduras con 1% y 5% de ferrosilicio seguido de las muestras con 0% y 2,5% de ferrosilicio en el fundente.

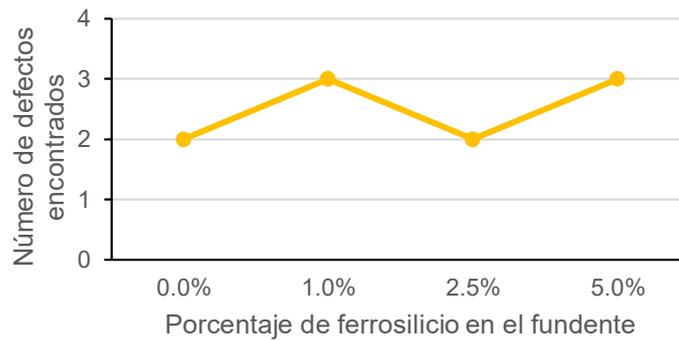


Figura 3.5. Gráfico de incidencia de discontinuidades en las probetas ensayadas por doblado.

Estos resultados revelan que el incremento de ferrosilicio en el fundente no genera crecimiento en la cantidad de defectos en el cordón de soldadura, puesto que se observa escoria en todas las mezclas, sin una variación notable. Se observa también que todos los fisuramientos son causados por inclusiones de escoria.

3.1.2.3. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza permite recopilar información de la dureza de las distintas zonas de la junta soldada, como son el material base, cordón de soldadura y la zona afectada por el calor, estos valores están definidos por el tipo de microestructura formada por efecto de la soldadura.

Para el presente ensayo se utiliza una probeta de cada placa soldada (4 placas en total), para realizar 3 barridos de dureza en dirección horizontal. En el caso de la probeta P2 perteneciente a la mezcla de 1% de ferrosilicio en el fundente se realiza un barrido extra en la zona de refuerzo de la soldadura por disponibilidad de área libre y de ampliación del estudio. Los resultados se muestran en la tabla 3.9, tabla 3.10, tabla 3.11 y tabla 3.12.

La tabla 3.9 muestra los resultados de dureza de la probeta con 0% de ferrosilicio donde los valores más altos se hallan en la zona afectada por el calor.

Tabla 3.9. Resultados de ensayo de dureza para la probeta P1 (0% de ferrosilicio en el fundente).

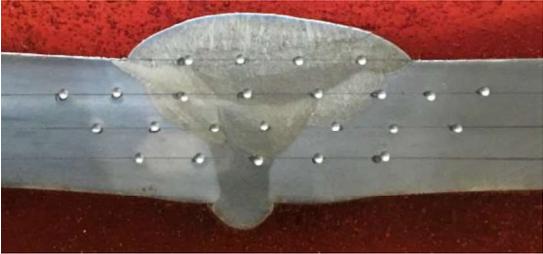
| Posición | Material base | Cordón de soldadura | Zona afectada por el calor | Imagen |
|------------------|---------------|----------------------|----------------------------|--|
| Escala | HRB | HRB | HRB | |
| Barrido superior | 82 79 | 91 79 80 83 | 92 90 | La imagen se observa en la continuación de la tabla 3.9. |

Continuación de la tabla 3.9.

| | | | | |
|--------------------|----|----------|----------------|--|
| Barrido intermedio | 87 | 80 79 | 86 92 88 |  |
| Barrido inferior | 84 | 80 | 86 88 85 | |
| Promedio | 83 | 81,7 | 88,4 | |

La tabla 3.10 muestra los resultados de dureza de la probeta con 1% de ferrosilicio donde los valores más altos se hallan en la zona del cordón de soldadura.

Tabla 3.10. Resultados de ensayo de dureza para la probeta P2 (1% de ferrosilicio en el fundente).

| Posición | Material base | Cordón de soldadura | Zona afectada por el calor | Imagen | | | | |
|------------------|---------------|----------------------|----------------------------|--|-----------------------------|----------|----------------|----------------------|
| | | | Escala | | | | | |
| | | | HRB | | HRB | HRB | | |
| Barrido superior | ... | 89 92 91 92 | ... |  | | | | |
| | | | | | Barrido intermedio superior | 84 82 | 98 88 87 | 88 87 84 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | Barrido inferior | ... | 82 | 85 85 86 85 |
| Promedio | 83 | 90,1 | 85,5 | | | | | |

La tabla 3.11 muestra los resultados de dureza de la probeta con 2,5% de ferrosilicio donde los valores más altos se hallan en la zona del cordón de soldadura.

Tabla 3.11. Resultados de ensayo de dureza para la probeta P3 (2,5% de ferrosilicio en el fundente).

| Posición | Material base | Cordón de soldadura | Zona afectada por el calor | Imagen |
|--------------------|---------------|---------------------|----------------------------|--|
| Escala | HRB | HRB | HRB | |
| Barrido superior | 80 82 | 94 | 91 |  |
| | | 91 | 91 | |
| | | 90 | 93 | |
| | | 97 | | |
| Barrido intermedio | 82 86 | 93 | 87 | |
| | | 98 | 88 90 | |
| Barrido inferior | 82 85 | 91 | 88 | |
| | | | 85 | |
| Promedio | 82,8 | 93,4 | 89,1 | |

La tabla 3.12 muestra los resultados de dureza de la probeta con 5% de ferrosilicio donde los valores más altos se hallan en la zona del cordón de soldadura.

Tabla 3.12. Resultados de ensayo de dureza para la probeta P4 (5% de ferrosilicio en el fundente).

| Posición | Material base | Cordón de soldadura | Zona afectada por el calor | Imagen |
|--------------------|---------------|---------------------|----------------------------|--|
| Escala | HRB | HRB | HRB | |
| Barrido superior | 79 84 | 98 | 84 |  |
| | | 99 | 90 | |
| | | 98 | | |
| Barrido intermedio | 85 85 | 97 | 89 | |
| | | 98 | 88 | |
| Barrido inferior | 81 84 | 88 | 88 | |
| | | | 89 | |
| Promedio | 83 | 96,3 | 88 | |

Se presenta en la tabla 3.13. los datos de valores promedio y desviación estándar de dureza asociados a cada zona del cordón de soldadura para cada probeta.

Tabla 3.13. Durezas y desviación estándar de valores de dureza de cada zona de la soldadura.

| Contenido de silicio en el fundente | Material base | | Cordón de soldadura | | Zona afectada por el calor | |
|-------------------------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| | Dureza HRB | | | | | |
| | Promedio | Desviación estándar | Promedio | Desviación estándar | Promedio | Desviación estándar |
| 0% | 83,0 | 3,4 | 81,7 | 4,3 | 88,4 | 2,7 |
| 1% | 83,0 | 1,0 | 90,1 | 4,1 | 85,5 | 1,2 |
| 2,50% | 82,8 | 2,2 | 93,4 | 3,1 | 89,1 | 2,6 |
| 5% | 83,0 | 2,4 | 96,3 | 4,1 | 88,0 | 2,1 |

En la figura 3.6. se muestra mediante un gráfico de barras, los valores de dureza promedios asociados a las tres principales zonas de la junta soldada que son material base, material aportado y zona afectada por el calor. Se observa entonces:

- La dureza del metal base permanece constante y es coherente con el valor aproximado de dureza del material base de 81HRB presentado en la tabla 3.3. en la presente sección de resultados.
- La dureza del cordón de soldadura incrementa a medida que el contenido de silicio aumenta.
- Los valores de dureza en la zona afectada por el calor se mantienen constantes independientemente de la variación de contenido de silicio.

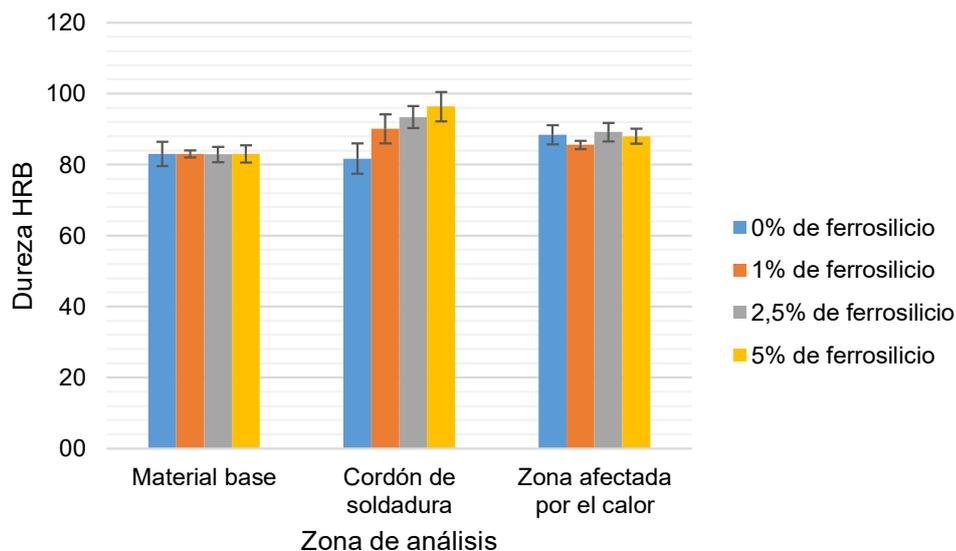


Figura 3.6. Gráfico de dureza en las distintas zonas de la soldadura a medida que incrementa el contenido de silicio.

3.1.2.4. Inspección radiográfica

El ensayo radiográfico es muy importante para la detección de problemas presentes en el cordón que no serían hallados mediante inspección visual o incluso tintas penetrantes. El ensayo realizado incluye la creación de un informe completo con la identificación y cuantificación de los defectos hallados en los cordones de soldadura, se lo puede encontrar en el ANEXO IV.

Se presenta en la tabla 3.14. el tipo de discontinuidad hallada en las juntas soldadas por medio de radiografía industrial.

Tabla 3.14. Tipo de discontinuidades identificadas en los cordones de soldadura.

| Resumen de las discontinuidades encontradas en las juntas soldadas | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|
| Discontinuidad | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Falta de Penetración | ... | ... | ... | ... |
| Fusión Incompleta | ... | ... | X | X |
| Penetración excesiva | ... | X | ... | ... |
| Inclusiones de Escoria | X | X | X | X |
| Salpicadura | ... | ... | ... | ... |
| Porosidad | X | ... | X | ... |
| Nido de poros | ... | ... | X | ... |
| Grietas | ... | ... | ... | ... |
| Mordeduras | ... | ... | ... | ... |
| Escoria Alargada | ... | ... | ... | ... |
| Quemón | ... | ... | ... | ... |

- La presencia de fusión incompleta se denota claramente en la probeta P3 con una longitud de 108 mm
- Se observa que todas las probetas (P1, P2, P3, y P4) muestran inclusiones de escoria dentro del cordón. Una escoria de gran tamaño se detecta en la probeta P3 alcanzando los 73 mm de longitud, se muestra la figura 3.4. la posición de la escoria de gran tamaño.
- Se detecta también falta de fusión en las probetas P3 y P4.
- La presencia de porosidades es muy baja y se pueden contabilizar dos poros en total, uno en cada probeta P1 y P3.
- El nido de poros se presenta en el borde de inicio de la soldadura de la probeta P3, por lo que no tiene relevancia para el estudio metalográfico ni de propiedades mecánicas, se puede observar en la parte derecha de la figura 3.7.

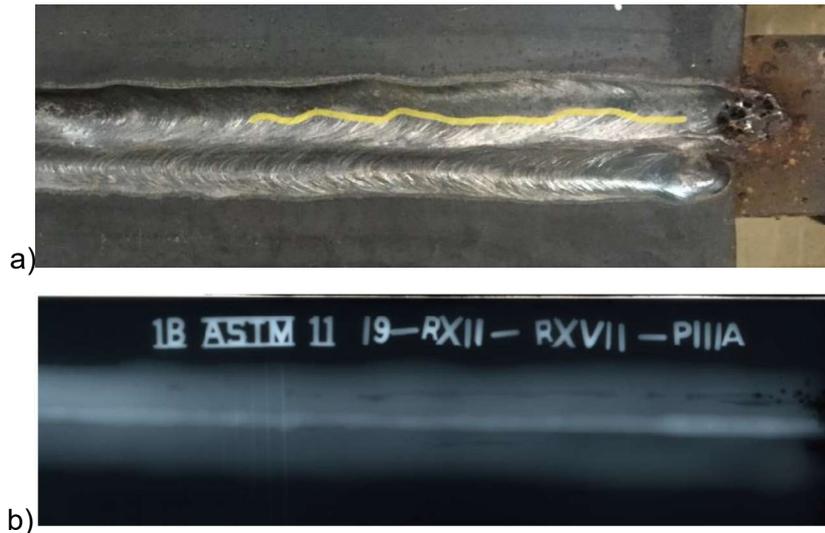


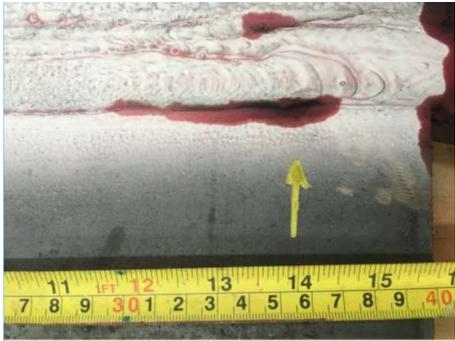
Figura 3.7. Identificación de posiciones de escoria alargada de la probeta P3, a) fotografía de la zona identificada y b) radiografía.

3.1.2.5. Inspección por tintas penetrantes

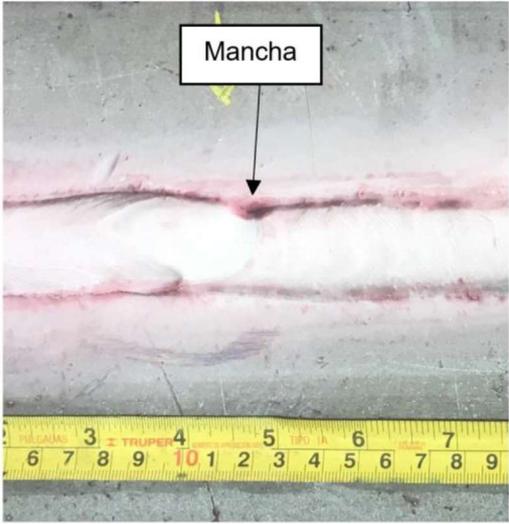
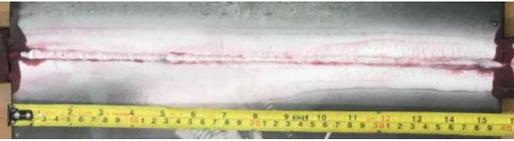
La inspección mediante tintas penetrantes sobre las 4 probetas soldadas muestra resultados positivos en cuanto a la aparición de discontinuidades superficiales, puesto que no hay evidencia de defectos graves en la soldadura. No existen fisuramientos ni poros abiertos a la superficie.

Los resultados se muestran en la tabla 3.15 con las imágenes más relevantes de la cara del cordón y del pase de raíz. El informe generado por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional se puede visualizar en el ANEXO V.

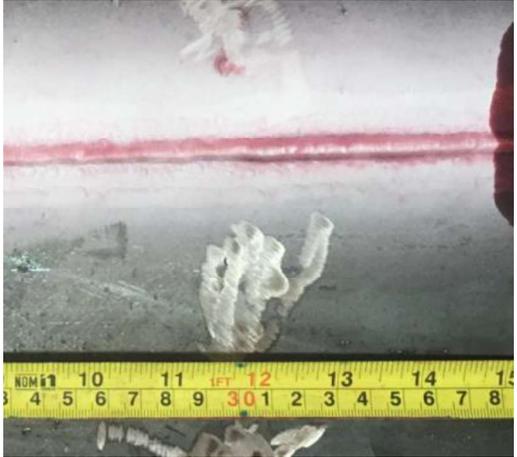
Tabla 3.15. Resultados de la inspección por tintas penetrantes

| Identificación | Imagen | Observaciones importantes |
|----------------|---|--|
| P1 | <p>a)</p>  <p>b)</p>  | <p>a) Mancha de 76 mm de longitud. Causas: Posible solapamiento del cordón de soldadura, por un refuerzo excesivo.</p> <p>b) Mancha alargada en todo el cordón de respaldo Causas: Posible mordedura interna del pase de raíz.</p> |

Continuación de la tabla 3.15.

| | | |
|-----------|---|--|
| <p>P2</p> | <p>a)</p>  <p>b)</p>  | <p>a) Mancha de 15 mm de diámetro Causas: Posible mordedura</p> <p>b) Manchas alargadas a lo largo de todo el pase de raíz. Causa: Posible mordedura interna</p> |
| <p>P3</p> | <p>a)</p>  <p>b)</p>  | <p>a) Mancha alargada de 56 mm de longitud Causa: Posible solapamiento del cordón de soldadura</p> <p>b) Mancha de 20 mm en el pase de raíz Causa: Posible mordedura interna</p> |

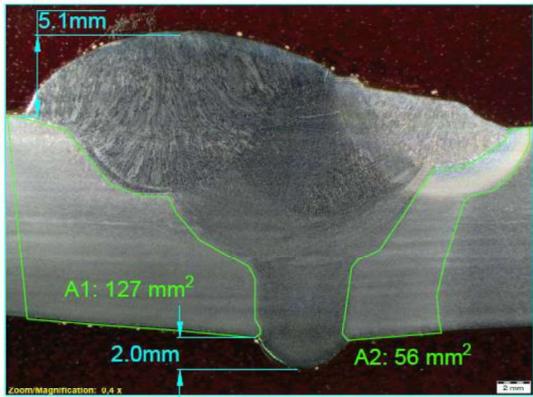
Continuación de la tabla 3.15.

| | | |
|-----------|--|--|
| <p>P4</p> | <p>a)</p>  <p>b)</p>  | <p>a) No hay presencia de indicaciones</p> <p>b) Mancha en los dos lados del pase de raíz.</p> <p>Causa: Posible mordedura interna</p> |
|-----------|--|--|

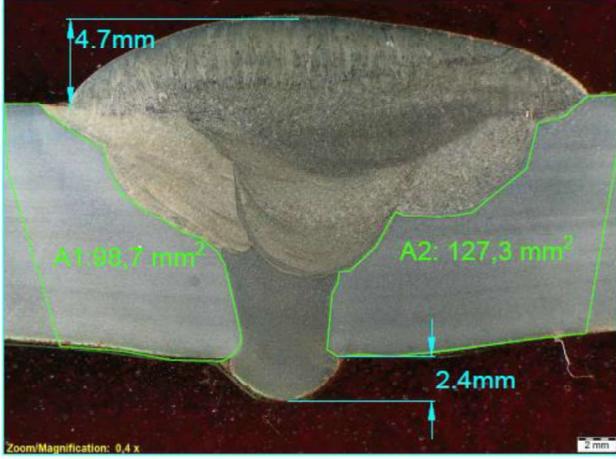
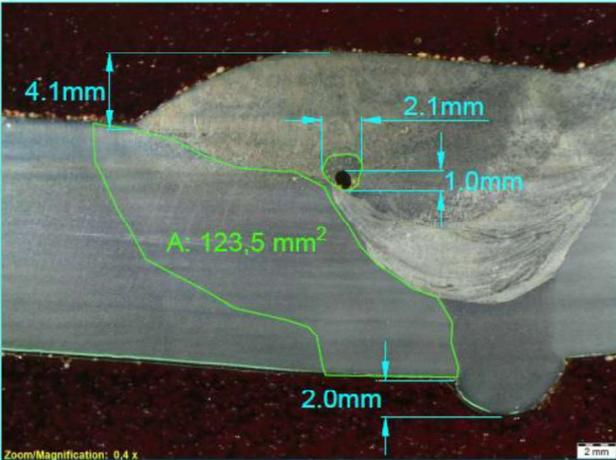
3.1.2.6. Análisis metalográfico

El análisis metalográfico genera información importante de las transformaciones de grano causado por el calor suministrado durante la soldadura y se presentan los resultados en la tabla 3.16.

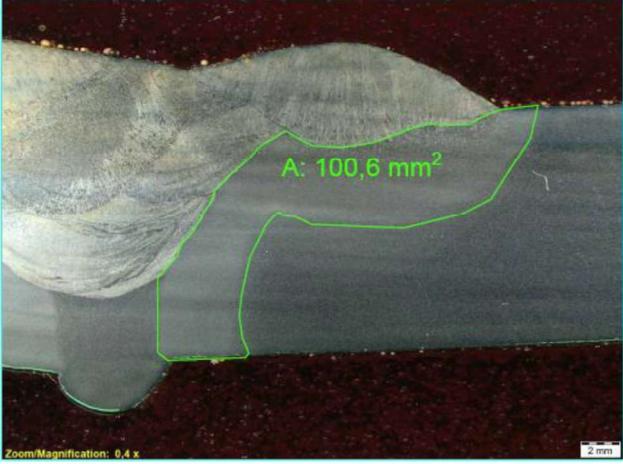
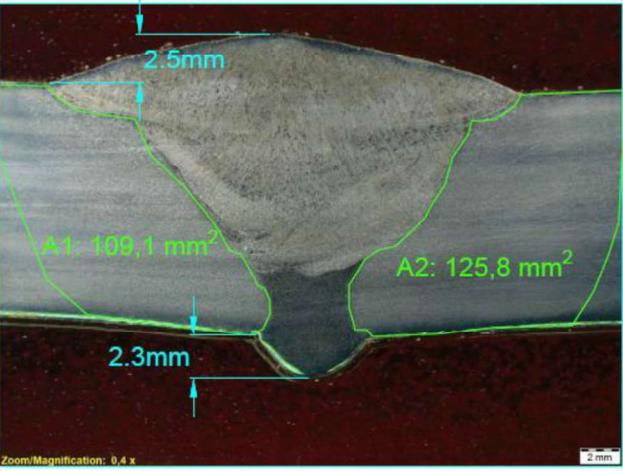
Tabla 3.16. Resultados del análisis macrográfico.

| Identificación | Imagen | Observaciones importantes |
|--------------------------------|---|--|
| <p>P1 (0% de ferrosilicio)</p> |  | <p>Se observa mayor volumen del cordón de soldadura en la zona izquierda, creando una ZAC de más del 200% que su opuesta.</p> <p>Altura del refuerzo: 5,1 mm.</p> <p>Altura de raíz: 2 mm.</p> <p>Área de ZAC total de 182 mm².</p> |

Continuación de la tabla 3.16.

| | | |
|----------------------------------|---|--|
| <p>P2 (1% de ferrosilicio)</p> |  | <p>Se observa mayor cantidad de material en la zona derecha del cordón acompañada de una mayor zona afectada por el calor.</p> <p>Altura del refuerzo: 4,7 mm</p> <p>Altura de la raíz: 2,4 mm.</p> <p>Área de ZAC total de 226 mm².</p> |
| <p>P3 (2,5% de ferrosilicio)</p> | <p>a) Toma de la zona izquierda</p>  | <p>El tamaño de la probeta requiere de dos tomas macrográficas, a) representa la zona izquierda que presenta una inclusión de escoria de 2 mm de diámetro con una porosidad de 1 mm.</p> <p>Se seleccionó una porción de la probeta P3 con defectos observados en radiografías para corroborar su presencia.</p> |

Continuación de la tabla 3.16.

| | | |
|----------------------------------|--|--|
| <p>P3 (2,5% de ferrosilicio)</p> | <p>b) Toma de la zona derecha</p>  | <p>Se observa mayor zona afectada por el calor en la porción izquierda.</p> <p>Altura del refuerzo: 4,1 mm.</p> <p>Altura de la raíz: 2 mm.</p> <p>Área de ZAC total de 224 mm².</p> |
| <p>P4 (5% de ferrosilicio)</p> |  | <p>Se observa una distribución adecuada del cordón de soldadura y de la ZAC.</p> <p>Altura del refuerzo: 2,5 mm.</p> <p>Altura de la raíz: 2,3 mm.</p> <p>Área de ZAC total de 235 mm².</p> |

Se resume en la tabla 3.17 el área total de la zona afectada por el calor en cada una de las probetas analizadas con la identificación de contenido de ferrosilicio en el fundente.

Tabla 3.17. Área total de la zona afectada por el calor.

| Identificación | Contenido de silicio en el fundente | Área de la ZAC |
|----------------|-------------------------------------|---------------------|
| P1 | 0% | 182 mm ² |
| P2 | 1% | 226 mm ² |
| P3 | 2,5% | 224 mm ² |
| P4 | 5% | 235 mm ² |

La figura 3.8 muestra los datos antes mostrados de forma gráfica para su mejor comprensión. Se observa un incremento en el área total de la zona afectada por el calor

en todas las probetas que contienen ferrosilicio, el área máxima se presenta en la probeta con mayor contenido de ferrosilicio y muestra un incremento del área total de ZAC de un 29% respecto a aquella soldada con fundente puro.

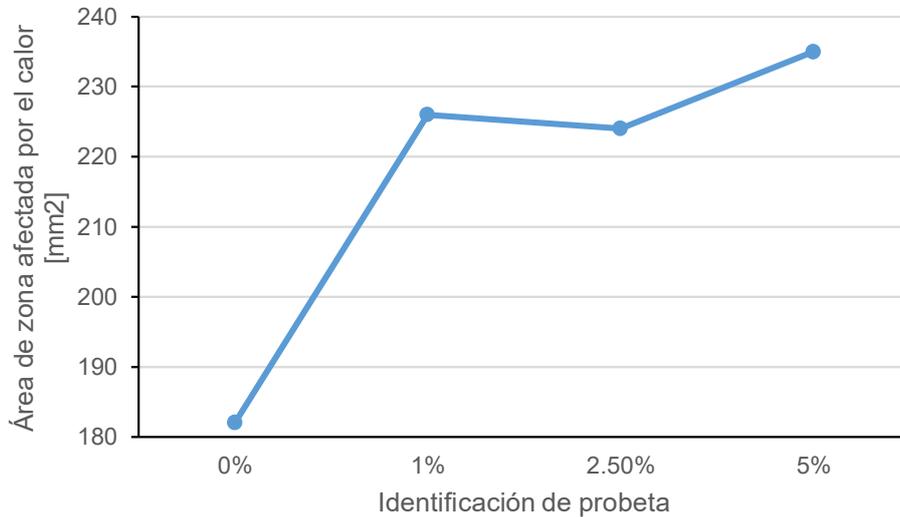


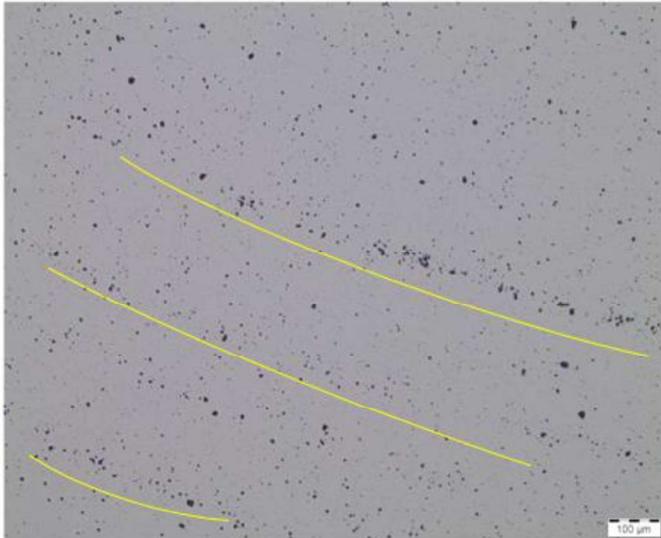
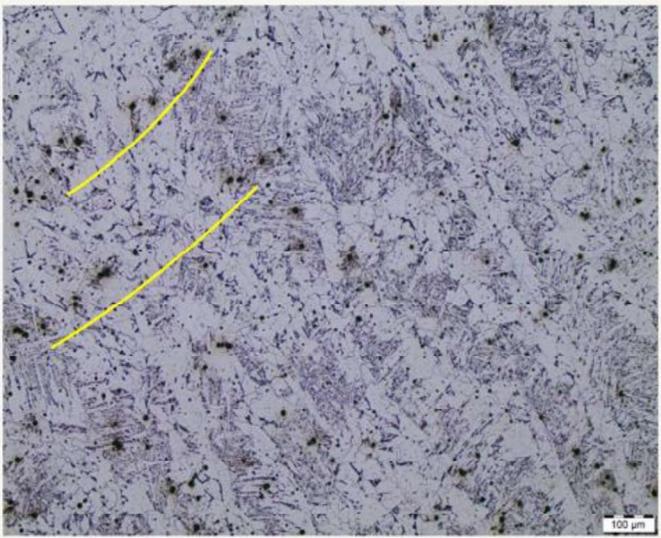
Figura 3.8. Área total de la ZAC en función del contenido de silicio.

3.1.2.7. Resultados del análisis micrográfico.

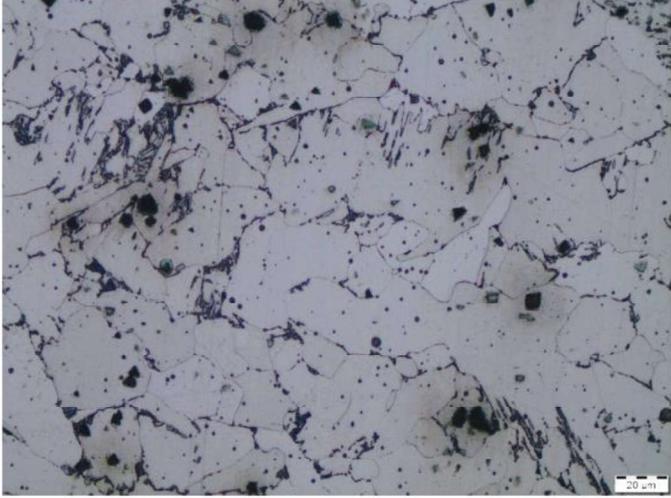
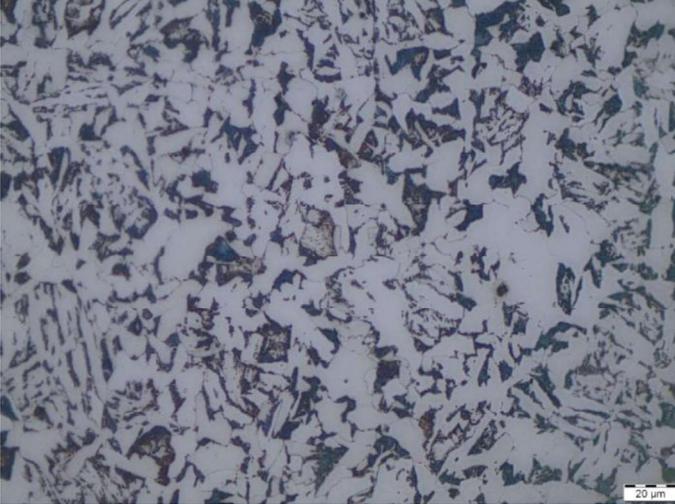
El análisis micrográfico permite correlacionar las propiedades mecánicas mostradas previamente y la estructura generada tras el proceso de soldadura en las diferentes composiciones de mezcla de fundente-ferrosilicio.

Se presenta en la tabla 3.18 el análisis de la microestructura encontrada en las muestras micrográficas con el detalle del tipo de ataque, magnificación y una imagen para la observación de las distintas fases presentes. Es importante recordar la nomenclatura: P1 (0% de ferrosilicio), P2 (1% de ferrosilicio), P3 (2,5% de ferrosilicio) y P4 (5% de ferrosilicio).

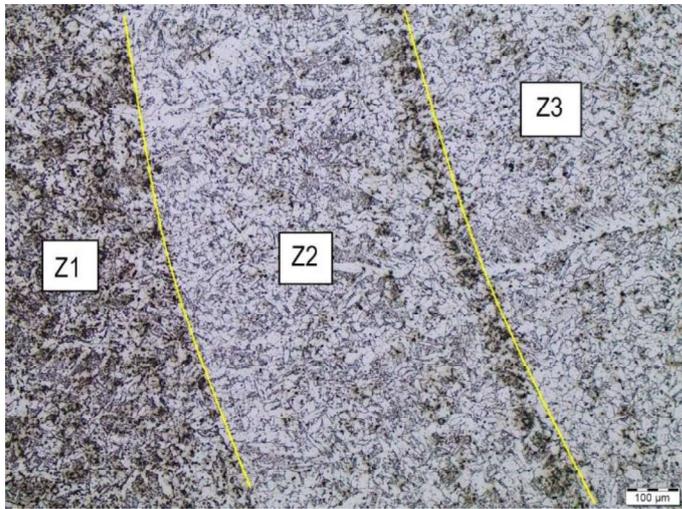
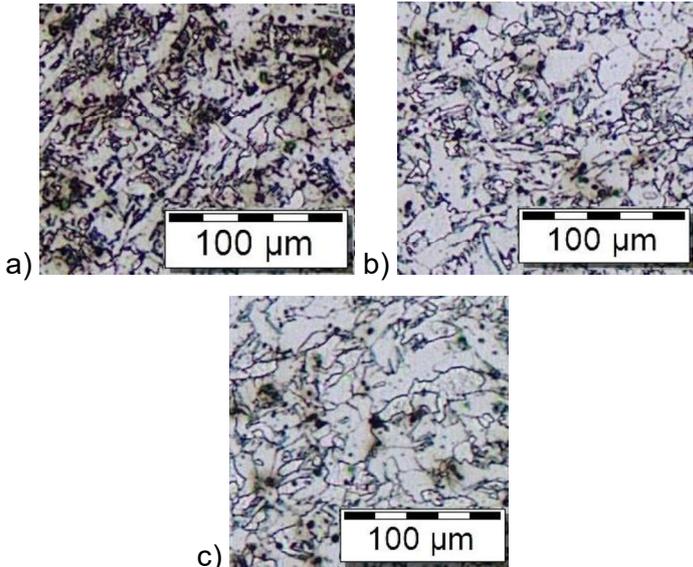
Tabla 3.18. Resultados de análisis micrográfico de las juntas soldadas

| Id. | Ataque | Imagen | Observaciones importantes |
|-----|--------------|--|--|
| P1 | Sin ataque | <p data-bbox="432 389 807 421">Cordón de soldadura a 100x</p>  | <p data-bbox="1155 389 1393 674">Se observan inclusiones no metálicas en disposición de bandas de solutos.</p> |
| P1 | Nital al 10% | <p data-bbox="432 1012 807 1043">Cordón de soldadura a 100x</p>  | <p data-bbox="1155 1012 1393 1547">Matriz ferrítica-perlítica. Se observa cristales de ferrita en crecimiento columnar, con desarrollo ferrita alotrópica y presencia de inclusiones no metálicas.</p> |

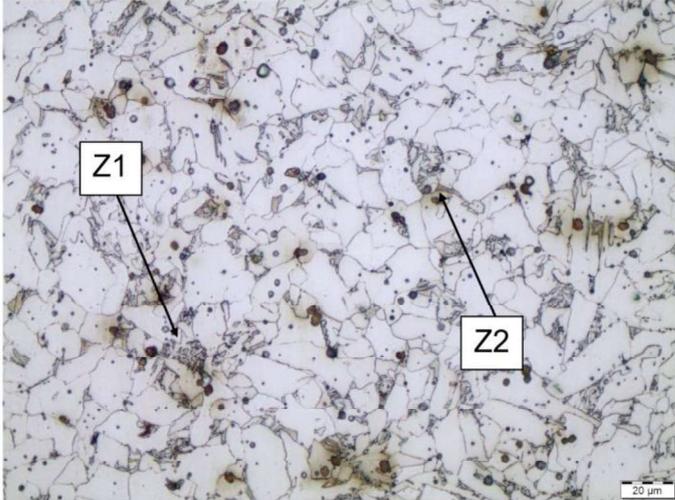
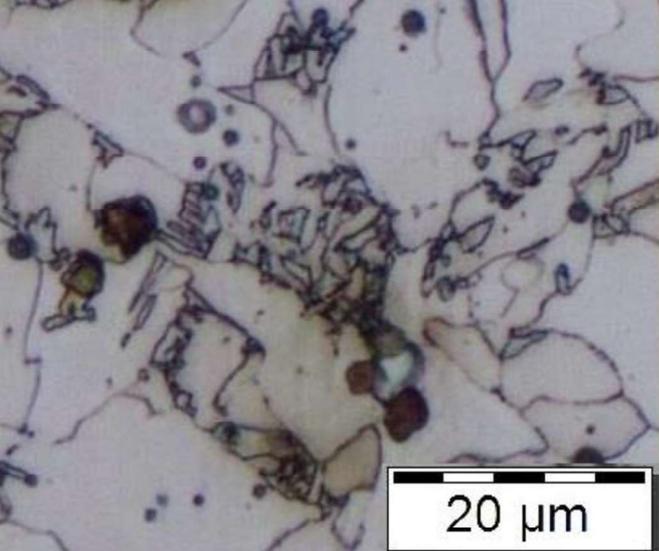
Continuación de la tabla 3.18.

| | | | |
|-----------|---------------------|---|--|
| <p>P1</p> | <p>Nital al 10%</p> | <p>Cordón de soldadura a 500x</p>  | <p>Matriz ferrítica con una cantidad reducida de perlita. La presencia de ferrita de grano equiaxial es baja. Se presentan inclusiones no metálicas.</p> |
| <p>P1</p> | <p>Nital al 10%</p> | <p>Zona afectada por el calor a 100x</p>  | <p>Estructura de grano fino de ferrita-perlita. Se observa la formación de ferrita con segunda fase alineada en la zona cercana a la soldadura.</p> |
| <p>P1</p> | <p>Nital al 10%</p> | <p>Zona afectada por el calor a 500x</p>  | <p>Matriz ferrítica con presencia de perlita. Se observa un refinamiento de grano respecto al material base.</p> |

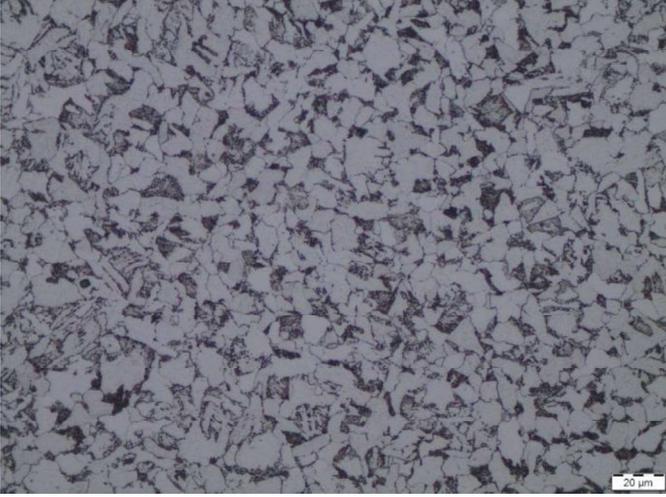
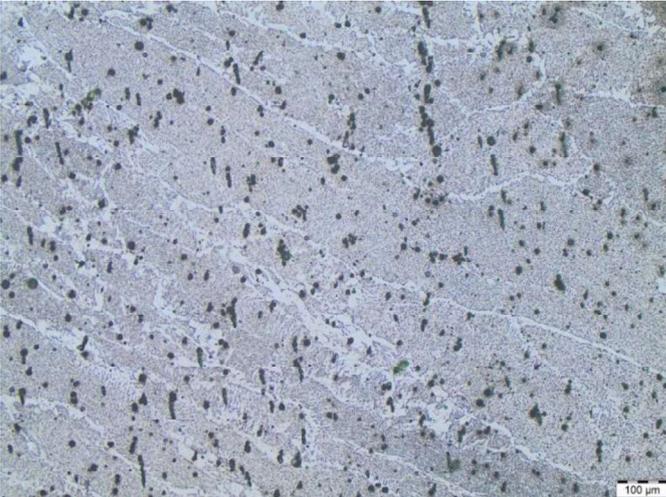
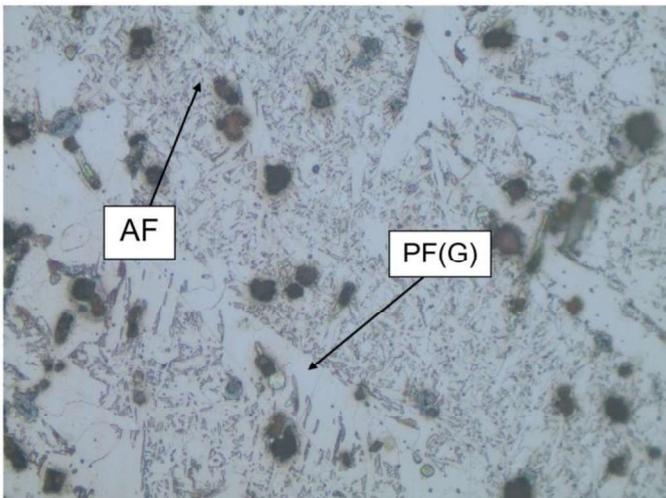
Continuación de la tabla 3.18.

| | | | |
|-----------|---------------------|---|--|
| <p>P2</p> | <p>Nital al 10%</p> | <p>Cordón de soldadura a 100x</p>  | <p>Matriz ferrita-perlita con presencia de formaciones de ferrita alotriomórfica. Presencia de bandas silicio depositados. Z1 y Z2 son zonas recalentadas y se observa un crecimiento de grano entre Z1 y Z2, Z3 ya presenta crecimiento columnar.</p> |
| | | <p>Magnificación de las zonas: a) Z1, b) Z2 y c) Z3 del cordón de soldadura a 100x</p>  | <p>La imagen a) con mayor presencia de inclusiones no metálicas es también aquella con menor formación de granos de ferrita equiaxiales y presenta mayor cantidad de microfases.</p> |

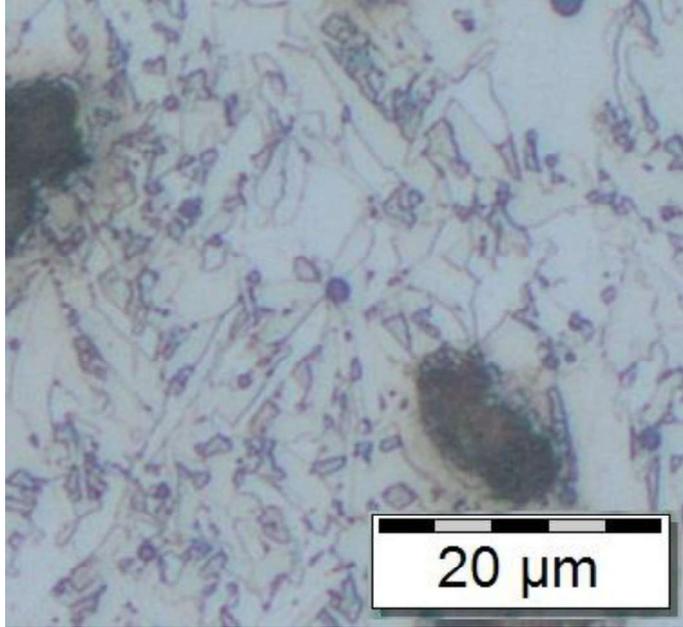
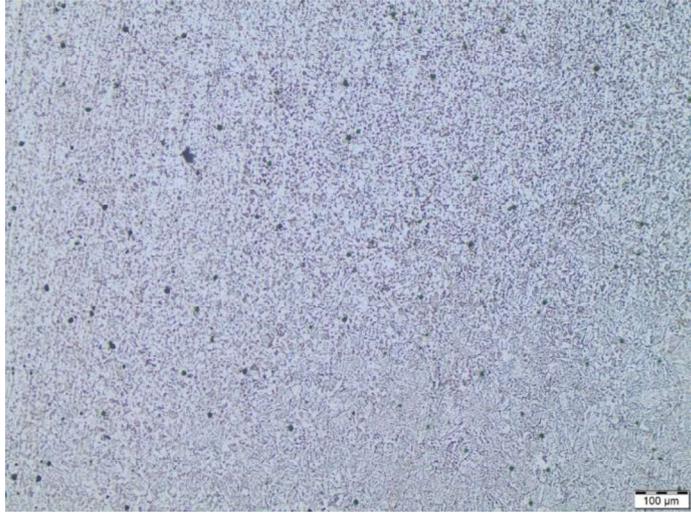
Continuación de la tabla 3.18.

| | | | |
|-----------|---------------------|---|---|
| <p>P2</p> | <p>Nital al 10%</p> | <p>Cordón de soldadura a 500x</p>  | <p>Matriz ferrítica con poca presencia de perlita. Existe formación de granos equiaxiales. Se observa formación de láminas de ferrita en las zonas con mayor presencia de inclusiones marcadas Z1 y Z2.</p> |
| | | <p>Magnificación del área Z1 del cordón de soldadura con escala.</p>  | <p>Se observa desarrollo de ferrita con fases no alineadas.</p> |

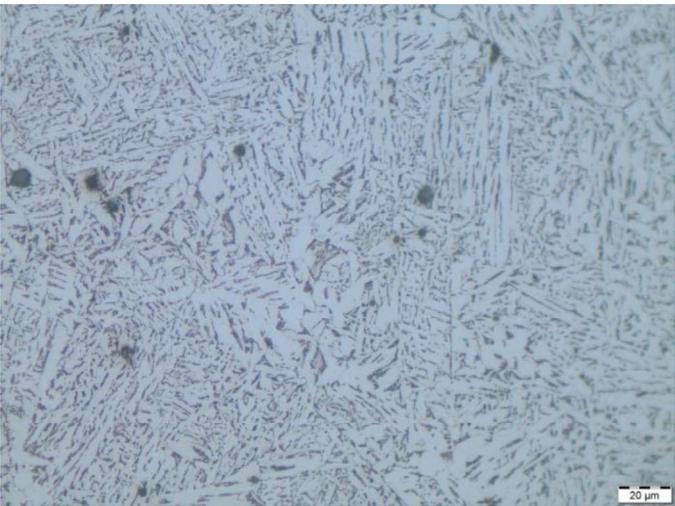
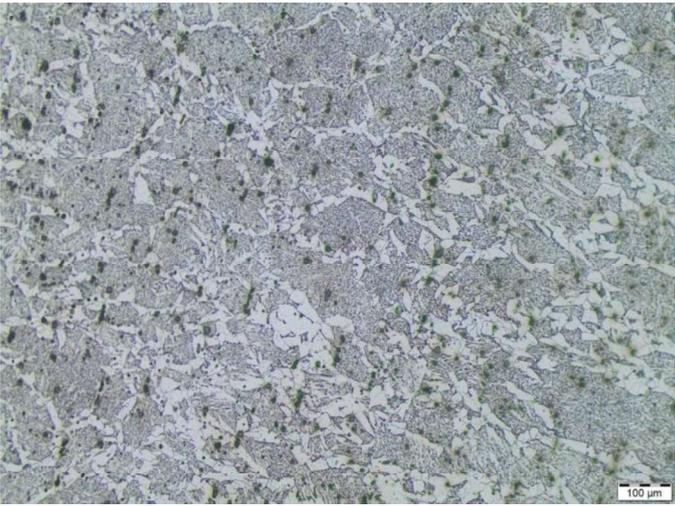
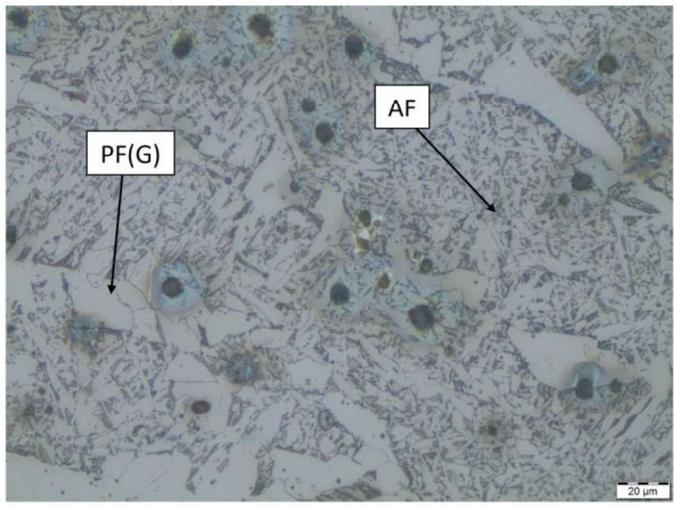
Continuación de la tabla 3.18.

| | | | |
|----|--------------|---|---|
| P2 | Nital al 10% | <p>Zona afectada por el calor a 500x</p>  | <p>Matriz ferrítica con presencia de perlita. Existe gran presencia de ferrita poligonal. Ya no se observa las bandas generadas durante el proceso de laminado.</p> |
| P3 | Nital al 10% | <p>Cordón de soldadura a 100x</p>  | <p>Formación de ferrita alotriomórfica (red clara) de crecimiento columnar. Existe gran cantidad de inclusiones no metálicas.</p> |
| P3 | Nital al 10% | <p>Cordón de soldadura a 500x</p>  | <p>Formación de ferrita y perlita. Se observa presencia de ferrita proeutectoide PF(G) coexistiendo con ferrita acicular AF.</p> |

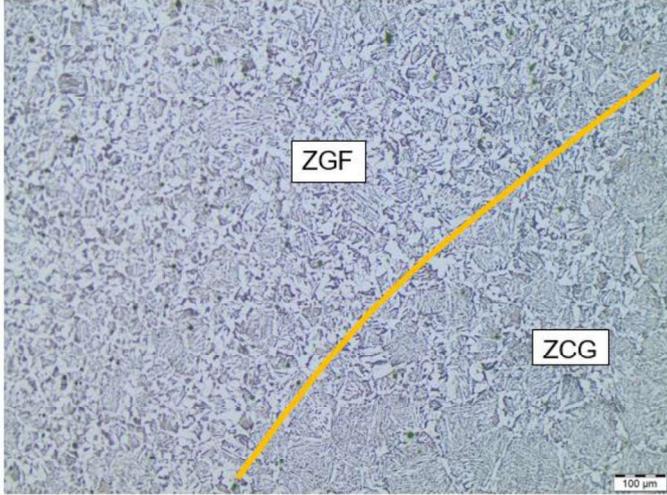
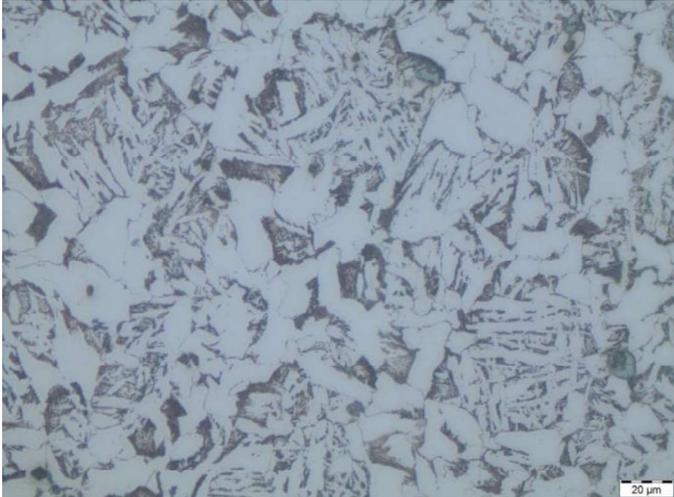
Continuación de la tabla 3.18.

| | | | |
|-----------|---------------------|--|--|
| | | <p>Magnificación de la zona con presencia de ferrita acicular AF</p>  | <p>Ferrita acicular caracterizada por el crecimiento de finas placas de ferrita en direcciones radiales a partir de una inclusión de 1,6 μm.</p> |
| <p>P3</p> | <p>Nital al 10%</p> | <p>Zona afectada por el calor a 100x</p>  | <p>Matriz ferrítica con presencia de perlita. Se observa granos equiaxiales y presencia de inclusiones no metálicas.</p> |

Continuación de la tabla 3.18.

| | | | |
|----|--------------|---|---|
| P3 | Nital al 10% | <p>Zona afectada por el calor a 500x</p>  | <p>Presencia de ferrita de fase alineada con perlita. Se observan inclusiones no metálicas.</p> |
| P4 | Nital al 10% | <p>Cordón de soldadura a 100x</p>  | <p>Formación de ferrita alotriomórfica con perlita. Se observan pequeñas cadenas de inclusiones no metálicas.</p> |
| P4 | Nital al 10% | <p>Cordón de soldadura a 500x</p>  | <p>Formación de ferrita alotriomórfica, ferrita acicular y perlita. Se observan inclusiones no metálicas de diferentes tamaños.</p> |

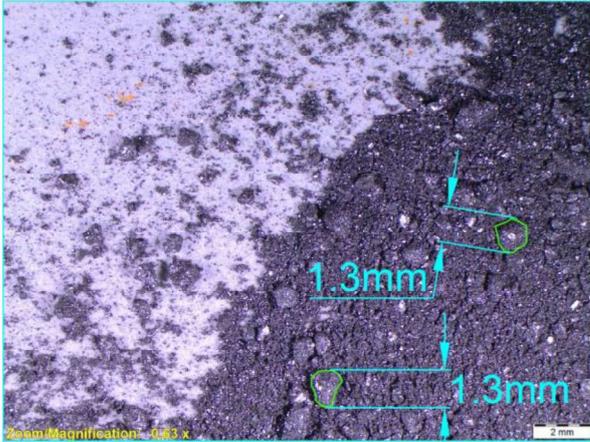
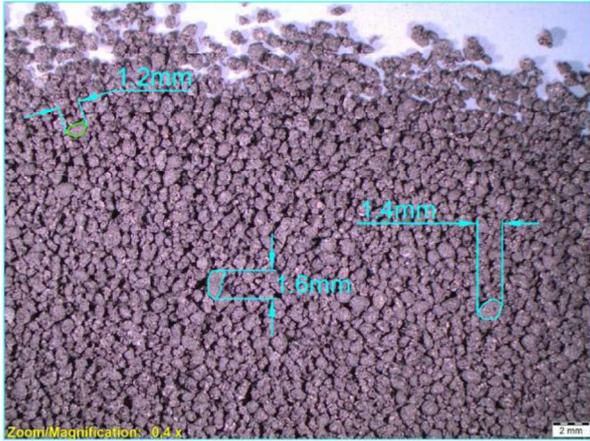
Continuación de la tabla 3.18.

| | | | |
|----|--------------|--|---|
| P4 | Nital al 10% | <p>Zona afectada por el calor a 100x</p>  | <p>Zonas de grano fino (ZGF) y zona de crecimiento de grano (ZCG), la última se caracteriza por la formación de una matriz ferrítica alotriomórfica en la zona cercada al cordón.</p> |
| P4 | Nital al 10% | <p>Zona afectada por el calor a 500x</p>  | <p>Matriz de ferrita poligonal con perlita. Se observa también formación de ferrita de fase alienada con perlita.</p> |

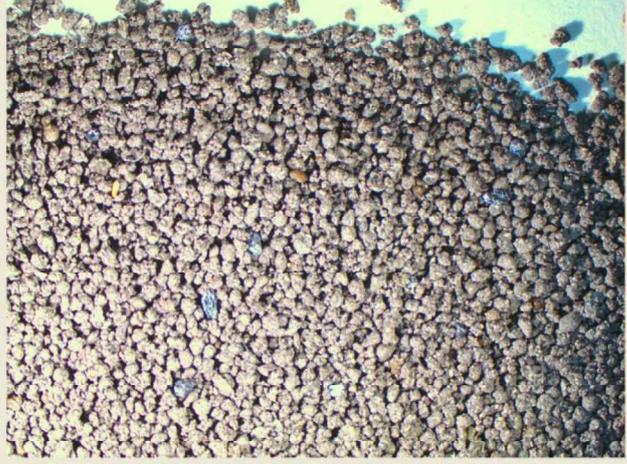
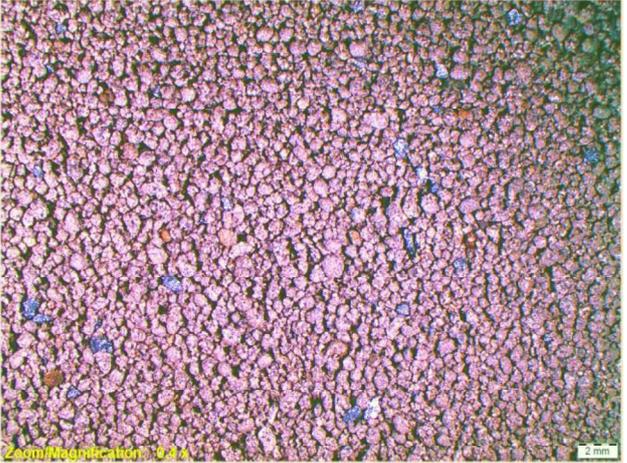
3.1.1. Resultados de macrografías del fundente y ferrosilicio

La granulometría del fundente y ferrosilicio se logra mediante tamizado, las macrografías mostradas de los materiales solos, y combinados se muestran en la tabla 3.19. A continuación se presentan resultados con mediciones del tamaño de grano máximo observado bajo el microscopio óptico.

Tabla 3.19. Resultados de macrográficas al fundente y ferrosilicio.

| Identificación | Imagen | Observaciones importantes |
|--------------------|--|--|
| Ferrosilicio |  | <p>El proceso de molienda del ferrosilicio de forma manual genera tamaños de grano variados, los granos de menor diámetro no son medibles en macrográficas. Los granos más grandes muestran un diámetro de 1,3 mm.</p> |
| Fundente |  | <p>Se observa un tamaño de grano más regular en el fundente y los granos de mayor tamaño observados presentan un diámetro de 1,2 mm, 1,4 mm y 1,6 mm.</p> |
| Ferrosilicio al 1% |  | <p>Se observa el ferrosilicio como rocas de brillo azulado. Solo las rocas de mayor granulometría son observables. No es posible calcular la composición de la mezcla mediante la imagen.</p> |

Continuación de la tabla 3.19.

| | | |
|-----------------------------|---|---|
| <p>Ferrosilicio al 2,5%</p> |  | <p>Ferrosilicio observable con tono azulado. Solo se observan los granos de mayor tamaño.</p> |
| <p>Ferrosilicio al 5%</p> |  | <p>Ferrosilicio observable con mayor frecuencia en tono azulado. Solo se observan los granos de mayor tamaño.</p> |

3.2. Discusión

3.2.1. Metal base

Los análisis realizados sobre el material base según los requerimientos mínimos para la especificación ASTM A588 se describen en la sección 3.2.1 y muestran que cumple los criterios de composición química, resistencia a la tracción, punto de fluencia y porcentaje de elongación. Los resultados se muestran en la tabla 3.1 y 3.2.

El metal base se adquiere en condición de laminación en caliente debido a su menor costo, esta característica es claramente apreciable en la tabla 3.2 de la sección 3.1.1.4, donde se observa la orientación de los granos de ferrita y perlita, tras el ataque químico. En la sección 1.4 se describen las ventajas y características de los aceros HSLA donde se destaca la microestructura de grano fino y una gran presencia de ferrita, requerimiento que también se cumple para continuar el estudio.

3.2.2. Comportamiento de la junta soldada

Los ensayos de tracción realizados sobre las probetas con los distintos contenidos de ferrosilicio presentados en la tabla 3.6 de la sección 3.1.2.1 muestran un incremento de la resistencia a la tracción solo en el caso de la mezcla fundente-ferrosilicio que posee un 1% de ferrosilicio, esta mejora supera por un 2% el valor de resistencia a la tracción de la probeta con fundente puro. Este resultado es coherente con lo mostrado en la tabla 3.3, pues las probetas siempre fallaron en el material base, mismo que mantiene sus valores de resistencia a la tracción en todas las pruebas. Se observa que la probeta con contenido de 5% de ferrosilicio es aquella que presenta la mayor área de ZAC con un incremento del 29% respecto a la probeta soldada con fundente puro, pero la reducción de tan solo el 0,3% de la resistencia a la tracción, permite concluir que no existe una influencia directa del contenido de silicio en el proceso de crecimiento de grano asociado a menores valores de resistencia [36]. En contraste con el presente estudio existe literatura que demuestra que la resistencia a la tracción y el esfuerzo de fluencia se ven incrementados de forma no lineal al aumentar el contenido de silicio en el metal de soldadura [37]. Por tanto, el contenido de silicio no ejerce un efecto negativo en los resultados y a pesar de la presencia de defectos no se genera decremento de la resistencia a la tracción de las juntas soldadas.

Es muy importante recordar que la probeta P2 presentó mayor incidencia de discontinuidades en los ensayos de doblado lateral mostrados en la tabla 3.5, y a pesar de lo mencionado, la probeta P2 presenta mayor resistencia a la tracción que P1, demostrando una mejora en las propiedades mecánicas. Este no es el caso de las probetas P3 y P4 que no presentan mejora en la resistencia a la tracción. El ensayo de doblado también presenta importantes datos de la ductilidad del material y de su capacidad de no fisurarse. La AWS menciona que el proceso de soldadura por arco sumergido se caracteriza por tener una muy baja incidencia de fisuramiento inducido por el hidrógeno, característica que reduce la probabilidad de resultados no deseados en cuanto a los ensayos de tracción y doblado [38]. Por este motivo y a pesar de que se modifica la composición del fundente, el ensayo de doblado no muestra fractura del material y solo se encuentra evidencia de inclusiones de escoria, es decir, no se genera una reducción de la ductilidad de la soldadura al incrementar el contenido de silicio, esto se puede observar en la figura 3.3.

Otro atributo del ensayo de doblado es su capacidad de mostrar defectos graves de soldadura, como falta de fusión, inclusiones de escoria, porosidades, entre otros, y como resultado se observa que el incremento del contenido de silicio no se relacionó a defectos durante la soldadura, ya que, la probeta referencial P1 presenta el mismo defecto de

inclusión de escoria que las probetas con contenido adicional de silicio. Por lo tanto, los defectos se asocian a posibles fallos en el procedimiento de soldadura y no al incremento de silicio. La literatura coincide en lo descrito puesto que el ferrosilicio se usa ampliamente como agente para la inclusión de silicio en soldaduras y no se reportan defectos de soldadura [37]. Como nota importante se debe mencionar que durante el proceso de soldadura existieron fluctuaciones de energía que generaron inestabilidad en el arco.

En cuanto al estudio de la dureza, los valores obtenidos en cada zona se promedian para obtener una medida referencial fácilmente evaluable respecto a la probeta soldada con fundente puro. Los resultados muestran que la dureza del material base, y dureza de la zona afectada por el calor presentan valores coincidentes y constantes a medida que varía el contenido de silicio, esto se observa en la figura 3.4. En contraste, la dureza del cordón de soldadura se ve fuertemente influida por el incremento del silicio que genera un aumento máximo de dureza del 18%, para alcanzar un valor de 96,3 HRB en la probeta con 5% de ferrosilicio. Estos resultados se relacionan íntimamente a los resultados metalográficos que justifican el incremento de dureza con una elevada presencia de ferrita acicular y ferrita alotriomórfica a medida que se incrementa la cantidad de inclusiones asociadas al silicio en las regiones columnares. La literatura coincide en que existe un incremento de la cantidad de ferrita acicular a medida que aumenta el contenido de silicio en el cordón de soldadura, y que las placas de ferrita acicular presentan una forma cada vez más angular, la ferrita acicular coexiste con ferrita pro-eutectoide y con ferrita de fase alineada con microfases de martensita, austenita y cementita. En cuanto a las regiones de material de soldadura que han sido recalentadas por los pases superiores se presenta una clara formación de ferrita alotriomórfica en los bordes de grano de los que previamente fueron granos de austenita, en la región de grano grueso. Los resultados de dureza asociados a la microestructura mencionada presentan incremento de la dureza. [37]. Lo mencionado coincide con las observaciones micrográficas de las dos composiciones de cordón de soldadura con 2,5% y 5% de ferrosilicio, que también presentan incremento de la dureza y con relación a la literatura mencionada también es posible que el incremento de microfases de alta dureza influyan en la dureza general del cordón de soldadura. Se reporta en la literatura que un incremento del aporte de calor en la soldadura genera un crecimiento del tamaño de grano de todas las fases ferríticas en el cordón de soldadura, lo que se traduce en reducción de la resistencia a la tracción [39].

Cabe mencionar que el método utilizado para incrementar el contenido de silicio en el presente estudio con el uso de ferrosilicio tiene doble efecto sobre la microestructura del

cordón de soldadura, el primer efecto corresponde a la influencia que el silicio ejerce sobre la formación de ferrita cuando éste se encuentra completamente disuelto (sin inclusiones), y el segundo efecto a la influencia que ejerce la gran cantidad de inclusiones de ferrosilicio de distintos tamaños en la nucleación de ferrita acicular a partir de inclusiones de tamaño reducido [36],[37],[40].

Las micrografías realizadas sobre el cordón de soldadura en todas las composiciones muestran inclusiones de ferrosilicio de distinto tamaño. Sin embargo, las inclusiones de diámetro menor son aquellas promueven la formación de ferrita acicular y de ferrita de grano muy fino en el cordón de soldadura. Este efecto se hace más pronunciado a medida que se incrementa el contenido de ferrosilicio en el cordón de soldadura, puesto que las inclusiones de menor tamaño se hallan también incrementadas. Esto se puede evidenciar en la tabla 3.16 de resultados micrográficos en las imágenes con aumento de 500x donde se observa que una inclusión de 1,6 μm es el punto de crecimiento de las placas de ferrita acicular, efecto que no se observa en las inclusiones de mayor tamaño.

Se conoce también que la formación de una placa de ferrita acicular a partir de una partícula fomenta la formación de otras placas en un proceso llamado autocatálisis. Las placas que se forman de esta manera pueden no contener inclusiones. La ferrita acicular es una estructura descrita como caótica cuya nucleación se da de forma heterogénea en todas direcciones y que se genera en pequeñas inclusiones no metálicas. El motivo por el cual esta estructura es beneficiosa se halla en su capacidad de detener la propagación de fisuras, ya que estas son desviadas en cada encuentro con una nueva placa de ferrita acicular de diferente orientación. Esto se refleja en una mayor tenacidad [36]. Sin embargo, se menciona en la literatura que un incremento en el volumen de ferrita alotrópica se relaciona a una tenacidad reducida [41].

Los ensayos no destructivos presentan una importante referencia de la buena soldabilidad del acero mediante el proceso de arco sumergido en cuanto a la incidencia de defectos superficiales y volumétricos de gravedad. Los resultados muestran que no hay incremento de defectos de soldadura a medida que incrementa el contenido de silicio, a pesar de que se observan inclusiones en las micrografías del cordón de soldadura. Esto se relaciona al pequeño diámetro de las inclusiones que no generan puntos de disminución de resistencia y al contrario reducen el tamaño de grano. En cuanto a la calificación de las juntas soldadas bajo el código AWS D1.1, se observa que, por dimensiones elevadas presentadas en refuerzo, longitud total de escoria y falta de fusión, las probetas no calificarían los ensayos no destructivos según el código AWS D1.1.

3.2.3. Granulometría del fundente y ferrosilicio

El fundente y ferrosilicio presentan una granulometría muy similar que se obtiene gracias al proceso de tamizado, sin embargo, como se observa en las macrografías de la mezcla ferrosilicio-fundente, son visibles los granos de mayor tamaño y por tanto se comprueba que el ferrosilicio finamente triturado segrega en las zonas bajas del recipiente de mezcla. Esto puede aumentar el contenido de silicio en la interfaz entre el material base y la mezcla de fundente-ferrosilicio durante el proceso de soldadura. Por este motivo se observa que las inclusiones de compuestos de silicio se encuentran con mayor frecuencia en las zonas entre pases de soldadura. Esto incrementa a medida que el contenido de silicio se eleva y genera el fenómeno microestructural descrito anteriormente.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. Conclusiones

- Se cumplen los objetivos de estudio planteados acerca la influencia del silicio en la soldabilidad del acero ASTM A588 mediante el proceso SAW.
- Las propiedades mecánicas del material base son superadas en todos los ensayos de tracción y pruebas de dureza, por la probeta P1 (100% de fundente), lo que permite tener una referencia válida para evaluación del comportamiento de la soldadura en las distintas composiciones de fundente-ferrosilicio.
- La adición de silicio no refleja un incremento en la presencia de defectos de soldadura graves como fisuras o porosidades. Se evidencia que la presencia de inclusiones de compuestos de silicio no genera un problema para calificación del proceso de soldadura, debido a su diámetro reducido.
- La resistencia a la tracción no presenta cambios importantes a medida que varía el contenido de silicio en el fundente con respecto a la soldadura referencial. Por lo tanto, la resistencia a la tracción no se ve disminuida por la presencia de silicio, hasta el valor máximo estudiado de 5% de ferrosilicio en el fundente.
- Los ensayos de doblado reflejan buena soldabilidad en todas las composiciones de la mezcla de ferrosilicio y fundente, que se reflejan en la ausencia de fisuras y en una aparición leve de inclusiones de escoria. Las inclusiones de escoria se hallan en todas las muestras y no se relacionan a la presencia de silicio.
- La dureza del cordón de soldadura presenta una variación directamente proporcional al contenido de silicio en el fundente, donde la soldadura con el máximo contenido de silicio muestra un incremento del 18% de dureza en la escala Rockwell B, respecto a la soldadura referencial, estos cambios se relacionan con un incremento fases de ferrita acicular que coexisten con fases de ferrita alotriomórfica.
- Se observa también el incremento de microfases en las zonas con inclusiones de menor tamaño.
- La adición de ferrosilicio genera un notable incremento en las inclusiones observadas en las micrografías. Las inclusiones de menor tamaño son los puntos de nucleación de ferrita acicular que se presentan en mayor cantidad a medida que incrementa el contenido de silicio.

- La composición química del fundente influye fuertemente en la microestructura del cordón de soldadura y por tanto modificara sus propiedades mecánicas. Esto se da por el incremento de silicio, y paralelamente por el incremento de inclusiones.

4.2. Trabajos futuros

El estudio realizado refleja la fuerte influencia que puede ejercer la composición del material de aporte y por tanto se abre una brecha para el estudio de soldabilidad del silicio en electrodos con composiciones distintas, que generen una mejor comprensión del comportamiento de la soldadura con adición de silicio.

La adición de aleaciones ferrosas en el fundente de SAW permite modificar de forma sencilla la composición del metal de soldadura y por tanto es un método que puede ser utilizado para el estudio de distintos elementos químicos conocidos por sus beneficios en las propiedades mecánicas del acero.

El acero ASTM A588 es un acero capaz de generar una capa de oxido que lo protege de los elementos externos, si se lo realiza en condiciones adecuadas, pero su resistencia a la corrosión pudo ser modificada al adicionar silicio en el metal de aporte, este aspecto no se considera en el presente estudio y puede ser la oportunidad para nuevas revelaciones de la influencia del silicio en dicho acero.

Referencias

- [1] L. Jeffus, *Welding Principle and Applications*, 8th ed. Boston: Cengage Learning, 2012.
- [2] American Welding Society, *Welding handbook volume 2: welding processes, part 1*. 2004.
- [3] Á. Martín, *Soldeo por arco sumergido*. Toledo: Solysol, 2008.
- [4] Indura, "EM12K-H400," 2019. [Online]. Available: <http://www.indura.cl/Descargar/INDURA EM12K-H400?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2F757eb9d18a3d4522afa54538f1f27792.pdf>.
- [5] Gas and Suply, "Lincoln Lincolnweld L-61 ED011825 Solid EM12K Carbon Steel Welding Wire, 5/64 Inch dia., 60 lb Coil," 2019. [Online]. Available: https://www.gasandsupply.com/i/Lincoln-Lincolnweld-L-61-Solid-EM12K-ED011825-_LINED011825.
- [6] AWS, *ANSI/AWS A5.17 Specification for Carbon Steel Electrodes and Fluxes for Subme*. American National Standards Institute, 2007.
- [7] L. Electric, "SUBMERGED ARC (SAW) FLUX," 2019. [Online]. Available: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_SubmergedArcConsumables-Lincolnweld-Lincolnweld960/c51016.pdf.
- [8] R. Claramunt, P. Cornago, S. Esteban, A. Farrán, M. Pérez, and D. Sanz, *Principales Compuestos Químicos*. Madrid: Editorial UNED, 2015.
- [9] R. Chang and K. Goldsby, *Química (11ed)*. 2013.
- [10] S. Avner, *Introducción a La Metalurgia Física*, 2nd ed. México D.F.: McGraw-Hill Book Co., 1988.
- [11] ASTM, "ASTM A867-19: Standard Specification for Iron-Silicon Relay Steels," *ASTM Int.*, 2019.
- [12] ASM International, *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys Vol 1*, 10th ed. American Society of Materials, 1990.
- [13] Cometal S.A., "Ferro Silicio." Madrid, 2019.
- [14] V. Voskoinov, V. Kudrin, and A. Yákushev, "Metalurgia_General_Archivo2.Pdf." p. 760, 1982.
- [15] Cometal S.A., "Descripción General Ferro Silicio." [Online]. Available: <http://www.cometalsa.com/download.php?id=1276>.
- [16] American Welding Society, *Welding Handbook - Metals and Their Weldability*, vol.

4. 1982.
- [17] AWS, C. L. Jenney, and A. O'Brien, *Welding handbook Volume 4 - MATERIALS AND APPLICATIONS, PART 1*. 1991.
- [18] ASTM International, "A588/A588M-15: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50 ksi [345 MPa] Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance," *Annu. B. ASTM Stand.*, 2001.
- [19] Secretaría de Gestión de Riesgos, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, and Oficina de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Comisión Europea, "Guía práctica para el diseño de estructuras de acero de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015," p. 67, 2015.
- [20] Bruker, "Q2 ION - Ultra-Compact Metals Analyzer," 2019. [Online]. Available: <https://www.bruker.com/es/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/optical-emission-spectrometry/q2-ion/technical-details.html>.
- [21] ASTM International, "ASTM E8/E8M - 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," 2016.
- [22] Tinius Olsen, "Super 'L' Hydraulic universal testing machines for critical materials testing up to 3000 kN.," *Bulletin 117-E*, 2003. [Online]. Available: <http://www.pact-egypt.com/pdf/SuperL.pdf>.
- [23] Olympus, "Sistema de microscopio estereoscópico SZX7," 2019. [Online]. Available: <https://www.olympus-lifescience.com/es/microscopes/stereo/szx7/>.
- [24] Olympus, "GX41 Servicios y asistencia," 2019. [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/es/microscope/gx41/>.
- [25] ASTM International, "ASTM E18 – 16 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials," *Am. Soc. Test. Mater.*, 2016.
- [26] Qualitest, "Analog Rockwell Hardness Tester-HardRocker," 2019. [Online]. Available: <https://www.worldoftest.com/analog-rockwell-hardness-tester-hardrocker>.
- [27] American Welding Society, "AWS D1.1 Structural Welding Code - Steel," *American National Standards Institute, Standards*. 2015.
- [28] Linconl Electric, "Operating Manual IM-269," 1986. [Online]. Available: <https://www.lincolnelectric.com/assets/servicenavigator-public/lincoln3/IM269.pdf>.
- [29] American Welding Society, *AWS B4.0-2007 Standard Methods for Mechanical Testing of Welds*. Miami, FL.: American Welding Society, 2007.
- [30] M. Chavda, "ASTM E190 (Bend Test)," 2018. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/ManthanChavda2/astm-e-190bend-test>.
- [31] V. Sotomayor, "Apuntes de Clase END Radiografía." Quito, 2018.

- [32] Departamento de Aeronáutica, *Cátedra de Ensayos No Destructivos*, 2da ed. La Plata: Universidad de La Plata, 2006.
- [33] G. Almeida and G. Alvarez, "Estudio de la penumbra geométrica de un generador de rayos X y su influencia en la evaluación de discontinuidades," Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [34] Escuela Politécnica Nacional, *Guía de Prácticas Laboratorio de Ensayos No Destructivos*. Quito, 2016.
- [35] V. Sotomayor, *Apuntes de clase END Líquidos penetrantes*. Quito, 2018.
- [36] H. Bhadeshia and R. Honeycombe, *Steels Microstructure and Properties*, 4ta Ed. Oxford: Elsevier, 2017.
- [37] E. Glyn, "Effects of silicon on the microstructure and properties of C-Mn all-weld-metal deposits," *Met. Constr.*, no. July 1986, 2018.
- [38] Abington Publishing, *SUBMERGED-ARC WELDING*. 1990.
- [39] E. Glyn, "The Effect of Heat Input on the Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld-Metal Deposits," *Weld. Res. Suppl.*, no. January 1982, 2015.
- [40] A. Joarder, S. C. Saha, and A. K. Ghose, "Study of Submerged Arc Weld Metal and Heat-Affected Zone Microstructures of a Plain Carbon Steel," *Indian Weld. J.*, vol. 23, no. 3, p. 151, 1991.
- [41] A. Ashraf, "Widmanstatten Ferrite and Bainite in Ultra High Strength Steels," University Of Cambridge, 1991.

ANEXO I.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL FERROSILICIO



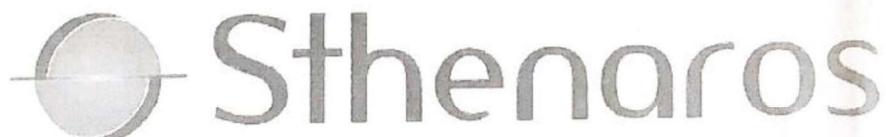
Calle Marie Curie Mz. M Lote 9
Urb. Ind. Santa Rosa – Ate
t. (51) 326-2042
e-mail: sthenarossac@gmail.com

FERROSILICIO 75%

COMPOSICIÓN QUÍMICA

| | | | |
|----------|------|---|--------|
| Silicio | (Si) | : | 77.42% |
| Aluminio | (Al) | : | 1.35% |
| Carbono | (C) | : | 0.03% |
| Azufre | (S) | : | 0.006% |
| Fósforo | (P) | : | 0.023% |

Granulometría : 10-100 mm 90% min.



ANEXO II.
RESULTADOS DE ESPECTROMETRÍA POR CHISPA DEL
MATERIAL BASE



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN



INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Carlos Wime Díaz Msc

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 06 de mayo del 2019

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestra de material metálico

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de material metálico.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

| Nombre | Identificación de la probeta | Identificación Gráfica |
|------------------------------|------------------------------|--|
| Muestra de material metálico | M1 |  |





3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. Método: Fe 110 Low Alloy

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 3 mediciones en distintos puntos del espécimen y finalmente se promedió su valor.

| | | Muestra M1 |
|--------------|------|---------------|
| Elemento | | Valor [%] |
| Carbono | [C] | 0,150 |
| Silicio | [Si] | 0,155 |
| Manganeso | [Mn] | 1,227 |
| Fósforo | [P] | 0,0063 |
| Cromo | [Cr] | 0,340 |
| Níquel | [Ni] | 0,0099 |
| Cobre | [Cu] | 0,0044 |
| Aluminio | [Al] | 0,016 |
| Niobio | [Nb] | 0,0059 |
| Hierro | [Fe] | 98,08 |
| Total | | 99,99 |

Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable

Ing. Oscar Sotomayor

**Jefe del Laboratorio de
Fundición**



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 06.05.2019 08:49:57

Method: Fe110

| | C [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] |
|---|--------|---------|---------|---------|---------|
| ∅ | 0,150 | 0,155 | 1,227 | 0,0063 | <0,0030 |
| | Cr [%] | Mo [%] | Ni [%] | Cu [%] | Al [%] |
| ∅ | 0,340 | <0,0050 | 0,0099 | 0,0044 | 0,016 |
| | Co [%] | Nb [%] | Ti [%] | V [%] | W [%] |
| ∅ | 0,0061 | 0,0059 | <0,0020 | <0,0030 | <0,020 |
| | B [%] | Sn [%] | Fe [%] | | |
| ∅ | 0,0016 | <0,0020 | 98,08 | | |



X

ANEXO III.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL MATERIAL BASE Y DE LAS JUNTAS SOLDADAS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M19.097

Quito, 30 de julio de 2019

Solicitado por: M.Sc. Carlos Díaz
Persona de contacto: Iván García
Teléfono: 0995402758
Correo: ivan.garcia@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 25/07/2019
Fecha de ejecución: 30/07/2019

ORDEN DE TRABAJO: N/A

1. **MUESTRAS:** Dos (2) probetas de material base y ocho (8) probetas de juntas soldadas para ensayo de tracción.

2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL SILICIO EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A588 MEDIANTE EL PROCESO SAW.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

| Id. cliente | Id. del LAEV |
|-------------|--------------|
| MB1 | M19.097.01 |
| MB2 | M19.097.02 |
| 9P2 | M19.097.03 |
| 3P1 | M19.097.04 |
| 3P2 | M19.097.05 |
| 3P4 | M19.097.06 |



LAEV – M19.097

Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec

Tabla 1. Identificación de las muestras (continuación).

| Id. cliente | Id. del LAEV |
|-------------|--------------|
| 3P3 | M19.097.07 |
| 8P4 | M19.097.08 |
| 6P3 | M19.097.09 |
| 10P1 | M19.097.10 |

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $23,1 \pm 0,2$ °C

Humedad relativa: $37,8 \pm 4,8$ %

4. ENSAYO DE TRACCIÓN A MATERIAL BASE

En la tabla 2 se indican los valores mínimos de límite de fluencia, resistencia a la tracción y elongación, establecidos en la norma ASTM A588.

Tabla 2. Requerimientos para el acero ASTM A588.

| Límite de fluencia | | Resistencia a la tracción | | % Elongación en 50 mm |
|--------------------|-----|---------------------------|-----|-----------------------|
| ksi | MPa | ksi | MPa | |
| 50 | 345 | 70 | 485 | 21 |

En la tabla 3 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas de material base.

Tabla 3. Resultados del ensayo de tracción a material base.

| Id. | Ancho promedio | Espesor promedio | Carga máxima registrada | | Límite de fluencia | | Resistencia a la tracción | | % elongación en 50 mm |
|------------|----------------|------------------|-------------------------|---------|--------------------|-------|---------------------------|-------|-----------------------|
| | mm | mm | lbf | N | ksi | MPa | ksi | MPa | |
| M19.097.01 | 24,99 | 12,08 | 36 682 | 163 170 | 54,8 | 377,5 | 78,4 | 540,7 | 36,3 |
| M19.097.02 | 25,07 | 12,13 | 36 091 | 160 541 | 54,1 | 373,2 | 76,6 | 528,2 | 36,5 |

5. ENSAYO DE TRACCIÓN A JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 4 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas. La resistencia a la tracción mínima especificada para el material ASTM A588 es de: 70 ksi (483 MPa).



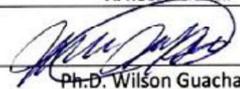
Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec

Tabla 4. Resistencia a la tracción de las juntas soldadas.

| Id. | Ancho Promedio | Espesor Promedio | Carga máxima registrada | | Resistencia a la tracción | | Obs. |
|------------|----------------|------------------|-------------------------|---------|---------------------------|-------|------|
| | mm | mm | lbf | N | ksi | MPa | |
| M19.097.03 | 19,90 | 12,19 | 29 828 | 132 683 | 79,4 | 547,3 | FMB |
| M19.097.04 | 20,19 | 12,14 | 29 946 | 133 206 | 78,9 | 543,8 | FMB |
| M19.097.05 | 19,48 | 12,65 | 29 260 | 130 156 | 76,6 | 528,2 | FMB |
| M19.097.06 | 19,55 | 12,21 | 28 174 | 125 325 | 76,1 | 525,0 | FMB |
| M19.097.07 | 19,64 | 12,73 | 29 335 | 130 489 | 75,7 | 522,1 | FMB |
| M19.097.08 | 21,27 | 12,25 | 30 820 | 137 096 | 76,3 | 526,2 | FMB |
| M19.097.09 | 19,83 | 12,68 | 30 105 | 133 912 | 77,3 | 532,7 | FMB |
| M19.097.10 | 21,13 | 12,41 | 30 082 | 133 810 | 74,0 | 510,4 | FMB |

* FMB = Falla el material base

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

| | REVISADO POR: | APROBADO POR: |
|---------|---|--|
| Firma: |  |  |
| Nombre: | Ing. Jonathan Castro. M.Sc. | Ph.D. Wilson Guachamin |
| Cargo: | TÉCNICO DOCENTE | JEFE |

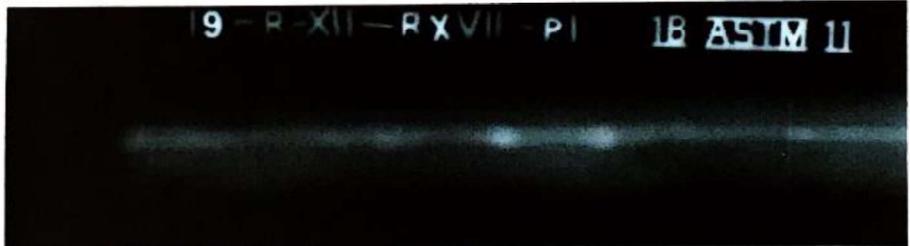
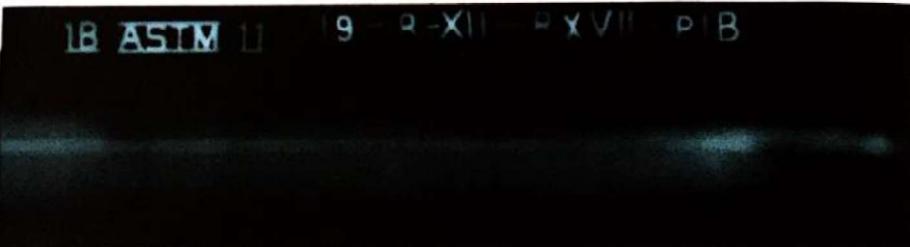
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

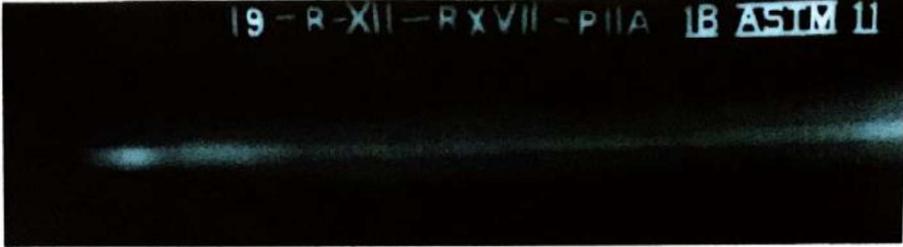
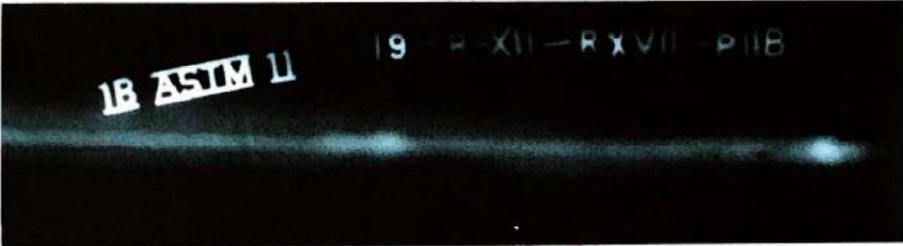
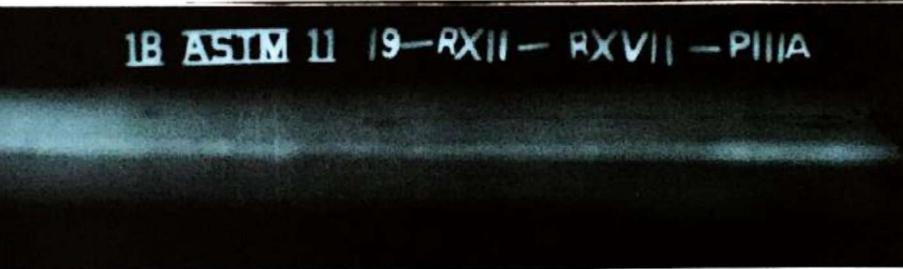
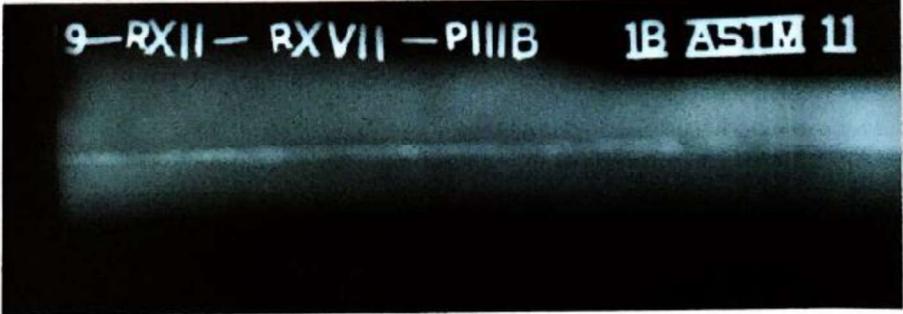


ANEXO IV.

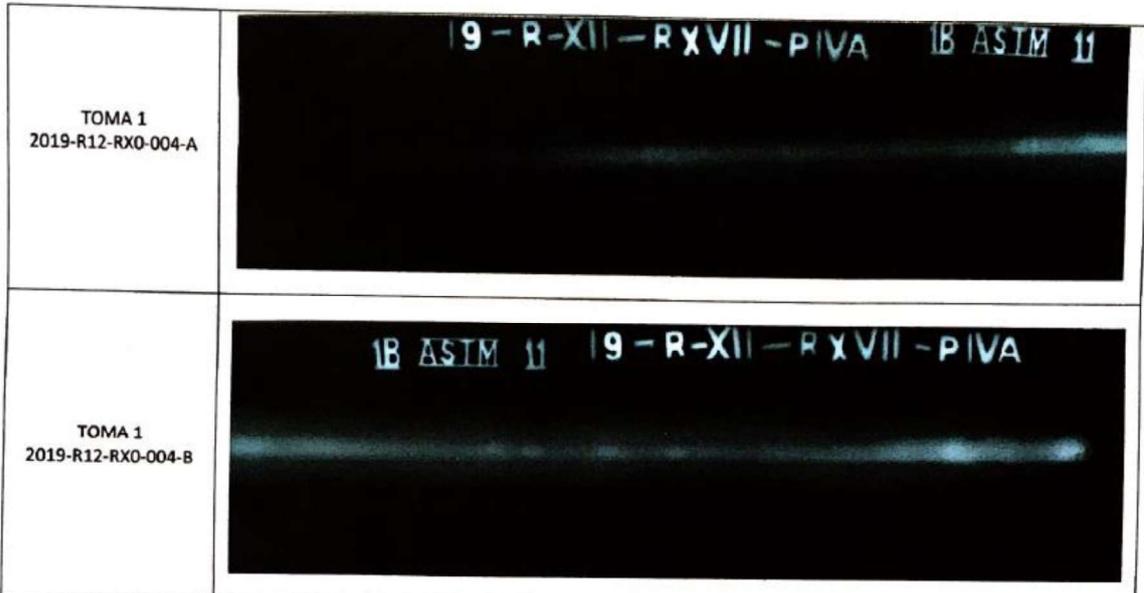
REPORTE DE INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA

| REPORTE DE INSPECCION RADIOGRÁFICA | |
|---|--|
| ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES | |
| Información General | |
| Cliente: Iván García, Estudiantes titulación | Reporte N°: LABEND-EPN-2019-R12-RX7 |
| Fecha de Inspección: 14 de mayo de 2019 | Lugar: Quito – EPN |
| Identificación de la Pieza | |
| Descripción: 2019-R-12-RX-07-001: de acero soldada de L: 260 mm y Dext: 252 mm 2019-R-12-RX-07-002: de acero soldada de L: 260 mm y Dext: 252 mm 2019-R-12-RX-07-003: de acero soldada de L: 260 mm y Dext: 252 mm 2019-R-12-RX-07-004: de acero soldada de L: 260 mm y Dext: 252 mm | Identificación: 2019-R12-RX07-001 2019-R12-RX07-002 2019-R12-RX07-003 2019-R12-RX07-004 |
| Material: Acero ASTM A588 | Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material |
| Componente(s) a Inspeccionar | |
| 2019-R01-RX01-001 | 2019-R01-RX01-002 |
|  |  |
| 2019-R01-RX01-003 | 2019-R01-RX01-004 |
|  |  |

| Equipos y Materiales | | | |
|---------------------------------------|--|---|-------------------|
| Equipo de RX | | | |
| Marca: Baltographe | Modelo: BF 200/10 | kV: 200 kV | mA: 10 mA |
| Película | | | |
| Marca: Structurix | Tipo: II - D7 | | |
| Condiciones de Trabajo | | | |
| Normas de Referencia: ASTM E94 | | | |
| Pieza: 2019-R12-RX07-001 | | | |
| Tomas: 3 | Kv: 160 kV | mA: 5 mA | |
| Tiempo de Exp: 2 min 16 s | Distancia a la Fuente: 55 cm | Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen | |
| Observaciones: IQI Tipo 1B | | | |
| Pieza: 2019-R12-RX07-0002 | | | |
| Tomas: 2 | Kv: 160 kV | mA: 5 mA | |
| Tiempo de Exp: 2 min 16 s | Distancia a la Fuente: 55 cm | Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen | |
| Observaciones: IQI Tipo 1B | | | |
| Pieza: 2019-R12-RX07-0003 | | | |
| Tomas: 2 | Kv: 160 kV | mA: 5 mA | |
| Tiempo de Exp: 2 min 18 s | Distancia a la Fuente: 55 cm | Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen | |
| Observaciones: IQI Tipo 1B | | | |
| Pieza: 2019-R12-RX07-0004 | | | |
| Tomas: 2 | Kv: 160 kV | mA: 5 mA | |
| Tiempo de Exp: 2 min 18 s | Distancia a la Fuente: 55 cm | Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen | |
| Observaciones: IQI Tipo 1B | | | |
| Procesamiento de Película | | | |
| Temp. Ambiente: 20 °C | T. Revelado: 5 min | T. Parada: min | T. Fijado: 10 min |
| Baño de Parada: 1 min | T. Lavado Final: NA | T. Lav. Deshumectante: NA | T. de Secado: NA |
| Imágenes Radiográficas | | | |
| TOMA 1 2019-R12-RX0-001-A |  | | |
| TOMA 1 2019-R12-RX0-001-B |  | | |

| | |
|--------------------------------------|--|
| <p>TOMA 1 2019-R12-RX0-002-A</p> |  |
| <p>TOMA 1 2019-R12-RX0-002-B</p> |  |
| <p>TOMA 1 2019-R12-RX0-003-A</p> |  |
| <p>TOMA 1 2019-R12-RX0-003-B</p> |  |
| | |





Interpretación Radiográfica

Identificación de Discontinuidades

| Discontinuidades | Identificación de Discontinuidades | | | | | | | |
|------------------------|------------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
| | TOMA 1 2019-R12-RX7-001-A | | TOMA 1 2019-R12-RX7-001-B | | TOMA 1 2019-R12-RX7-002-A | | TOMA 1 2019-R12-RX7-002-B | |
| | X (mm) | Dim. (mm) | X (mm) | Dim. (mm) | X (mm) | Dim. (mm) | X (mm) | Dim. (mm) |
| Falta de Penetración | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Fusión Incompleta | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Penetración excesiva | --- | --- | --- | --- | 120 | 22 | --- | --- |
| Inclusiones de Escoria | 22 | 10 | 64 | 2 | 40 | 40 | --- | --- |
| | 17 | 5 | 200 | 2 | 60 | 60 | 5 | 40 |
| | 193 | 2 | --- | --- | 181 | 40 | --- | --- |
| Porosidad | 62 | 1 | --- | --- | --- | --- | 185 | 1.5 |
| | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 195 | 3.5 |
| Nido de poros | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Grietas | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mordeduras | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Escoria Alargada | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Quemón | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

Discontinuidades Identificación de Discontinuidades

| | TOMA 1 2019-R12-RX7-003-A | | TOMA 1 2019-R12-RX7-003-B | | TOMA 1 2019-R12-RX7-004-A | | TOMA 1 2019-R12-RX7-004-B | |
|------------------------|------------------------------|-----------|------------------------------|----------------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
| | X (mm) | Dim. (mm) | X (mm) | Dim. (mm) | X (mm) | Dim. (mm) | X (mm) | Dim. (mm) |
| Falta de Penetración | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Fusión Incompleta | 136 | 15 | 40 135 157 | 35 10 68 | 0 92 | 70 108 | 20 | 47 |
| Penetración excesiva | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Inclusiones de Escoria | 10 | 20 | 200 | 15 | --- | --- | 70 97 | 12 125 |
| | 22 | 18 | | | | | | |
| | 46 | 7 | | | | | | |
| | 60 | 73 | | | | | | |
| | 86 | 24 | | | | | | |
| | 142 | 10 | | | | | | |
| 180 | 5 | | | | | | | |
| 194 | 1 | | | | | | | |
| Salpicadura | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Porosidad | 20 | 3 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nido de poros | 0 | 15 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Grietas | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Mordeduras | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Escoria Alargada | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Quemón | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la placa.

| | | |
|---|--|---|
| Laboratorio de E.N.D | | Cliente |
| Firma: | | Firma: |
| Elaborado por: Ing. Santiago Camacho Asistente de Ensayos LAB-END ASNT Nivel II en Radiografía Limitada a la interpretación | | Nombre: Iván García. Cargo: Estudiante titulación FIM Contacto: Correo: ivan.garcia@epn.edu.ec Fecha: 16/08/2019 |
| Firma: | | |
| Revisado por: Ing. Verónica Botomayor, Jefe de Laboratorio de Ensayos No Destructivos ASNT Nivel II en Radiografía Limitada a la interpretación | | |
| Fecha: 16 de agosto de 2019 | | |

ANEXO V.

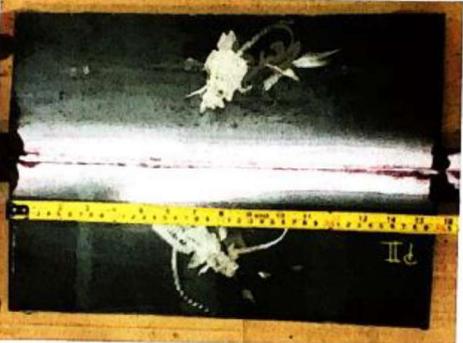
REPORTE DE INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES

REPORTE DE INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
DEPARTAMENTO DE MATERIALES**

| DATOS GENERALES | |
|---|--|
| Clientes: Iván García, Estudiantes titulación. | Reporte N°: LABEND-EPN-2019-R13-LP-06 |
| Fecha: 06/05/2019 | Lugar: Quito-Ecuador |
| IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA | |
| Descripción: 2019-R13-LP-06-001: de acero soldada de L: 400 mm, ancho:300, e: 12 mm 2019-R13-LP-06-002: de acero soldada de L: 400 mm, ancho:300, e: 12 mm 2019-R13-LP-06-003: de acero soldada de L: 400 mm, ancho:300, e: 12 mm 2019-R13-LP-06-004: de acero soldada de L: 400 mm, ancho:300, e: 12 mm | Identificación: 2019- R13-LP06-001 2019- R13-LP06-002 2019- R13-LP06-003 2019- R13-LP06-004 |
| Material: Acero ASTM A588 | Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material |
| ESQUEMA DE LA PIEZA | |
| 2019-R13-LP-06-001 | 2019-R13-LP-06-002 |
|  |  |
| 2019-R13-LP-06-003 | 2019-R13-LP-06-004 |
|  |  |

| MATERIALES Y EQUIPOS | | |
|---|--|--|
| Líquidos: | | |
| Limpiador / removedor: Met-L-check E-59A | | Emulsificador: N/A |
| Penetrante Met-L-check VP-30 | Revelador Met-L-check D-70 | |
| CONDICIONES DE TRABAJO | | |
| Procedimiento: Basado en ASTM E 165, Tipo II método A | | Limpieza: Con solvente |
| Tiempos: | | |
| Penetrante: 12 minutos | Emulsificador: N/A | Revelador: 5 minutos |
| Luz de observación: Visible (sobre los 1700 lux) | | |
| RESULTADOS | | |
| IDENTIFICACIÓN | IMAGEN | OBSERVACIONES |
| 2019- R13-LP06-001 | <p>P1-A</p>  | <p>P1-A: Se visualiza una mancha redondeada de 18 mm de diámetro, una mancha alargada de 76 mm de largo, una mancha alargada de 46 mm de largo, una mancha alargada de 12 mm de largo, una mancha alargada de 69 mm de largo, y una última mancha redondeada de 16 mm.</p> |
| | <p>P1-B</p>  | |
| | | |

| | | |
|---------------------------|---|---|
| <p>2019- R13-LP06-002</p> | <p style="text-align: center;">P2-A</p>  <p style="text-align: center;">P2-B</p>  | <p>P2-A: Se visualiza una mancha redondeada de 15 mm de diámetro.</p> <p>P2-B: Se visualiza dos manchas alargadas a lo largo de todo el pase del raíz del cordón.</p> |
| <p>2019- R13-LP06-003</p> | <p style="text-align: center;">P3-A</p>  <p style="text-align: center;">P3-B</p>  | <p>P3-A: Se visualiza una mancha alargada de 56 mm de largo y una mancha alargada al final del cordón de 14 mm de largo.</p> <p>P3-B: Se visualiza manchas alargadas en el pase de raíz del cordón, de 20 mm de largo y otra de 37 mm de largo.</p> |

| | | |
|---|--|---|
| <p>2019- R13-LP06-004</p> | <p style="text-align: center;">P4-A</p>  <p style="text-align: center;">P4-B</p>  | <p>P4-A: No se visualiza discontinuidades.</p> <p>P4-B: Se visualiza dos manchas alargadas a lo largo de todo el pase del raíz del cordón.</p> |
| <p>OPERADOR: Ing. Santiago Camacho</p> | | |
| <p>Nivel: LÍQUIDOS PENETRANTES –ASNT NIVEL II</p> | | |
| <p style="text-align: center;">Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END</p> <p>Firma:  Ing. Santiago Camacho ASISTENTE DE ENSAYOS LAB-END</p> <p>Fecha: 16/08/2019</p> <p>Firma:  Ing. Verónica Sotomayor JEFE LAB-END</p> <p>Fecha: 16/08/2019</p> <div style="text-align: center;">  </div> | <p style="text-align: center;">Cliente</p> <p>Firma:</p> <p>Nombre: Iván García Cargo: Estudiante titulación FIM Contacto: Correo: ivan.garcia@epn.edu.ec</p> <p>Fecha: 16/08/2019</p> | |

ANEXO VI.
WPS Y PQR

ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)

Escuela Politécnica Nacional
 Nombre de la compañía
 Ing. Gabriel Velastegui M. Sc.
 Autorizado por

EPN-FIM-IG-01
 WPS No.
 EPN-FIM-IG-01
 PQR(s) de respaldo

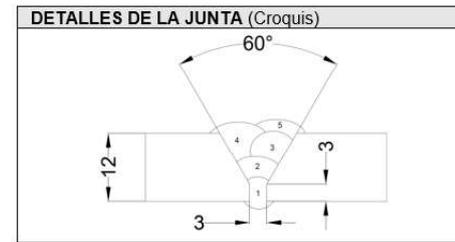
01
 Rev. No.
 N/A
 Reporte CVN

22/04/2019
 Fecha

| METAL BASE | Especificación | Tipo o grado | AWS Grupo No. |
|----------------------|----------------|--------------|---------------|
| Material Base | ASTM A588 | A | II |
| Soldado a | - | - | - |
| Material de respaldo | - | - | - |
| Otro | - | - | - |

| ESPESOR DE METAL BASE | Soldado | Con TIPS |
|-------------------------|---------|----------|
| Soldadura de ranura CJP | 12 mm | N/A |
| CJP ranura w/CVN | - | - |
| Soldadura de ranura PJP | - | - |
| Soldadura de filete | - | - |
| DIAMETER | - | - |

| DETALLES DE LA JUNTA | |
|---|--------|
| Tipo de ranura | A tope |
| Ángulo de ranura | 60° |
| Apertura de raíz | 3 mm |
| Cara de raíz | 3 mm |
| Respaldo | N/A |
| Método | - |
| TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA | |
| Temperatura | N/A |
| Tiempo a la Temperatura | - |
| Otros | - |



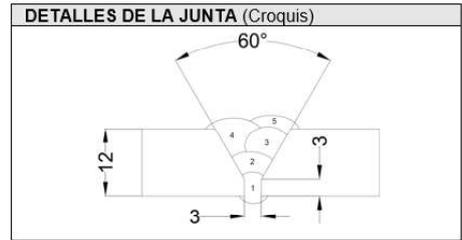
| Procedimiento | | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|
| Capa(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 3 4 | 4 | | |
| Pase(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| Proceso | GMAW | SAW | SAW | SAW | SAW | | |
| Tipo (Semiautomático, Mecanizado, etc.) | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | | |
| Posición | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G | | |
| Metal de aporte (Espec. AWS) | A5.18 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | | |
| Clasificación AWS | ER70S-6 | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K | | |
| Diámetro de Electrodo | 1,2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | | |
| Electrodo/Clasificación de Fundente | N/A | F72A | F72A | F72A | F72A | | |
| Fabricante/Nombre comercial | N/A | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | | |
| Material de aporte suplementario | N/A | - | - | - | - | | |
| Gas de protección (Composición) | CO ₂ | - | - | - | - | | |
| Tasa de flujo | 20 l/min | - | - | - | - | | |
| Tamaño de boquilla | 10,5 mm | - | - | - | - | | |
| Temperatura de Pre calentamiento | - | - | - | - | - | | |
| Temperatura Entre Pases | - | - | - | - | - | | |
| Características Eléctricas | - | - | - | - | - | | |
| Tipo Corriente & Polaridad | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | | |
| Amperios | 75-95 | 260-280 | 170-220 | 190-210 | 190-240 | | |
| Voltios | 17 | 28-31 | 32-35 | 32-35 | 32-36 | | |
| Velocidad de alimentación de alambre | 3,1 m/min | 2,5 m/min | 2,1 m/min | 2,2 m/min | 2,1 m/min | | |
| Velocidad de avance | 0,07 m/min | 0,17 m/min | 0,14 m/min | 0,14 m/min | 0,13 m/min | | |
| Aporte de Calor Máximo | - | - | - | - | - | | |
| Técnica | - | - | - | - | - | | |
| Recto u Oscilatorio | Oscilatorio | Recto | Recto | Recto | Recto | | |
| Pase Único o múltiple (por lado) | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | | |
| Número de Electrodos | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| Espaciamiento longitudinal de los arcos | - | - | - | - | - | | |
| Espaciamiento lateral de los arcos | - | - | - | - | - | | |
| Ángulo entre electrodos paralelos | - | - | - | - | - | | |
| Ángulo de Electrodo (Mec./Auto.) | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | | |
| Normal a la Dirección de avance | - | - | - | - | - | | |
| Oscilación (Mecanizado/Automático) | - | - | - | - | - | | |
| Longitud Transversal | - | - | - | - | - | | |
| Velocidad de Desplazamiento | - | - | - | - | - | | |
| Tiempo de permanencia | - | - | - | - | - | | |
| Peening | - | - | - | - | - | | |
| Limpieza Entre Pase | - | - | - | - | - | | |
| Otros | | | | | | | |

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SOLDADOR (PQR)Escuela Politécnica Nacional
Nombre de la compañíaEPN-FIM-IG-01
WPS No.01
Rev. No.22/04/2019
Fecha

22/04/2019

| METAL BASE | Especificación | Tipo o grado | AWS Grupo No. | Espesor | Tamaño (NPS) | Horario | Diámetro |
|---------------------|----------------|--------------|---------------|---------|--------------|---------|----------|
| Material Base | ASTM A588 | A | II | 12 mm | - | - | - |
| Soldado a | - | - | - | - | - | - | - |
| Material de soporte | - | - | - | - | - | - | - |
| Otro | - | - | - | - | - | - | - |

| DETALLES DE LA JUNTA | |
|------------------------------------|--------|
| Tipo de ranura | A tope |
| Ángulo de ranura | 60° |
| Apertura de raíz | 3 mm |
| Cara de raíz | 3 mm |
| Respaldo | N/A |
| Método | - |
| TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA | |
| Temperatura | N/A |
| Tiempo a la Temperatura | - |
| Otros | - |



| Procedimiento | | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|
| Capa(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 3-4 | 4 | | |
| Pase(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| Proceso | GMAW | SAW | SAW | SAW | SAW | | |
| Tipo (Semiautomático, Mecanizado, etc.) | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | | |
| Posición | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G | | |
| Metal de aporte (Espec. AWS) | A5.18 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | | |
| Clasificación AWS | ER70S-6 | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K | | |
| Diámetro de Electrodo | 1.2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | | |
| Electrodo/Clasificación de Fundente | N/A | F72A | F72A | F72A | F72A | | |
| Fabricante/Nombre comercial | N/A | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | | |
| Material de aporte suplementario | N/A | - | - | - | - | | |
| Gas de protección (Composición) | CO ₂ | - | - | - | - | | |
| Tasa de flujo | 20 l/min | - | - | - | - | | |
| Tamaño de boquilla | 10,5 mm | - | - | - | - | | |
| Temperatura de Pre calentamiento | - | - | - | - | - | | |
| Temperatura Entre Pases | - | - | - | - | - | | |
| Características Eléctricas | - | - | - | - | - | | |
| Tipo Corriente & Polaridad | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | | |
| Amperios | 75-95 | 260-280 | 170-220 | 190-210 | 190-240 | | |
| Voltios | 17 | 28-31 | 32-35 | 32-35 | 32-36 | | |
| Velocidad de alimentación de alambre | 3,1 m/min | 2,5 m/min | 2,1 m/min | 2,2 m/min | 2,1 m/min | | |
| Velocidad de avance | 0,07 m/min | 0,17 m/min | 0,14 m/min | 0,14 m/min | 0,13 m/min | | |
| Aporte de Calor Máximo | - | - | - | - | - | | |
| Técnica | - | - | - | - | - | | |
| Recto u Oscilatorio | Oscilatorio | Recto | Recto | Recto | Recto | | |
| Pase Único o múltiple (por lado) | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | | |
| Número de Electrodo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| Espaciamiento longitudinal de los arcos | - | - | - | - | - | | |
| Espaciamiento lateral de los arcos | - | - | - | - | - | | |
| Ángulo entre electrodos paralelos | - | - | - | - | - | | |
| Ángulo de Electrodo (Mec./Auto.) | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | | |
| Normal a la Dirección de avance | - | - | - | - | - | | |
| Oscilación (Mecanizado/Automático) | - | - | - | - | - | | |
| Longitud Transversal | - | - | - | - | - | | |
| Velocidad de Desplazamiento | - | - | - | - | - | | |
| Tiempo de permanencia | - | - | - | - | - | | |
| Peening | - | - | - | - | - | | |
| Limpieza Entre Pase | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata | | |
| Otros | | | | | | | |

| ✓ | Tipo de pruebas | Cláusula / Figura (s) Referencia | Criterio de aceptación | Resultado | Comentarios |
|---|------------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------|----------------------------------|
| ✓ | Inspección visual | 4.9.1. | 4.9.1. | Rechazado | Altura de refuerzo excesiva |
| ✓ | Examen radiográfico | 4.9.2.1 | 4.9.2.2 | Rechazado | Presencia de escoria y porosidad |
| ✓ | 4 Doblado lateral | 4.9.3.1/Fig. 4.9 | 4.9.3.3 | Aprobado | - |
| ✓ | 2 Ensayo de tracción | 4.9.3.4/Fig. 4.10 | 4.9.3.5 | Aprobado | - |
| ✓ | Prueba de tintas penetrantes | 4.9.1. | 4.9.1. | Rechazado | Posible mordedura |

DETALLES DE PRUEBA DE TENSIÓN

| Número de Muestra | Ancho | Espesor | Área | Máxima carga de tracción | Resistencia a la tracción | Tipo de falla y ubicación |
|-------------------|-------|---------|------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| P1A | 20 mm | 12 mm | . | 133 KN | 543 MPa | Material base, falla dúctil |
| P1B | 20 mm | 12 mm | . | 133 KN | 510 MPa | Material base, falla dúctil |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

DETALLES DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA

| Número de Muestra | Ubicación de la muesca | Dimensiones de la muestra | Prueba de temperatura | Energía Absorbida | Porcentaje de corte | Expansión lateral | Promedio |
|-------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|----------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

CERTIFICACIÓN

| Nombre del soldador | Número de ID. | Número de estampa | Ensayos realizados por | |
|---------------------|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Jorge Guzmán | - | - | Laboratorio | LAEV, LAB-END, LAB-SOLD |
| | | | Número de ensayo | |
| | | | Número de documento | |

Nosotros, los abajo firmantes, certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras de prueba fueron preparadas, soldadas y probadas de acuerdo con los requisitos de la Cláusula 4 de AWS D1.1 / D1.1M (2015), *Código de soldadura estructural de acero*.

| Título | |
|--|-------|
| Análisis de la influencia del silicio en la soldabilidad del acero ASTM A588 mediante el proceso SAW | |
| Nombre | Firma |
| Ivan Andres Garcia Jaramillo | |
| Fecha | |
| 11/202019 | |

EESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)

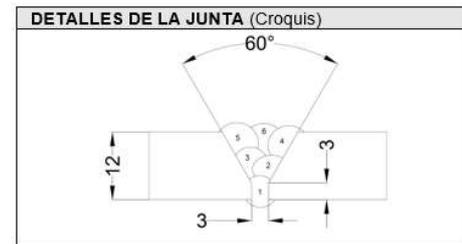
Escuela Politécnica Nacional
 Nombre de la compañía
 Ing. Gabriel Velastegui M. Sc. 22/04/2019
 Autorizado por Fecha

EPN-FIM-IG-02 01 22/04/2019
 WPS No. Rev. No. Fecha
 EPN-FIM-IG-02 N/A
 PQR(s) de respaldo Reporte CVN

| METAL BASE | Especificación | Tipo o grado | AWS Grupo No. |
|----------------------|----------------|--------------|---------------|
| Material Base | ASTM A588 | A | II |
| Soldado a | - | - | - |
| Material de respaldo | - | - | - |
| Otro | - | - | - |

| ESPEJOR DE METAL BASE | Soldado | Con TTPS |
|-------------------------|---------|----------|
| Soldadura de ranura CJP | 12 mm | N/A |
| CJP ranura w/CVN | - | - |
| Soldadura de ranura PJP | - | - |
| Soldadura de filete | - | - |
| DIAMETER | - | - |

| DETALLES DE LA JUNTA | |
|------------------------------------|--------|
| Tipo de ranura | A tope |
| Ángulo de ranura | 60° |
| Apertura de raíz | 3 mm |
| Cara de raíz | 3 mm |
| Respaldo | N/A |
| Método | - |
| TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA | |
| Temperatura | N/A |
| Tiempo a la Temperatura | - |
| Otros | - |



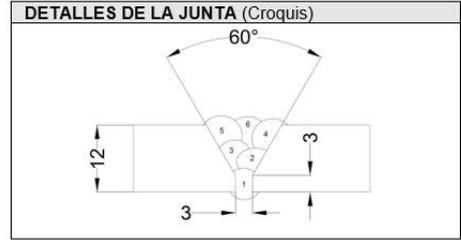
| Procedimiento | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Capa(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 3-4 | 4 | 4 |
| Pase(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Proceso | GMAW | SAW | SAW | SAW | SAW | SAW |
| Tipo (Semiautomático, Mecanizado, etc.) | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático |
| Posición | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G |
| Metal de aporte (Espec. AWS) | A5.18 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 |
| Clasificación AWS | ER70S-6 | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K |
| Diámetro de Electrodo | 1,2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm |
| Electrodo/Clasificación de Fundente | N/A | F72A | F72A | F72A | F72A | F72A |
| Fabricante/Nombre comercial | N/A | Lincolnweld 960 |
| Material de aporte suplementario | N/A | - | - | - | - | - |
| Gas de protección (Composición) | CO ₂ | - | - | - | - | - |
| Tasa de flujo | 20 l/min | - | - | - | - | - |
| Tamaño de boquilla | 10,5 mm | - | - | - | - | - |
| Temperatura de Pre calentamiento | - | - | - | - | - | - |
| Temperatura Entre Pases | - | - | - | - | - | - |
| Características Eléctricas | — | — | — | — | — | — |
| Tipo Corriente & Polaridad | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ |
| Amperios | 75-95 | 160-180 | 170-210 | 180-200 | 170-220 | 280-360 |
| Voltios | 17,3 | 26-30 | 32-36 | 32-36 | 30 | 30 |
| Velocidad de alimentación de alambre | 3,1 m/min | 2,1 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min | 1,9 m/min |
| Velocidad de avance | 0,07 m/min | 0,9 m/min | 0,23 m/min | 0,23 m/min | 0,22 m/min | 0,09 m/min |
| Aporte de Calor Máximo | - | - | - | - | - | - |
| Técnica | — | — | — | — | — | — |
| Recto u Oscilatorio | Oscilatorio | Recto | Recto | Recto | Recto | Recto |
| Pase Único o múltiple (por lado) | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples |
| Número de Electrodo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Espaciamiento longitudinal de los arcos | - | - | - | - | - | - |
| Espaciamiento lateral de los arcos | - | - | - | - | - | - |
| Ángulo entre electrodos paralelos | - | - | - | - | - | - |
| Ángulo de Electrodo (Mec./Auto.) | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica |
| Normal a la Dirección de avance | - | - | - | - | - | - |
| Oscilación (Mecanizado/Automático) | - | - | - | - | - | - |
| Longitud Transversal | - | - | - | - | - | - |
| Velocidad de Desplazamiento | - | - | - | - | - | - |
| Tiempo de permanencia | - | - | - | - | - | - |
| Peening | - | - | - | - | - | - |
| Limpieza Entre Pase | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata |
| Otros | - | - | - | - | - | - |

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SOLDADOR (PQR)

Escuela Politécnica Nacional EPN-FIM-IG-02 01 22/04/2019
 Nombre de la compañía WPS No. Rev. No. Fecha

| METAL BASE | Especificación | Tipo o grado | AWS Grupo No. | Espesor | Tamaño (NPS) | Horario | Diámetro |
|---------------------|----------------|--------------|---------------|---------|--------------|---------|----------|
| Material Base | ASTM A588 | A | II | 12 mm | - | - | - |
| Soldado a | - | - | - | - | - | - | - |
| Material de soporte | - | - | - | - | - | - | - |
| Otro | | | | | | | |

| DETALLES DE LA JUNTA | |
|------------------------------------|--------|
| Tipo de ranura | A tope |
| Ángulo de ranura | 60° |
| Apertura de raíz | 3 mm |
| Cara de raíz | 3 mm |
| Respaldo | N/A |
| Método | - |
| TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA | |
| Temperatura | N/A |
| Tiempo a la Temperatura | - |
| Otros | - |



| Procedimiento | 1 | 2 | 3 | 3-4 | 4 | 4 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Capa(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 3-4 | 4 | 4 |
| Pase(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Proceso | GMAW | SAW | SAW | SAW | SAW | SAW |
| Tipo (Semiautomático, Mecanizado, etc.) | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático |
| Posición | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G |
| Metal de aporte (Espec. AWS) | A5.18 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 |
| Clasificación AWS | ER70S-6 | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K |
| Diámetro de Electrodo | 1,2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm |
| Electrodo/Clasificación de Fundente | N/A | F72A | F72A | F72A | F72A | F72A |
| Fabricante/Nombre comercial | N/A | Lincolnweld 960 |
| Material de aporte suplementario | N/A | - | - | - | - | - |
| Gas de protección (Composición) | CO ₂ | - | - | - | - | - |
| Tasa de flujo | 20 l/min | - | - | - | - | - |
| Tamaño de boquilla | 10,5 mm | - | - | - | - | - |
| Temperatura de Pre calentamiento | - | - | - | - | - | - |
| Temperatura Entre Pases | - | - | - | - | - | - |
| Características Eléctricas | - | - | - | - | - | - |
| Tipo Corriente & Polaridad | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ |
| Amperios | 75-95 | 160-180 | 170-210 | 180-200 | 170-220 | 280-360 |
| Voltios | 17,3 | 26-30 | 32-36 | 32-36 | 30 | 30 |
| Velocidad de alimentación de alambre | 3,1 m/min | 2,1 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min | 1,9 m/min |
| Velocidad de avance | 0,07 m/min | 0,9 m/min | 0,23 m/min | 0,23 m/min | 0,22 m/min | 0,09 m/min |
| Aporte de Calor Máximo | - | - | - | - | - | - |
| Técnica | - | - | - | - | - | - |
| Recto u Oscilatorio | Oscilatorio | Recto | Recto | Recto | Recto | Recto |
| Pase Único o múltiple (por lado) | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples |
| Número de Electrodo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Espaciamiento longitudinal de los arcos | - | - | - | - | - | - |
| Espaciamiento lateral de los arcos | - | - | - | - | - | - |
| Ángulo entre electrodos paralelos | - | - | - | - | - | - |
| Ángulo de Electrodo (Mec./Auto.) | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica |
| Normal a la Dirección de avance | - | - | - | - | - | - |
| Oscilación (Mecanizado/Automático) | - | - | - | - | - | - |
| Longitud Transversal | - | - | - | - | - | - |
| Velocidad de Desplazamiento | - | - | - | - | - | - |
| Tiempo de permanencia | - | - | - | - | - | - |
| Peening | - | - | - | - | - | - |
| Limpieza Entre Pase | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata |
| Otros | | | | | | |

| ✓ | Tipo de pruebas | Cláusula / Figura (s) Referencia | Criterio de aceptación | Resultado | Comentarios |
|---|----------------------|----------------------------------|------------------------|-----------|---|
| ✓ | Inspección visual | 4.9.1. | 4.9.1. | Rechazado | Alto de refuerzo excesivo |
| ✓ | Examen radiográfico | 4.9.2.1 | 4.9.2.2 | Rechazado | Presencia de escoria y penetración excesiva |
| ✓ | 2 Doblado lateral | 4.9.3.1/Fig. 4.9 | 4.9.3.3 | Aprobado | Presencia de escoria. |
| ✓ | 2 Ensayo de tracción | 4.9.3.4/Fig. 4.10 | 4.9.3.5 | Aprobado | - |
| ✓ | Tintas penetrantes | 4.9.1. | 4.9.1. | Rechazado | Alto de refuerzo excesivo |

DETALLES DE PRUEBA DE TENSIÓN

| Número de Muestra | Ancho | Espesor | Área | Máxima resistencia a la | Máximo estrés | Tipo de falla y ubicación |
|-------------------|-------|---------|------|-------------------------|---------------|-----------------------------|
| P2A | 20 mm | 12 mm | | 132 KN | 547 MPa | Material base, falla dúctil |
| P2B | 20 mm | 12 mm | | 130 KN | 528 MPa | Material base, falla dúctil |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

DETALLES DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA

| Número de Muestra | Ubicación de la muesca | Dimensiones de la muestra | Prueba de temperatura | Energía Absorbida | Porcentaje de corte | Expansión lateral | Promedio |
|-------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|----------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

CERTIFICACIÓN

| Nombre del soldador | Número de ID. | Número de estampa | Ensayos realizados por | |
|---------------------|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Jorge Guzmán | - | - | Laboratorio | LAEV, LAB-END, LAB-SOLD |
| | | | Número de ensayo | |
| | | | Número de documento | |

Nosotros, los abajo firmantes, certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras de prueba fueron preparadas, soldadas y probadas de acuerdo con los requisitos de la Cláusula 4 de AWS D1.1 / D1.1M, (2015) *Código de soldadura estructural de acero.*

| | |
|--|--------------|
| Título | |
| Análisis de la influencia del silicio en la soldabilidad del acero ASTM A588 mediante el proceso SAW | |
| Nombre | Firma |
| Ivan Andres Garcia Jaramillo | |
| Fecha | |
| 11/20/2019 | |

ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)

Escuela Politécnica Nacional
 Nombre de la compañía
 Ing. Gabriel Velastegui M. Sc.
 Autorizado por

EPN-FIM-IG-03
 WPS No.
 EPN-FIM-IG-03
 PQR(s) de respaldo

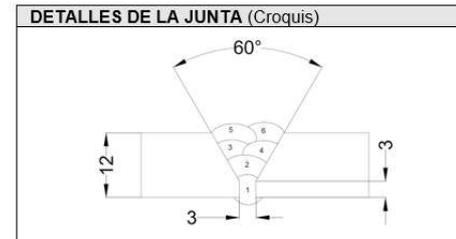
01
 Rev. No.
 N/A
 Reporte CVN

22/04/2019
 Fecha

| METAL BASE | Especificación | Tipo o grado | AWS Grupo No. |
|----------------------|----------------|--------------|---------------|
| Material Base | ASTM A588 | A | II |
| Soldado a | - | - | - |
| Material de respaldo | - | - | - |
| Otro | - | - | - |

| ESPELOR DE METAL BASE | Soldado | Con TTPS |
|-------------------------|---------|----------|
| Soldadura de ranura CJP | 12 mm | N/A |
| CJP ranura w/CVN | - | - |
| Soldadura de ranura PJP | - | - |
| Soldadura de filete | - | - |
| DIAMETER | - | - |

| DETALLES DE LA JUNTA | |
|------------------------------------|--------|
| Tipo de ranura | A tope |
| Ángulo de ranura | 60° |
| Apertura de raíz | 3 mm |
| Cara de raíz | 3 mm |
| Respaldo | N/A |
| Método | - |
| TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA | |
| Temperatura | N/A |
| Tiempo a la Temperatura | - |
| Otros | - |



| Procedimiento | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Capa(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Pase(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Proceso | GMAW | SAW | SAW | SAW | SAW | SAW |
| Tipo (Semiautomático, Mecanizado, etc.) | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático |
| Posición | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G |
| Metal de aporte (Espec. AWS) | A5.18 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 |
| Clasificación AWS | ER70S-6 | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K |
| Diámetro de Electrodo | 1,2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm |
| Electrodo/Clasificación de Fundente | N/A | F72A | F72A | F72A | F72A | F72A |
| Fabricante/Nombre comercial | N/A | Lincolnweld 960 |
| Material de aporte suplementario | N/A | - | - | - | - | - |
| Gas de protección (Composición) | CO ₂ | - | - | - | - | - |
| Tasa de flujo | 20 l/min | - | - | - | - | - |
| Tamaño de boquilla | 10,5 mm | - | - | - | - | - |
| Temperatura de Pre calentamiento | - | - | - | - | - | - |
| Temperatura Entre Pases | - | - | - | - | - | - |
| Características Eléctricas | - | - | - | - | - | - |
| Tipo Corriente & Polaridad | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ |
| Amperios | 87-102 | 160-180 | 170-210 | 190-210 | 170-220 | 190-240 |
| Voltios | 18,5 | 26-30 | 32-36 | 32-35 | 30 | 32-36 |
| Velocidad de alimentación de alambre | 3,9 m/min | 2,1 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min |
| Velocidad de avance | 0,07 m/min | 0,09 m/min | 0,14 m/min | 0,15 m/min | 0,22 m/min | 0,13 m/min |
| Aporte de Calor Máximo | - | - | - | - | - | - |
| Técnica | - | - | - | - | - | - |
| Recto u Oscilatorio | Oscilatorio | Recto | Recto | Recto | Recto | Recto |
| Pase Único o múltiple (por lado) | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples |
| Número de Electrodo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Espaciamiento longitudinal de los arcos | - | - | - | - | - | - |
| Espaciamiento lateral de los arcos | - | - | - | - | - | - |
| Ángulo entre electrodos paralelos | - | - | - | - | - | - |
| Ángulo de Electrodo (Mec./Auto.) | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica |
| Normal a la Dirección de avance | - | - | - | - | - | - |
| Oscilación (Mecanizado/Automático) | - | - | - | - | - | - |
| Longitud Transversal | - | - | - | - | - | - |
| Velocidad de Desplazamiento | - | - | - | - | - | - |
| Tiempo de permanencia | - | - | - | - | - | - |
| Peening | - | - | - | - | - | - |
| Limpieza Entre Pase | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata |
| Otros | - | - | - | - | - | - |

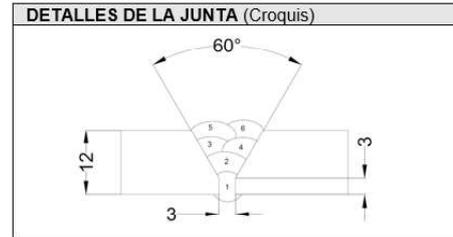
REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SOLDADOR (PQR)

Escuela Politécnica Nacional
Nombre de la compañíaEPN-FIM-IG-03
WPS No.01
Rev. No.22/04/2019
Fecha

22/04/2019

| METAL BASE | Especificación | Tipo o grado | AWS Grupo No. | Espesor | Tamaño (NPS) | Horario | Diámetro |
|---------------------|----------------|--------------|---------------|---------|--------------|---------|----------|
| Material Base | ASTM A588 | A | II | 12 mm | - | - | - |
| Soldado a | - | - | - | - | - | - | - |
| Material de soporte | - | - | - | - | - | - | - |
| Otro | - | - | - | - | - | - | - |

| DETALLES DE LA JUNTA | |
|------------------------------------|--------|
| Tipo de ranura | A tope |
| Ángulo de ranura | 60° |
| Apertura de raíz | 3 mm |
| Cara de raíz | 3 mm |
| Respaldo | N/A |
| Método | - |
| TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA | |
| Temperatura | N/A |
| Tiempo a la Temperatura | - |
| Otros | - |



| Procedimiento | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Capa(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Pase(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Proceso | GMAW | SAW | SAW | SAW | SAW | SAW |
| Tipo (<i>Semiautomático, Mecanizado, etc.</i>) | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático |
| Posición | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G |
| Metal de aporte (Espec. AWS) | A5 18 | A5 17 |
| Clasificación AWS | ER70S-6 | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K |
| Diámetro de Electrodo | 1,2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm |
| Electrodo/Clasificación de Fundente | N/A | F72A | F72A | F72A | F72A | F72A |
| Fabricante/Nombre comercial | N/A | Lincolnweld 960 |
| Material de aporte suplementario | N/A | - | - | - | - | - |
| Gas de protección (Composición) | CO ₂ | - | - | - | - | - |
| Tasa de flujo | 20 l/min | - | - | - | - | - |
| Tamaño de boquilla | 10,5 mm | - | - | - | - | - |
| Temperatura de Precalentamiento | - | - | - | - | - | - |
| Temperatura Entre Pases | - | - | - | - | - | - |
| Características Eléctricas | - | - | - | - | - | - |
| Tipo Corriente & Polaridad | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ |
| Amperios | 87-102 | 160-180 | 170-210 | 190-210 | 170-220 | 190-240 |
| Voltios | 18,5 | 26-30 | 32-36 | 32-35 | 30 | 32-36 |
| Velocidad de alimentación de alambre | 3,9 m/min | 2,1 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min | 2,5 m/min |
| Velocidad de avance | 0,07 m/min | 0,09 m/min | 0,14 m/min | 0,15 m/min | 0,22 m/min | 0,13 m/min |
| Aporte de Calor Máximo | - | - | - | - | - | - |
| Técnica | - | - | - | - | - | - |
| Recto u Oscilatorio | Oscilatorio | Recto | Recto | Recto | Recto | Recto |
| Pase Único o múltiple (por lado) | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples |
| Número de Electrodos | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Espaciamiento longitudinal de los arcos | - | - | - | - | - | - |
| Espaciamiento lateral de los arcos | - | - | - | - | - | - |
| Ángulo entre electrodos paralelos | - | - | - | - | - | - |
| Ángulo de Electrodo (Mec./Auto.) | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica |
| Normal a la Dirección de avance | - | - | - | - | - | - |
| Oscilación (<i>Mecanizado/Automático</i>) | - | - | - | - | - | - |
| Longitud Transversal | - | - | - | - | - | - |
| Velocidad de Desplazamiento | - | - | - | - | - | - |
| Tiempo de permanencia | - | - | - | - | - | - |
| Peening | - | - | - | - | - | - |
| Limpieza Entre Pase | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata |
| Otros | - | - | - | - | - | - |

| ✓ | Tipo de pruebas | Cláusula / Figura (s) Referencia | Criterio de aceptación | Resultado | Comentarios |
|---|-----------------------|----------------------------------|------------------------|-----------|---|
| ✓ | Inspección visual | 4.9.1. | 4.9.1. | Rechazado | Altura de refuerzo excesivo |
| ✓ | Tintas penetrantes | 4.9.1. | 4.9.1. | Rechazado | Altura de refuerzo excesivo |
| ✓ | Examen radiográfico | 4.9.2.1 | 4.9.2.2 | Rechazado | Fusión incompleta, inclusiones de escoria y porosidad |
| ✓ | 4 Doblado lateral | 4.9.3.1/Fig. 4.9 | 4.9.3.3 | Aprobado | Fisura en la raíz y escoria. |
| ✓ | 2 Pruebas de tracción | 4.9.3.4/Fig. 4.10 | 4.9.3.5 | Aprobado | - |

DETALLES DE PRUEBA DE TENSIÓN

| Número de Muestra | Ancho | Espesor | Área | Máxima resistencia a la | Máximo estrés | Tipo de falla y ubicación |
|-------------------|-------|---------|------|-------------------------|---------------|-----------------------------|
| P3A | 20 mm | 12 mm | | 130 KN | 522 MPa | Material base, falla dúctil |
| P3B | 20 mm | 12 mm | | 133 KN | 532 MPa | Material base, falla dúctil |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

DETALLES DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA

| Número de Muestra | Ubicación de la muesca | Dimensiones de la muestra | Prueba de temperatura | Energía Absorbida | Porcentaje de corte | Expansión lateral | Promedio |
|-------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|----------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

CERTIFICACIÓN

| Nombre del soldador | Número de ID. | Número de estampa | Ensayos realizados por | |
|---------------------|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Jorge Guzmán | - | - | Laboratorio | LAEV, LAB-END, LAB-SOLD |
| | | | Número de ensayo | |
| | | | Número de documento | |

Nosotros, los abajo firmantes, certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras de prueba fueron preparadas, soldadas y probadas de acuerdo con los requisitos de la Cláusula 4 de AWS D1.1 / D1.1M, (2015).
Código de soldadura estructural de acero .

| Título | |
|--|-------|
| Análisis de la influencia del silicio en la soldabilidad del acero ASTM A588 mediante el proceso SAW | |
| Nombre | Firma |
| Ivan Andres Garcia Jaramillo | |
| Fecha | |
| 22/11/2019 | |

ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)

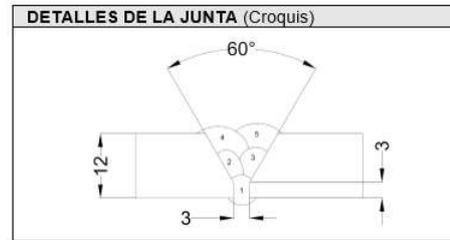
Escuela Politécnica Nacional
 Nombre de la compañía
 Ing. Gabriel Velastegui M. Sc. 22/04/2019
 Autorizado por Fecha

EPN-FIM-IG-04 01 22/04/2019
 WPS No. Rev. No. Fecha
 EPN-FIM-IG-04 N/A
 PQR(s) de respaldo Reporte CVN

| METAL BASE | Especificación | Tipo o grado | AWS Grupo No. |
|----------------------|----------------|--------------|---------------|
| Material Base | ASTM A588 | A | II |
| Soldado a | - | - | - |
| Material de respaldo | - | - | - |
| Otro | | | |

| ESPESOR DE METAL BASE | Soldado | Con TTPS |
|-------------------------|---------|----------|
| Soldadura de ranura CJP | 12 mm | N/A |
| CJP ranura w/CVN | - | - |
| Soldadura de ranura PJP | - | - |
| Soldadura de filete | - | - |
| DIAMETER | - | - |

| DETALLES DE LA JUNTA | |
|------------------------------------|--------|
| Tipo de ranura | A tope |
| Ángulo de ranura | 60° |
| Apertura de raíz | 3 mm |
| Cara de raíz | 3 mm |
| Respaldo | N/A |
| Método | - |
| TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA | |
| Temperatura | N/A |
| Tiempo a la Temperatura | - |
| Otros | - |



| Procedimiento | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Capa(s) de soldadura | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Pase(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Proceso | GMAW | SAW | SAW | SAW | SAW |
| Tipo (Semiautomático, Mecanizado, etc.) | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático |
| Posición | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G |
| Metal de aporte (Espec. AWS) | A5.18 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 |
| Clasificación AWS | ER70S-6 | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K |
| Diámetro de Electrodo | 1,2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm |
| Electrodo/Clasificación de Fundente | N/A | F72A | F72A | F72A | F72A |
| Fabricante/Nombre comercial | N/A | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 |
| Material de aporte suplementario | N/A | - | - | - | - |
| Gas de protección (Composición) | CO ₂ | - | - | - | - |
| Tasa de flujo | 20 l/min | - | - | - | - |
| Tamaño de boquilla | 10,5 mm | - | - | - | - |
| Temperatura de Pre calentamiento | - | - | - | - | - |
| Temperatura Entre Pases | - | - | - | - | - |
| Características Eléctricas | - | - | - | - | - |
| Tipo Corriente & Polaridad | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ |
| Amperios | 87-102 | 180-200 | 260-280 | 190-210 | 240-260 |
| Voltios | 18,3 | 32-35 | 32-35 | 32-35 | 32-34 |
| Velocidad de alimentación de alambre | 3,9 m/min | 2,1 m/min | 3,3 m/min | 2,2 m/min | 3 m/min |
| Velocidad de avance | 0,06 m/min | 0,16 m/min | 0,1 m/min | 0,15 m/min | 0,32 m/min |
| Aporte de Calor Máximo | - | - | - | - | - |
| Técnica | - | - | - | - | - |
| Recto u Oscilatorio | Oscilatorio | Recto | Recto | Recto | Recto |
| Pase Único o múltiple (por lado) | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples |
| Número de Electrodo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Espaciamiento longitudinal de los arcos | - | - | - | - | - |
| Espaciamiento lateral de los arcos | - | - | - | - | - |
| Ángulo entre electrodos paralelos | - | - | - | - | - |
| Ángulo de Electrodo (Mec./Auto.) | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica |
| Normal a la Dirección de avance | - | - | - | - | - |
| Oscilación (Mecanizado/Automático) | - | - | - | - | - |
| Longitud Transversal | - | - | - | - | - |
| Velocidad de Desplazamiento | - | - | - | - | - |
| Tiempo de permanencia | - | - | - | - | - |
| Peening | - | - | - | - | - |
| Limpieza Entre Pase | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata |
| Otros | | | | | |

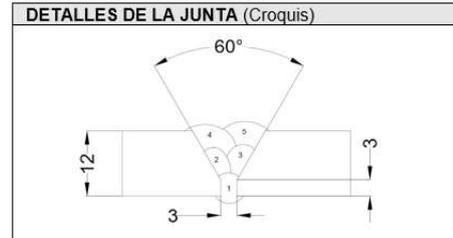
REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL SOLDADOR (PQR)

Escuela Politécnica Nacional
Nombre de la compañíaEPN-FIM-IG-04
WPS No.01
Rev. No.22/04/2019
Fecha

22/04/2019

| METAL BASE | Especificación | Tipo o grado | AWS Grupo No. | Espesor | Tamaño (NPS) | Horario | Diámetro |
|---------------------|----------------|--------------|---------------|---------|--------------|---------|----------|
| Material Base | ASTM A588 | A | II | 12 mm | - | - | - |
| Soldado a | - | - | - | - | - | - | - |
| Material de soporte | - | - | - | - | - | - | - |
| Otro | - | - | - | - | - | - | - |

| DETALLES DE LA JUNTA | |
|------------------------------------|--------|
| Tipo de ranura | A tope |
| Ángulo de ranura | 60° |
| Apertura de raíz | 3 mm |
| Cara de raíz | 3 mm |
| Respaldo | N/A |
| Método | - |
| TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA | |
| Temperatura | N/A |
| Tiempo a la Temperatura | - |
| Otros | - |



| Procedimiento | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| Capa(s) de soldadura | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | |
| Pase(s) de soldadura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Proceso | GMAW | SAW | SAW | SAW | SAW | |
| Tipo (Semiautomático, Mecanizado, etc.) | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | Semiautomático | |
| Posición | 1G | 1G | 1G | 1G | 1G | |
| Metal de aporte (Espec. AWS) | A5.18 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | A5.17 | |
| Clasificación AWS | ER70S-6 | EM12K | EM12K | EM12K | EM12K | |
| Diámetro de Electrodo | 1,2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | 2 mm | |
| Electrodo/Clasificación de Fundente | N/A | F72A | F72A | F72A | F72A | |
| Fabricante/Nombre comercial | N/A | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | Lincolnweld 960 | |
| Material de aporte suplementario | N/A | - | - | - | - | |
| Gas de protección (Composición) | CO ₂ | - | - | - | - | |
| Tasa de flujo | 20 l/min | - | - | - | - | |
| Tamaño de boquilla | 10,5 mm | - | - | - | - | |
| Temperatura de Precalentamiento | - | - | - | - | - | |
| Temperatura Entre Pases | - | - | - | - | - | |
| Características Eléctricas | - | - | - | - | - | |
| Tipo Corriente & Polaridad | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | DC+ | |
| Amperios | 87-102 | 180-200 | 260-280 | 190-210 | 240-260 | |
| Voltios | 18-3 | 32-35 | 32-35 | 32-35 | 32-34 | |
| Velocidad de alimentación de alambre | 3,9 m/min | 2,1 m/min | 3,3 m/min | 2,2 m/min | 3 m/min | |
| Velocidad de avance | 0,06 m/min | 0,16 m/min | 0,1 m/min | 0,15 m/min | 0,32 m/min | |
| Aporte de Calor Máximo | - | - | - | - | - | |
| Técnica | - | - | - | - | - | |
| Recto u Oscilatorio | Oscilatorio | Recto | Recto | Recto | Recto | |
| Pase Único o múltiple (por lado) | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | Múltiples | |
| Número de Electrodo | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Espaciamiento longitudinal de los arcos | - | - | - | - | - | |
| Espaciamiento lateral de los arcos | - | - | - | - | - | |
| Ángulo entre electrodos paralelos | - | - | - | - | - | |
| Ángulo de Electrodo (Mec./Auto.) | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | Mecánica | |
| Normal a la Dirección de avance | - | - | - | - | - | |
| Oscilación (Mecanizado/Automático) | - | - | - | - | - | |
| Longitud Transversal | - | - | - | - | - | |
| Velocidad de Desplazamiento | - | - | - | - | - | |
| Tiempo de permanencia | - | - | - | - | - | |
| Peening | - | - | - | - | - | |
| Limpieza Entre Pase | Grata | Grata | Grata | Grata | Grata | |
| Otros | - | - | - | - | - | |

| ✓ | Tipo de pruebas | Cláusula / Figura (s) Referencia | Criterio de aceptación | Resultado | Comentarios |
|---|----------------------|----------------------------------|------------------------|-----------|------------------------------|
| ✓ | Inspección visual | 4.9.1. | 4.9.1. | Aprobado | - |
| ✓ | Tintas penetrantes | 4.9.1. | 4.9.1. | Rechazado | Presencia de mordeduras |
| ✓ | Examen radiográfico | 4.9.2.1 | 4.9.2.2 | Rechazado | Fusión incompleta y escoria. |
| ✓ | 4 Doblado lateral | 4.9.3.1/Fig. 4.9 | 4.9.3.3 | Aprobado | - |
| ✓ | 2 Ensayo de tracción | 4.9.3.4/Fig. 4.10 | 4.9.3.5 | Aprobado | - |

DETALLES DE PRUEBA DE TENSIÓN

| Número de Muestra | Ancho | Espesor | Área | Máxima resistencia a la tracción | Máximo estrés | Tipo de falla y ubicación |
|-------------------|-------|---------|------|----------------------------------|---------------|-----------------------------|
| PIA | 20 mm | 12 mm | | 125 KN | 525 MPa | Material base, falla dúctil |
| PIB | 20 mm | 12 mm | | 137 KN | 526 MPa | Material base, falla dúctil |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

DETALLES DE LA PRUEBA DE RESISTENCIA

| Número de Muestra | Ubicación de la muesca | Dimensiones de la muestra | Prueba de temperatura | Energía Absorbida | Porcentaje de corte | Expansión lateral | Promedio |
|-------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|----------|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

CERTIFICACIÓN

| Nombre del soldador | Número de ID. | Número de estampa | Ensayos realizados por | |
|---------------------|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Jorge Guzmán | - | - | Laboratorio | LAEV, LAB-END, LAB-SOLD |
| | | | Número de ensayo | |
| | | | Número de documento | |

Nosotros, los abajo firmantes, certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras de prueba fueron preparadas, soldadas y probadas de acuerdo con los requisitos de la Cláusula 4 de AWS D1.1 / D1.1M, (2015).
Código de soldadura estructural de acero.

| | |
|--|-------|
| Título | |
| Análisis de la influencia del silicio en la soldabilidad del acero ASTM A588 mediante el proceso SAW | |
| Nombre | Firma |
| Ivan Andres Garcia Jaramillo | |
| Fecha | |
| 11/20/2019 | |