

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EFFECTO DE LAS REPARACIONES CON PROCESO GMAW EN LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DE UNIONES
SOLDADAS DE ACEROS ASTM A633 POR EL PROCESO SAW PARA LA
FABRICACIÓN DE COMPONENTES ESTRUCTURALES DE EQUIPO
PESADO PARA MINERÍA**

POR

MANUEL EDUARDO VALENZUELA HIPÓLITO

TESIS

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

Acuña, Coahuila, México, Diciembre de 2011

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EFFECTO DE LAS REPARACIONES CON PROCESO GMAW EN LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DE UNIONES
SOLDADAS DE ACEROS ASTM A633 POR EL PROCESO SAW PARA LA
FABRICACIÓN DE COMPONENTES ESTRUCTURALES DE EQUIPO
PESADO PARA MINERÍA**

POR

MANUEL EDUARDO VALENZUELA HIPÓLITO

TESIS

**EN OPCIÓN COMO MAESTRO EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

Acuña, Coahuila, México, Diciembre de 2011

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis “EFECTO DE LAS REPARACIONES CON PROCESO GMAW EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DE UNIONES SOLDADAS DE ACEROS ASTM A633 POR EL PROCESO SAW PARA LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES ESTRUCTURALES DE EQUIPO PESADO PARA MINERÍA”, realizada por el alumno **MANUEL EDUARDO VALENZUELA HIPÓLITO**, con número de matrícula **10-MS026**, sea aceptada para su defensa como Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial

El Comité Tutorial



MC. Víctor Hugo López Cortez
Tutor Académico



Ing. Edward Gerhardt
Tutor de Planta

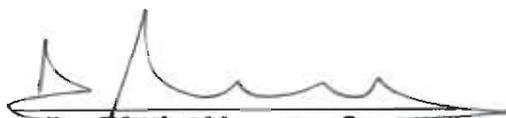


Vo.Bo.
MC. Claudia Araceli González Rodríguez
Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado de el alumno **MANUEL EDUARDO VALENZUELA HIPÓLITO** , una vez leída y revisada la Tesis titulada **“EFECTO DE LAS REPARACIONES CON PROCESO GMAW EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DE UNIONES SOLDADAS DE ACEROS ASTM-A633—POR EL PROCESO SAW PARA LA FABRICACION DE COMPONENTES ESTRUCTURALES DE EQUIPO PESADO PARA MINERÍA”**, aceptamos que la referida Tesis revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Tecnología de la Soldadura Industrial durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 20 días del mes de diciembre del año 2011.



Dr. Efraín Almanza Casas
Presidente



**Dr. Felipe Arturo Reyes
Valdés**
Secretario



MC. Víctor Hugo López Cortez
Vocal

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo a mi esposa Ana y a mis hijos Ana Karina y Kevin Eduardo quienes me sirvieron de estímulo para el logro de este meta profesional y a quienes en más de una ocasión tuve que solicitar su apoyo y comprensión para poder combinar con ellos mi tiempo a su lado y las actividades que este importante programa de Maestría me demandó.

Quiero también agradecer al Gerente de nuestra empresa Equipos de Acuña S.A. DE C.V., el Ingeniero Jorge Robles cuyo apoyo fue vital para que este importante programa de Maestría pudiera llevarse a cabo.

A todos mis Maestros del programa, quienes con su paciencia y dedicación lograron transferir un gran cúmulo de conocimientos que sin lugar a dudas serán una herramienta muy importante en el futuro para el logro de nuestros objetivos tanto académicos como profesionales. Un especial agradecimiento a mis asesores académicos M.C Víctor Hugo López Cortez y MC. Gabriel García Cerecero, así como a la Maestra Maria Eugenia Herrera por su gran entusiasmo y motivación para el seguimiento y conclusión de las diferentes actividades del programa.

A mis compañeros, con quienes durante estos más de tres años que estuvimos juntos tuve la oportunidad y el privilegio de vivir un gran número de experiencias gratificantes

También quiero expresar mi agradecimiento a los Ingenieros Mauro Martinez, Francisco García, e Ignacio Arturo Porras, así como al soldador calificado Armando Cruz, todos ellos me proporcionaron un gran apoyo en la elaboración de las probetas de laboratorio.

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Justificación de la investigación	4
1.2 Objetivo general	4
1.3 Objetivos específicos	4
1.4 Preguntas de la investigación	4
1.5 Alcance de la investigación	5
1.6 Hipótesis	5
1.7 Impacto esperado	5
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW)	7
2.1.1 Generalidades	7
2.1.2 Principios de funcionamiento	8
2.1.3 Métodos de aplicación del proceso SAW	10
2.1.3.1 Método automático	10
2.1.3.2 Método semiautomático	10
2.1.3.3 Soldado por máquina	11
2.1.4 Equipo utilizado en el proceso SAW	11
2.1.4.1 Fuentes de energía	11
2.1.4.2 Cabezales y antorchas	12
2.1.4.3 Equipos de movimiento	12
2.1.4.4 Unidades de recuperación de fundentes	13
2.1.4.5 Posicionadores y herramientas	14
2.1.5 Materiales soldados con proceso de arco sumergido (SAW)	14
2.1.5.1 Metal base	14
2.1.6. Electrodos	19
2.1.7 Fundentes	29
2.1.7.1 Clasificación de los fundentes	29
2.2 Defectos del proceso SAW	31
2.2.1 Porosidad	31
2.2.2 Grietas inducidas por hidrógeno	33
2.2.3 Grietas por solidificación	33
2.2.4 Soplo de arco	38
2.2.5 Fusión incompleta	38
2.2.6 Penetración de junta incompleta	39

2.2.7 Inclusiones	40
2.2.8 Socavados	41
2.2.9 Falta de llenado	42
2.2.10Traslapes	43
2.2.11Convexidad	44
2.2.12 Chisporroteo	45
2.3 Proceso de soldadura al arco con alambre protegido por gas (GMAW)	46
2.3.1 Generalidades	46
2.3.2 Equipo	47
2.3.3 Mecanismos de transferencia del metal	49
2.3.3.1 Transferencia de cortocircuito	50
2.3.3.2 Transferencia globular	52
2.3.3.3 Transferencia por rocío	53
2.3.3.4 Transferencia pulsada	55
2.3.3.5 Transferencia por puntos	56
2.3.3.6 Ventajas del proceso GMAW	57
2.3.3.7 Limitaciones del proceso	57
2.3.4 Electrodos	58
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	59
3.1 Determinación de variables del proceso de arco sumergido (SAW)	59
3.2 Diseño de experimentos	59
3.3 Elaboración de probetas de soldadura	60
3.4 Realización de pruebas de laboratorio	65
3.4.1 Pruebas metalográficas	65
3.4.2 Pruebas de análisis químico de los metales de aporte	65
3.4.2.1 Acero ASTM 633 grado E	65
3.4.2.2 El metal de aporte	65
3.4.3 Pruebas mecánicas	65
3.4.3.1 Ensayo de tensión	66
3.4.3.2 Ensayo de microdureza	66
3.4.3.3 Prueba de macroataque	67
3.4.3.4 Ensayo de impacto	67
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
4.1 Pruebas metalográficas	69
4.2 Análisis químico	73
4.3 Pruebas mecánicas	74

4.3.1 Ensayo de resistencia a la tensión en la soldadura	74
4.3.2 Ensayo de microdureza	75
4.3.3 Prueba de macroataque	77
4.3.4 Prueba de impacto	79
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	82
BIBLIOGRAFÍA	86
LISTADO DE FIGURAS	89
LISTADO DE TABLAS	92
AUTOBIOGRAFÍA	93

SÍNTESIS

Este trabajo tiene como finalidad realizar un análisis para determinar cuál es el impacto del proceso de reparación que se sigue para recuperar algunos de los componentes fabricados que no pasan la inspección de calidad cuando se realiza a dichos componentes una prueba no destructiva de ultrasonido después de que los componentes son soldados.

Se sigue la metodología del método científico que permite seguir paso a paso desde el planteamiento del problema, pasando por el establecimiento de los objetivos, las pruebas de hipótesis, la revisión de conceptos fundamentales y estado del arte de los procesos de soldadura utilizados para fabricar los componentes que es el proceso de soldadura de arco sumergido (SAW por sus siglas en inglés) y el proceso de soldadura utilizado para la reparación de los componentes, el cual es el proceso de soldadura con protección de gas (GMAW por sus siglas en inglés).

Durante el proceso de experimentación se realizarán pruebas tanto mecánicas como metalográficas para conocer el comportamiento de los materiales en las diferentes zonas del componente: Metal base, zona afectada por el calor y la soldadura. En la fase de experimentación se pretende demostrar por medio del uso de las diferentes técnicas tales como metalografías, análisis químico, pruebas mecánicas (como el ensayo de tensión, ensayo de microdureza y ensayo de impacto), cómo el proceso de reparación realizado una, dos y hasta tres veces, puede afectar las propiedades de los materiales.

El conocimiento adquirido servirá para realizar algunas recomendaciones a la empresa para evitar que posteriormente al proceso de fabricación se tengan problemas de garantías debido a la falla de alguno de los componentes cuando el producto este sometido a las condiciones extremas de trabajo para el cual fue diseñado.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La empresa en donde se realizará este proyecto se dedica a la producción de equipo y maquinaria pesada para minería. Para la fabricación de los componentes, se utilizan varios procesos de manufactura, tales como corte de placa de acero con tecnologías de plasma, láser, oxi-gas, biseladoras semiautomáticas, prensas de alto tonelaje (350T y 750T), limpieza del acero por golpeteo, por chorro de arena y de partículas metálicas, maquinados CNC y tradicionales, pintura industrial y el ensamble de los sistemas neumático, eléctrico e hidráulico. También se utilizan varios procesos de soldadura entre los que destaca el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW por sus siglas en inglés) como uno de los procesos de soldadura principales para la fabricación de los componentes mayores del producto final.

Además del proceso SAW son utilizados también algunos otros procesos de soldadura tales como el proceso de soldadura con protección de gas (GMAW), el proceso de soldadura con electrodo de tungsteno (GTAW) y el proceso de soldadura con núcleo de fundente (FCAW) (todos ellos con sus abreviaciones por sus siglas en inglés).

1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Durante la fabricación de uno de los ensambles principales, es necesario realizar un proceso de reparación de las unidades producidas, debido a que se detectan a través de la prueba de ultrasonido ciertas indicaciones las cuales posteriormente son catalogadas como defectos. El proceso de reparación se puede repetir hasta en tres ocasiones. El proceso de reparación consiste en “escarbar” el área del defecto y volver a cubrir con soldadura hasta que el defecto es eliminado.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Determinar cuál es el efecto de las reparaciones en las propiedades mecánicas y microestructurales de las uniones soldadas.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar cómo el proceso de reparación de componentes; utilizando el proceso de soldadura GMAW, modifica la estructura metalográfica de la unión soldada.
- Determinar cómo el proceso de reparación de soldadura modifica las propiedades de tensión, dureza y tenacidad del material y cómo afecta éstos cambios el desempeño de la unión soldada

1.3 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el efecto de la reparación en las propiedades mecánicas del material?

¿Cuál es el efecto de la reparación en las propiedades microestructurales del material?

¿Cuántas reparaciones es recomendable realizar sin que se degraden las propiedades mecánicas y microestructurales del material, sin que afecten el desempeño de las uniones soldadas?

1.4 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se pretende realizar hasta determinar el efecto de las reparaciones en las propiedades mecánicas y microestructurales del acero ASTM A633 grado E utilizado en la fabricación de los componentes principales de productos para la industria minera.

1.5 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Ho: El proceso de retrabajo afecta las propiedades mecánicas y microestructurales del material.

Ha: El método de retrabajo NO afecta las propiedades mecánicas y microestructurales del material

1.6 IMPACTO ESPERADO

- Elaboración de un estudio que permita a la empresa conocer el efecto de las reparaciones; tanto en las propiedades mecánicas como microestructurales, a las que se someten los materiales utilizados en la fabricación de los lados del chasis principal de la camioneta para mina.
- Elaborar recomendaciones para la mejora sustancial de los procesos actuales mediante la implementación de mejoras tecnológicas tales

como la semiatomatización de los procesos que presentan problemas causados por el factor humano.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW)

2.1.1 GENERALIDADES [1]

El proceso de arco sumergido es un proceso que permite soldar a relativamente altas velocidades y al mismo tiempo permite la automatización. Este proceso es efectivo para soldar espesores de 5 mm, o más ya que permite una muy buena penetración y además se protege del medio ambiente mediante la adición simultánea del fundente en forma granular que cubre por completo el arco eléctrico.

Una de sus principales desventajas es que sirve únicamente para soldar en posiciones planas y horizontales (aun en circunferencias) por lo que es impráctico para otras posiciones.

En este proceso se pueden emplear altas corrientes en la soldadura, sin experimentar un arco eléctrico violento. La corriente aplicada en este proceso

es normalmente cuatro o cinco veces más alta de la que se aplica en los procesos SMAW o GMAW debido a que el arco eléctrico sumergido en el fundente permite una fusión suave sin experimentar explosiones como en el caso de los procesos de protección gaseosa.

En el presente trabajo se pretende hacer un análisis detallado del proceso SAW utilizado en la fabricación de tres de los subensambles principales: lados del chasis principal, eje trasero y eje delantero; en la construcción de camionetas para mina de alto tonelaje y determinar cuáles son los mecanismos que generan las discontinuidades y los constantes retrabajos durante el proceso actual y sugerir soluciones prácticas que permitan elevar los niveles de productividad en los procesos actuales.

2.1.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO [1]

En la soldadura por arco sumergido el extremo de un electrodo continuo de alambre desnudo se inserta en el montículo del fundente que cubre el área de unión que se va a soldar, se enciende el arco. A continuación, un mecanismo alimentador de alambre comienza a introducir el electrodo en la unión a una velocidad controlada, y el alimentador se desplaza, manual o automáticamente a lo largo de la soldadura. En la soldadura mecanizada o automática, el trabajo puede desplazarse debajo de un alimentador de alambre estacionario.

En el proceso por arco sumergido, el arco es cubierto por un fundente. Este fundente juega un rol importante en tres puntos principales:

- 1) La estabilidad del arco es dependiente del fundente.
- 2) Las propiedades mecánicas y químicas pueden ser controladas por el fundente.
- 3) La calidad de la soldadura puede ser afectada por el cuidado y manejo del fundente.

El proceso de arco sumergido es un proceso de producción de soldadura versátil, capaz de realizar soldaduras con corrientes eléctricas por encima de los 2,000 amperios, se puede utilizar corriente directa (dc) o corriente alterna (ac), utilizando cables simples o múltiples o tiras de metal de aporte. Ambas fuentes de energía (dc o ac) pueden ser utilizadas en la misma soldada y al mismo tiempo.

En todo momento, se alimenta fundente adicional delante del electrodo a su alrededor y se distribuye continuamente sobre la unión. El calor producido por el arco eléctrico funde progresivamente parte del fundente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base, creando un charco de metal fundido debajo de una capa de escoria líquida (Figura 2.1)

El baño fundido cerca del arco presenta mucha turbulencia y burbujas de gas que ascienden rápidamente a la superficie del charco. El fundente flota sobre el metal derretido y protege por completo de la atmósfera la zona de soldadura.

El manto de fundente que flota sobre el charco de soldadura evita que los gases atmosféricos contaminen el metal de soldadura, y disuelve las impurezas del metal y el electrodo, que entonces flotan sobre el charco. Además, el fundente puede agregar ciertos elementos de aleación al metal de soldadura, o extraerlos de él. Al avanzar la zona de soldadura a lo largo de la unión, el metal de aporte se funde primero y luego el fundente, posteriormente se enfrían y solidifican. Los factores que determinan en dónde utilizar el proceso de arco sumergido incluyen:

- 1) La composición química y las propiedades mecánicas requeridas del depósito final.
- 2) Espesor del metal base a ser soldado.
- 3) Accesibilidad de la junta.
- 4) Posición en la cual la soldadura debe ser hecha.

5) Frecuencia o volumen de la soldadura a ser realizada.

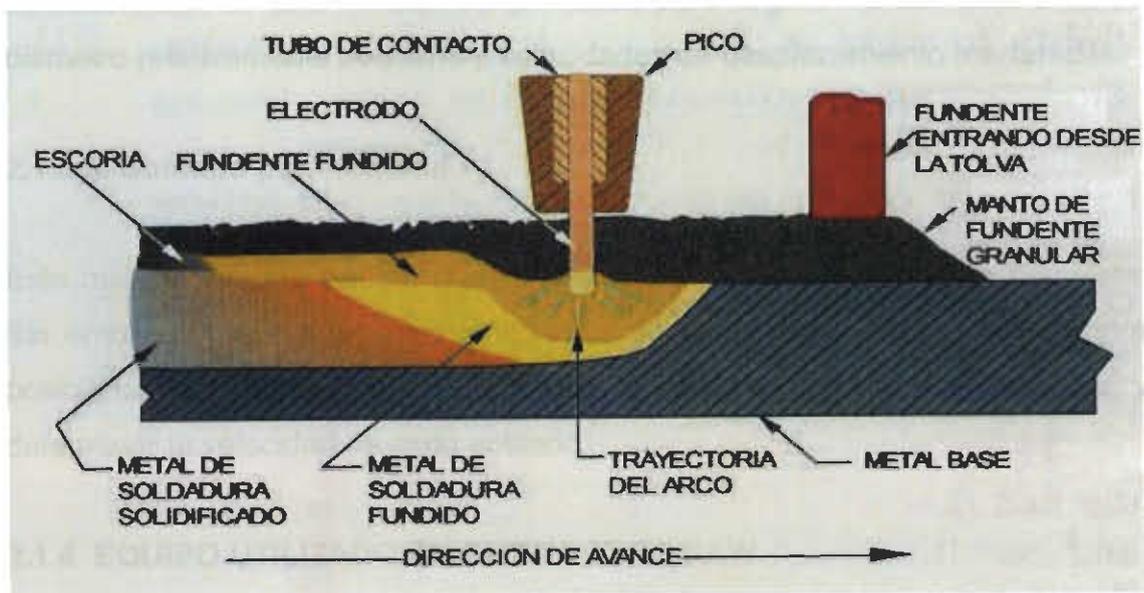


Figura 2.1 Vista de un proceso de soldadura por arco sumergido [10]

2.1.3 MÉTODOS DE APLICACIÓN DEL PROCESO SAW

El proceso por arco sumergido se puede aplicar [1] en tres modos distintos:

- 1) Automático.
- 2) Semiautomático y mecanizado
- 3) Soldado por máquina

2.1.3.1 Método automático

En este método es hecho con un equipo que realiza la operación de soldado sin requerir la presencia de un operario para continuamente monitorear y ajustar los controles. El equipo auto-regulable de alto costo puede ser justificado a fin de alcanzar altas tasas de producción.

2.1.3.2 Método semiautomático

El método semiautomático se realiza con una pistola de soldadura manual, la cual tanto el electrodo como el fundente. El electrodo es dirigido por un alimentador de cable. El fundente puede ser suministrado por gravedad montado sobre la pistola o alimentado por presión a través de la manguera. Las

características de este método es que utiliza para la guía manual electrodos de diámetro relativamente pequeño y velocidades de desplazamiento moderadas.

2.1.3.3. Soldado por máquina

Este método emplea equipo que realiza la operación de soldadura completa. Sin embargo, este debe ser monitoreado por un operario de soldadura para posicionar la pieza e iniciar y detener la máquina, ajustar los controles y determinar la velocidad de cada soldado.

2.1.4 EQUIPO UTILIZADO EN EL PROCESO SAW

El equipo requerido por el proceso de arco sumergido [1] consiste de:

- 1) Una fuente de energía
- 2) Un sistema de entrega del electrodo
- 3) Un sistema de distribución de fundente
- 4) Un sistema de arreglo de viaje del carro
- 5) Un sistema de control del proceso.

2.1.4.1 Fuentes de energía

La fuente de energía seleccionada para un sistema de arco sumergido juega un rol primordial. Algunos tipos de fuentes de energía son adecuados para procesos SAW. Una fuente de energía de corriente directa (dc) puede ser un transformador-rectificador o motor o una máquina generadora; la cual proporciona un voltaje constante (vc), corriente constante (cc) o una salida seleccionada vc/cc. Las fuentes de energía de corriente alterna (ac) son generalmente tipos de transformadores, y pueden proporcionar ambas salidas cc o vc de salida de onda cuadrada. Debido a que el proceso SAW es generalmente un proceso de corriente eléctrica elevada con ciclos de alta

duración, una fuente de energía capaz de proporcionar alto amperaje a 100% es recomendada.

2.1.4.2 Cabezales y antorchas

En el SAW el cabezal comprime el motor alimentador del cable y el ensamble del rollo alimentador, el ensamble de la antorcha y la punta de contacto y los accesorios para montar y posicionar el cabezal. Una boquilla para el fundente es generalmente montada en el cabezal para depositar en cualquiera de las dos formas, ligeramente adelante, o concéntrica con el cable de soldado. Los motores alimentadores de cable son típicamente de alta duración motores con un tipo de imán permanente con reductores integrales de la caja de engranes alimentando cables a velocidades con rangos de 20 a 550 pulgadas por minuto (8 a 235 mm. por segundo)

Los diseños de ensamble de la antorcha son numerosos, pero su propósito es siempre el mismo. El ensamble de la antorcha guía el cable a través de la punta de contacto hasta la zona de soldado y también entrega la energía al cable en la punta de contacto.

2.1.4.3 Equipos de movimiento

El cabezal de movimiento en el proceso SAW es generalmente proporcionado por un carro tipo tractor, una viga de carga, o un manipulador. El tractor proporciona un movimiento en uniones de soldadura rectas o ligeramente curvas moviéndose a través de las junta o viajando en la misma pieza. En unidades sin guías, se utilizan ruedas como guías o algún otro tipo de dispositivo de seguimiento mecánico de la junta. El control del cabezal, el alimentador de cable y el contenedor del fundente son generalmente montados en el tractor. Las velocidades máximas de desplazamiento posibles con tractores son cerca de 100 pulgadas por minuto (42 mm por segundo). Los

tractores son de mayor utilidad donde se requiere de una relativa portabilidad debido a que la pieza de trabajo no puede ser movida.

Los cartuchos de la viga lateral proporcionan un movimiento lineal únicamente, y son capaces de viajar a velocidades de 200 pulgadas por minuto (85 mm por segundo).

Debido a que los sistemas de viga son generalmente fijos y que la pieza de trabajo debe ser traída a la estación de soldado, su mayor uso es para soldadura en taller, el cabezal de soldadura, el cable, el alimentador de fundente y algunas veces el control, se montan sobre el cartucho.

Los manipuladores son similares a las vigas laterales, estas son fijas y la pieza de trabajo debe ser traída al soldador. Los manipuladores son más versátiles que las vigas ya que son capaces de realizar movimientos lineales en tres ejes. El cabezal, el cable, el alimentador de fundente y frecuentemente el control y el operador viajan sobre el manipulador.

2.1.4.4 Unidades de recuperación del fundente

Las unidades de recuperación son frecuentemente utilizadas para maximizar la utilización y minimizar la limpieza manual. Las unidades de recuperación pueden hacer cualquiera de las siguientes actividades o combinaciones de ellas:

- 1) Remover fundente no fundido y la escoria fundida detrás del cabezal de soldadura.
- 2) Localizar escoria fundida y otro material de mayor tamaño.
- 3) Remover partículas magnéticas.
- 4) Remover partículas finas.
- 5) Recircular el fundente de regreso al contenedor para ser reutilizado.
- 6) Calentar el fundente en el contenedor para mantenerlo seco.

2.1.4.5 Posicionadores y herramientas

Debido a que el proceso SAW es limitado a posiciones de soldado planas, los equipos posicionadores y herramientas relacionados tienen un amplio campo de aplicación.

2.1.5 MATERIALES SOLDADOS CON PROCESO DE ARCO SUMERGIDO (SAW)

El proceso de arco sumergido es utilizado para fabricar la mayoría de los materiales en uso hoy en día. Desde aceros al carbón hasta exóticas aleaciones con base níquel.

2.1.5.1 Metal base

Los siguientes son clasificaciones generales de metales bases soldados:

- 1) Aceros al carbono con porcentajes de carbono mayores al 0.29 por ciento.
- 2) Aceros de baja aleación (por arriba de los 100 Ksi de esfuerzo de cedencia)
- 3) Aceros al cromo-molibdeno (desde 0.5 hasta el 9% de Cr y 0.5 hasta 1 % de Molibdeno)
- 4) Aceros inoxidable
- 5) Aleaciones base níquel

Las composiciones de aleación que pueden ser utilizadas con el proceso de arco sumergido se expanden con la disponibilidad de electrodos apropiados y fundentes. Las combinaciones de electrodos y fundentes son generalmente clasificadas por especificaciones de código.

La información de combinaciones especiales para metales base que son mucho menos utilizados se pueden obtener directamente de los fabricantes de fundentes.

El material base [3] que es utilizado en este estudio es el acero A633, este material es particularmente apropiado para servicios a temperaturas ambientes bajas de $-50\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tiene cuatro grados asignados A, C, D, y E.

El grado A proporciona un punto mínimo de cedencia de 42 Ksi (290 MPa) en espesores de hasta 4 pulgadas (100 mm), los grados C y D proporcionan un punto mínimo de cedencia de 50 Ksi (345 MPa) en espesores por encima de 2.5 pulgadas (65 a 100 mm). El grado E proporciona un punto mínimo de cedencia de 60 Ksi (415 MPa) en espesores hasta de 4 pulgadas (100mm) y de 55 Ksi (380 MPa) en espesores por encima de 4 y hasta 6 pulgadas (100-150 mm).

Yaowu Shia y otros [4] trabajaron a finales del año 2007 en la explicación del efecto del ciclo térmico sobre la microestructura y la resistencia a la fractura mediante la simulación de la zona afectada por el calor en aceros de alta resistencia y baja aleación de 800 MPa. Ellos enfatizaron que se debe tomar en consideración para la fabricación de los mismos, cuáles serán las condiciones de trabajo a las que equipos como bulldozers, excavadoras, cargadoras, taladros, palas mecánicas etc. serán sometidos y es por ellos que se tienen requisitos específicos de fabricación de estos equipos.

Además de impactos complejos y fatiga por cargas, el equipo puede estar sujeto a muy bajas temperaturas durante el invierno, por ello la resistencia de las uniones soldadas es muy importante; por lo que tanto la selección de consumibles de soldadura así como los procedimientos de soldadura son de extrema importancia.

Bajo los efectos térmicos durante la soldadura, ocurren cambios evidentes en la microestructura y en las propiedades en el metal base adyacente al metal soldado. Algunas veces, el cambio en la microestructura puede dirigir a una

fragilización local en la zona afectada por el calor (HAZ). Adicionalmente defectos, concentradores de esfuerzos y elevados esfuerzos residuales pueden coexistir fácilmente en la unión soldada. Así, las fallas por fractura de una soldadura no se pueden prevenir totalmente.

La zona afectada por el calor de una unión soldada es muy angosta en el ancho y consiste de muchas regiones finas que tienen diferentes estructuras. Cuando la resistencia a la fractura es medida utilizando soldaduras reales, el resultado puede representar una propiedad global de la zona afectada por el calor y los resultados medidos pueden no ser utilizados para describir las propiedades de la región fina, por lo que es muy difícil analizar el efecto de una caracterización microestructural de la resistencia a la fractura, utilizando una soldadura real, es por ello que se creó la técnica de simulación térmica y la comprensión de la relación entre la microestructura y las propiedades de la unión soldada llega a ser más fácil. Por supuesto, la técnica de simulación térmica de la soldadura como otras técnicas tiene desventajas, por ejemplo, el tamaño de grano del espécimen simulado es ligeramente mayor que el de la unión soldada real cuando se experimenta un perfil técnico idéntico. Aunque el resultado simulado puede no reflejar completamente la unión soldada real, la técnica de simulación térmica se convierte en una herramienta importante y poderosa en el campo de la metalurgia física de la soldadura y el proceso de rolado del acero.

De acuerdo a las características metalográficas de los aceros HSLA, el calor de entrada del proceso de soldadura afecta significativamente las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor. En el estudio, se utilizaron especímenes de simulación térmica simulada para investigar el efecto del tiempo de enfriamiento de la soldadura y la temperatura pico sobre la resistencia a la fractura y las características microestructurales de la zona afectada por el calor en un acero HSLA grado de 800 MPa.

Yaowu Shi y otros autores (2008) utilizaron especímenes con simulación térmica para investigar el efecto del tiempo de enfriamiento de la soldadura y temperatura pico en características de resistencia a la fractura y la microestructura característica de la zona afectada por el calor (HAZ) para un acero de baja aleación, alta resistencia de 800 MPa.

Los autores encontraron que la resistencia a la fractura es mejor para la zona afectada por el calor simulada para grano grueso, cuando el tiempo de enfriamiento es de 18 segundos ($t=8/5$). Además, el tamaño del grano austenítico anterior, y la fracción del volumen de la ferrita bainítica y los constituyentes M/A aumentan con el incremento del tiempo de enfriamiento. Sin embargo, la fracción del volumen de martensita disminuye con el incremento del tiempo de enfriamiento. Un decremento considerable en la resistencia es observada con el incremento del tamaño de grano austenítico y la fracción del volumen del microconstituyente M/A. Más aún, existe el efecto de orientación sobre la resistencia a la fractura para los especímenes sujetos al ciclo térmico de la soldadura. Generalmente, la resistencia a la fractura de la HAZ simulada con una orientación L-T es mayor que una con orientación T-L. La razón de esto último puede estar relacionado a la estructura de listones formados durante el rolado y que permanece después de la simulación térmica. También la investigación muestra que la resistencia en la zona de grano grueso es mayor que la zona de grano fino para la zona afectada por el calor simulada. La razón puede estar relacionada con la evolución de la microestructura de la HAZ durante el ciclo térmico completo utilizado en la simulación.

En los experimentos, los parámetros de ciclo térmico fueron seleccionados en base a experimentos de soldadura GMAW reales. En realidad, en este trabajo la temperatura pico y las velocidades de enfriamiento en los ciclos térmicos fueron bien diseñados para simular la posible historia del calentamiento y las posibles microestructuras de la zona afectada por el calor ocurridas en la producción de soldaduras reales.

La Figura 2.2 muestra el efecto del tiempo de enfriamiento en las superficies de fractura de los especímenes simulados cuando el tiempo es $t=8/5$

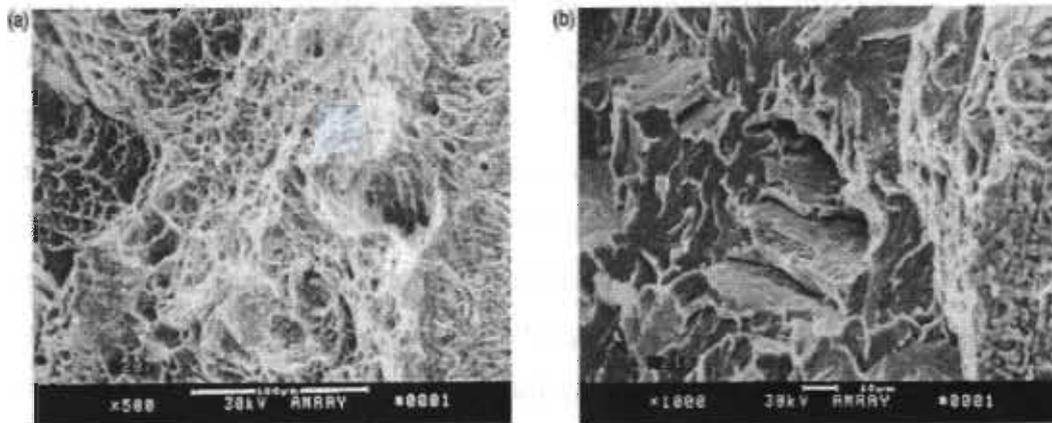


Figura 2.2 Superficies de fractura de una grieta de un espécimen simulado térmicamente
a) $T=18$ segundos b) $T=100$ segundos [4]

La microestructura del grano austenítico previo para el grano grueso de la Z.A.C simulada se muestra en la Figura 2.3. Es claro que la microestructura en forma de banda producida por el proceso de rolado permanece. Aunque la alta temperatura de calentamiento de $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ se mantuvo durante la simulación térmica, los elementos aleantes pueden no estar completamente disueltos. La razón de esto, es que la velocidad de calentamiento es muy rápida y el tiempo que permanece a esta alta temperatura es muy corto para el proceso de soldadura simulado. Así, la dirección de rolado permanece después de la simulación térmica de soldadura.

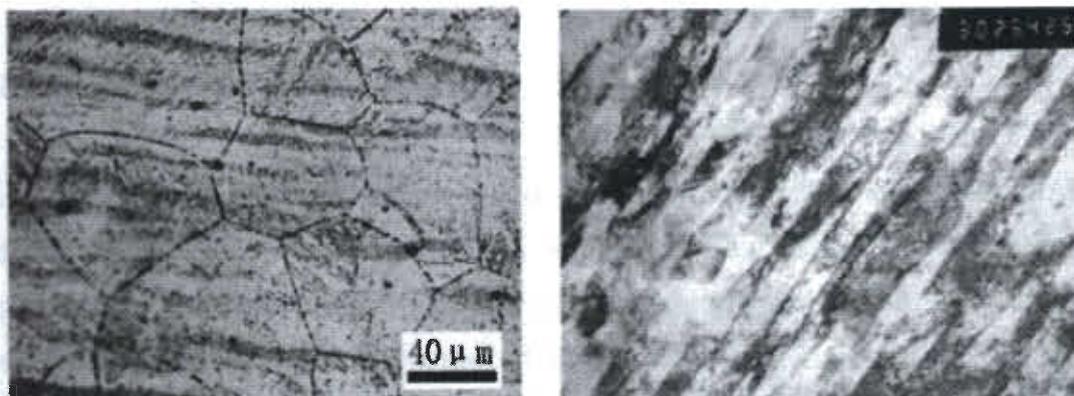


Figura 2.3 a) ZAC con grano grueso simulado con bandas como microestructura
b) Listones de martensita a $50,000\text{ X}$ con microscopio electrónico de transmisión [4]

La resistencia a la fractura deteriorada drásticamente para el espécimen simulado y sujeto al ciclo térmico con una temperatura pico de 800 °C se debe a la formación de una mezcla de microestructuras en la parcialmente transformada zona afectada por el calor; tal como se observa en la Figura 2.4 , la distribución del constituyente M/A de la zona parcialmente transformada esta en forma de red. El mecanismo de formación de la red del constituyente M/A puede ser de la siguiente manera: Calentando a la temperatura pico de 800 °C , los carburos distribuidos en los límites de grano pueden disolverse y entrar en la fase de austenita transformada. Debido a una menor temperatura de calentamiento, la difusión del carbono se dificulta , así el carbono enriquece los límites, entonces la distribución de la red del constituyente M/A se forma después del enfriamiento. La distribución de la red del constituyente M/A puede también causar un mayor deterioro a la resistencia.

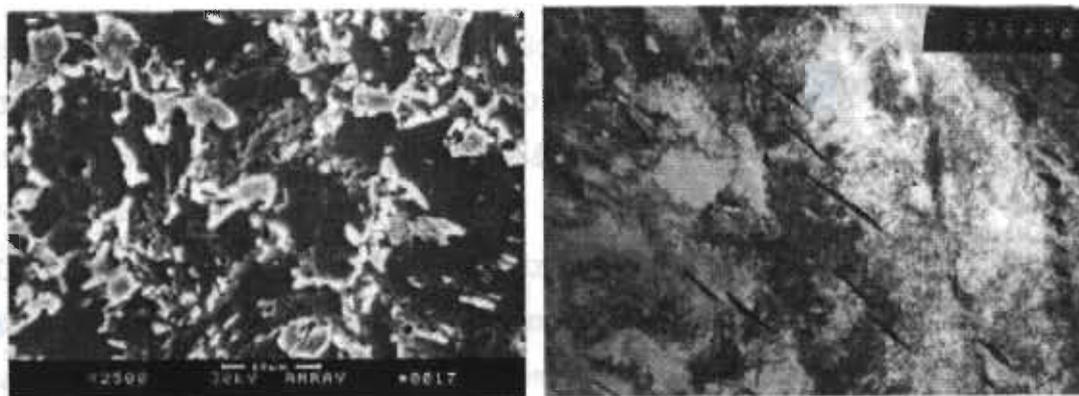


Figura 2.4 a) Constituyente de M/A de ZAC con fase parcialmente transformada
b) Estructura Ferrita-Bainita a 20,000 X con microscopio electrónico de transmisión [4]

2.1.6 ELECTRODOS [6]

Los electrodos para arco sumergido producen depósitos de soldadura que empatan con los aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros de alto carbono, aceros de aleaciones especiales, aceros inoxidable, aleaciones de níquel y aleaciones especiales para aplicaciones superficiales. Estos electrodos son suministrados como un cable desnudo sólido y como electrodos compuestos de metal cubierto Los fabricantes de electrodos los preparan

logrando duplicar las aleaciones complejas, encerrando los elementos de aleación requeridos en un tubo u otras composiciones disponibles. Los electrodos son empacados normalmente como rollos o tambores con rangos de pesos desde 25 hasta 1,000 libras (11 a 454 Kg). Paquetes grandes de electrodo, son más económicos e incrementan la eficiencia operativa y eliminan el desperdicio de terminación del cable.

Los electrodos de acero son generalmente cubiertos con cobre excepto para aquellos materiales de soldadura resistentes a la corrosión o para ciertas aplicaciones nucleares. La cubierta de cobre proporciona una buena protección para la vida durante el almacenaje, disminuye el desgaste con la vestimenta del cable y mejora la conductividad eléctrica.

Los electrodos se empacan para asegurar una vida prolongada durante el almacenaje cuando son almacenados dentro de las instalaciones bajo condiciones normales. Los electrodos de arco sumergido varían en tamaño desde 1.6 a 6.4 mm ($\frac{1}{16}$ " a $\frac{1}{4}$ ") en diámetro.

G. Magudeeswaran, y otros [5] realizaron un estudio a finales del año 2007, sobre el efecto de los consumibles de los procesos de soldadura en el ciclo de vida a la fatiga que tienen las uniones de los aceros templados y revenidos de alta resistencia. Ellos realizaron un intento para explorar un consumible alterno que reemplazara los costosos consumibles de aceros austenítico inoxidable (ASS) utilizado para la soldadura de aceros templados y revenidos. En el estudio, aceros inoxidables austeníticos y aceros ferríticos de bajo hidrógeno fueron utilizados para fabricar las uniones en procesos de soldadura por electrodo revestido (SMAW) y soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW). La uniones fabricadas utilizando consumibles de aceros ferríticos de bajo hidrógeno mostraron un desempeño superior a la fatiga que aquellos fabricados y utilizando consumibles de aceros austeníticos inoxidables (ASS).

Los aceros templados y revenidos son utilizados en aplicaciones militares debido a su elevada dureza y alta resistencia con respecto al radio del peso y a su excelente tenacidad. Estos aceros son proclives al agrietamiento inducido por hidrógeno después de soldar y también este tipo de aceros exhiben una suave zona afectada por el calor seguida de un desempeño balístico pobre.

Los consumibles de acero inoxidable están siendo utilizados para el soldado de aceros templados y revenidos (Q&T), como tienen mayor solubilidad al hidrógeno en la fase austenítica, para evitar agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC). Pero la utilización de acero inoxidable como material de aporte debe ser evitado debido a que los aportes no inoxidables (ASS) son mucho más costosos.

En años recientes, el desarrollo de consumibles de aceros ferríticos de bajo hidrógeno (LHF) que contienen compuestos no higroscópicos, son utilizados para la soldadura de aceros templados y revenidos. Las soldaduras de los aceros templados y revenidos deben de tener una buena calidad especialmente cuando son utilizados para la construcción de vehículos de combate en aplicaciones militares. La mayoría de éstos son elaborados mediante el proceso de soldadura de fusión y se les demanda alta calidad en la soldadura. El proceso de soldadura por electrodo revestido (SMAW) y el proceso FCAW son dos procesos ampliamente utilizados en la fabricación de vehículos de combate.

Los procesos de soldadura automáticos son preferidos sobre los procesos manuales para la fabricación de uniones soldadas por un número elevado de razones, entre ellas tenemos:

- Un incremento en la productividad
- Menores costos
- Mejor control de la geometría
- Acceso a la soldadura en ambientes difíciles

Sin embargo, se ha observado que la vida en servicio de esas soldaduras automáticas son generalmente más cortas que sus contraparte manual ambas bajo cargas por fatiga. Un incremento en la vida a la fatiga de las soldaduras manuales comparada con las soldaduras automáticas. Esto fue atribuido principalmente a alta concentración de esfuerzos surgidos debido a un pobre perfil de soldadura causado por los procesos automáticos tal como el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).

Sin embargo el proceso FCAW ha llegado a ser más popular debido a la mayor tasa de deposición y mejor calidad de soldadura, comparado al proceso de soldadura por electrodo revestido (SMAW), al mismo tiempo que exhibe una buena resistencia en el metal de soldadura similar al proceso por arco sumergido. Aparte de las consideraciones mecánicas en el diseño de la unión, el proceso de soldadura, el material de aporte, el calor de entrada, el número de pases de soldadura, etc. Los cuales influyen en la microestructura de la soldadura en la unión la cual influirá la zona afectada por el calor extendida y los esfuerzos residuales que se manifestarán en el metal base. Estos factores afectaran invariablemente la resistencia a la fatiga por el incremento a ser propensos a la nucleación de la grieta y su temprano crecimiento, causando con ello la falla de la unión.

En el diseño estructural y la soldadura a tope es una parte de muchas estructuras, su evaluación y predicción a la vida de fatiga es muy importante para evitar fallas catastróficas. Por toda eso, se entiende que los consumibles utilizados en la soldadura, y los procesos de soldadura, tienen un efecto considerable en el desempeño de las uniones en los aceros templados y revenidos (Q&T) que son utilizados en las aplicaciones militares. Una evaluación se llevó a cabo para determinar el desempeño por fatiga de aceros templados y revenidos grado blindaje fabricados con proceso de soldadura por electrodo revestido SMAW (proceso manual) y FCAW (proceso semiautomático utilizando consumibles) tanto de aceros inoxidable austeníticos y aceros

ferríticos de bajo hidrógeno. Para el estudio se utilizó como metal base un acero AISI 4340. La característica microestructural del metal base mostró martensita acicular como se muestra en la Figura 2.5

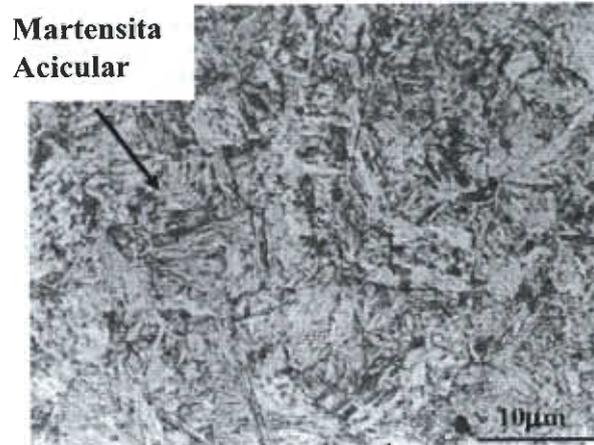


Figura 2.5 Micrografía óptica del material base [5]

Los metales de aporte que se utilizaron fueron:

Metal base identificado como **BM**

Aporte de acero ferrítico de bajo hidrógeno (AWS E1 1018-M) identificado como **SF**

Aporte de acero ferrítico de bajo hidrógeno (AWS E1 105T-K4) identificado como **FF**

Aporte de acero inoxidable (cercano al AWS E307) identificado como **SA**

Aporte de acero inoxidable (cercano al AWS E307 T1-1) identificado como **FA**

Las uniones fabricadas utilizando aceros ferríticos de bajo hidrógeno mostraron un desempeño superior que las uniones fabricadas aceros inoxidables austenítico. Similarmente las uniones fabricadas utilizando el proceso de electrodo revestido produjeron mejores propiedades de fatiga que las uniones de FCAW.

Las propiedades de tensión transversales tales como la resistencia a la cedencia, la resistencia a la tensión, el porcentaje de elongación, el porcentaje

de reducción de sección transversal y la eficiencia de la junta soldada fueron evaluadas y se presentan en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Propiedades de tensión transversal [5]

TIPO DE JUNTA	RESISTENCIA A LA CEDENCIA (MPa)	RESISTENCIA MAX. DE TENSION (MPa)	ENLONGACION EN 40 Mm de longitud	REDUCCION DE AREA EN SECCION TRANSVERSAL (%)	EFICIENCIA DE LA JUNTA (%)
BM	1,200	1,290	12.50	35	-
SF	830	860	10.00	33	66
FF	780	810	8.75	29	62
SA	620	650	6.25	24	50
FF	590	640	5.00	23	49

Las uniones FA mostraron propiedades de tensión inferior que las otras uniones. Sin embargo, las propiedades de tensión del metal base son superiores a las otras juntas. Una eficiencia de 66% en la unión SF y 62% en la unión FF se obtuvieron. Pero las eficiencias de las uniones SA y FA mostraron niveles de 50% y 49% respectivamente.

Casi todos los especímenes de tensión y fatiga fallaron en la región soldada. Aquí, los exámenes de microdureza y de microestructura que fueron hechos únicamente en la región del metal base para entender el efecto de las propiedades de esos materiales en el desempeño por fatiga. El uso de consumibles de aceros ferríticos de bajo hidrógeno en aceros templados y revenidos grado blindaje mejora la resistencia a la fatiga de las uniones más que aquellas uniones fabricadas utilizando aceros inoxidable austeníticos convencionales.

La razón básica de esa mejora en las propiedades a la fatiga es debido a la presencia de ferrita preferencial en la microestructura la cual ayuda para propiedades de tensión transversal superiores y a la dureza del metal base que por tanto incrementa la resistencia a la fatiga de las uniones.

La microestructura de la región del metal soldado en la unión SF está compuesta de ferrita acicular. Una buena combinación de resistencia y tenacidad de soldadura de aceros de bajo carbono se llega a alcanzar por la llamada microestructura ferrita acicular, la cual consiste de pequeñas placas de ferrita formadas dentro de los granos austeníticos y la cual es la estructura más deseada en aceros de bajo carbono.

La ferrita acicular es una fase más comúnmente observada como austenita que se transforma durante el enfriamiento de depósitos de acero de bajo carbono, esto es de importancia comercial considerable debido a que proporciona una microestructura relativamente fuerte.

Es generalmente aceptado que la microestructura que contiene predominantemente ferrita acicular despliega un metal de soldadura óptimo con propiedades de fuerza y resistencia cuando se compara con otras formas de microestructuras. Esto es atribuido a su tamaño de grano fino (Típicamente 1-3 μm) en el cual cada listón está separado por límites de ángulos elevados.

Del metal base para las uniones SA y FA tienen un contenido de níquel de 9.18% y 8.36% respectivamente. Siendo este un estabilizador austenítico influye en la formación de fases austeníticas. La microestructura en la región del metal soldado en la unión SA tiene un esqueleto fino de ferrita delta. El níquel también juega un rol importante en el control microestructural e incrementa la resistencia. Pero el níquel también reduce la resistencia transversal a la tensión y la dureza de las uniones SA las cuales son mucho más bajas que las uniones SF debido a la presencia de fase austenítica rica.

Las uniones FA fabricadas utilizando aceros inoxidable austenítico con FCAW tiene resistencia a la tensión más baja y una dureza de metal de soldadura debido a la presencia de una fase austenítica rica y una morfología de ferrita delta como se muestra en la Figura 2.6

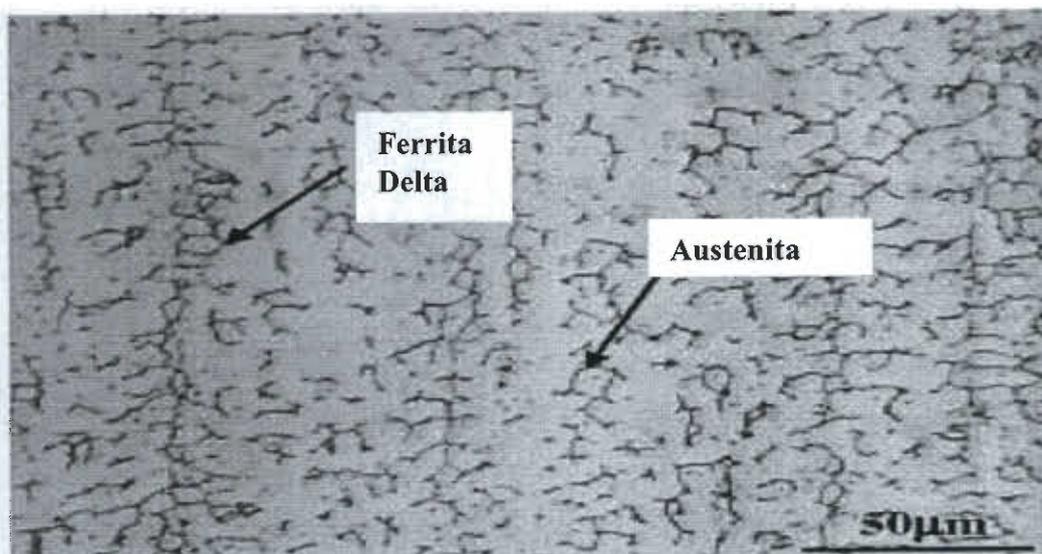


Figura 2.6 Micrografía óptica metal de soldadura unión con acero inoxidable austenítico (FA) [5]

La fatiga de ciclo alto es un proceso de control de esfuerzos y conforme el rango de esfuerzos es aplicado, esta siempre por debajo de la resistencia a la cedencia del material. Si la resistencia a la cedencia del material es mayor, entonces el límite de fatiga del material será mayor. Aquí, materiales de mayor resistencia a la cedencia soportarán un número de ciclos mayor a la fatiga bajo la acción de cargas.

Es una práctica común correlacionar varias propiedades del metal de soldadura con el calor de entrada. La diferencia en la morfología de la ferrita en soldaduras de acero de alta resistencia es debido a la diferencia al calor de entrada. La formación de ferrita acicular es controlada por el calor de entrada de la soldadura. Así, si el calor de entrada es mayor que el contenido de ferrita acicular será mucho menor y viceversa. La velocidad del enfriamiento de la soldadura juega un rol decisivo en determinar la microestructura de la soldadura en los aceros de alta resistencia. El efecto general de incrementar la velocidad de enfriamiento es reducir las temperaturas de transformación. Cuando se enfría a la suficientemente baja velocidad, la microestructura predominante tiende a llegar a ser ferrita poligonal como se muestra en la Figura 2.7.

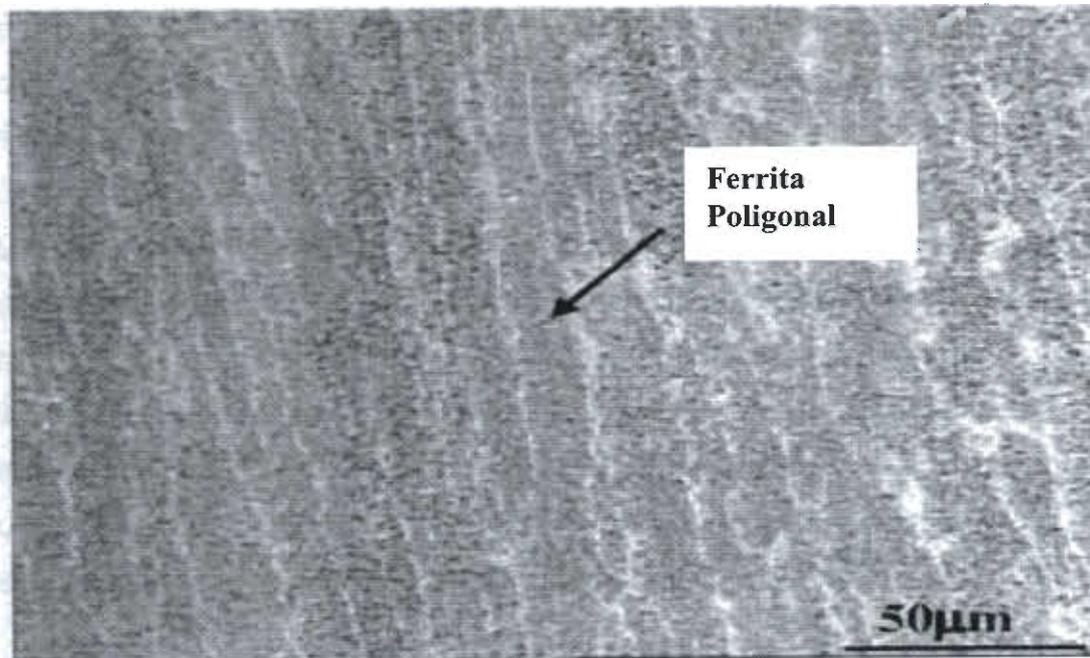


Figura 2.7 Micrografía óptica metal de soldadura unión con acero ferrítico de bajo hidrógeno (Steel Ferritic) [5]

El tema de delta en soldaduras de aceros inoxidable austeníticos es de mucha importancia. La ferrita delta en el metal soldado no puede ser predicha con precisión por su composición química. La ferrita delta no se encuentra distribuida uniformemente y tiene orientaciones preferidas cuando está distribuida finamente. La presencia de la ferrita delta no es siempre considerada benéfica ya que ella afecta las propiedades mecánicas. La ferrita delta en el metal soldado es influenciada por su velocidad de enfriamiento en el charco del metal, la velocidad de enfriamiento depende del calor de entrada y del espesor del metal base.

La velocidad de enfriamiento influye tanto en la cantidad de ferrita que solidifica de fundido en fundido y la cantidad de ferrita que transforma a austenita conforme la aleación se enfría a temperatura ambiente. La cantidad de fase secundaria (ferrita delta) alcanza su máximo valor a velocidades de enfriamiento intermedios. El calor de entrada y las velocidades de enfriamiento asociadas con el proceso de soldadura por electrodo revestido SMAW y por

proceso FCAW han sido identificados para ser los factores responsables de las características resultantes de la morfología de la ferrita delta en aceros inoxidable austeníticos del metal de soldadura.

Las propiedades tensiles (resistencia a la cedencia, resistencia a la tensión, y elongación) de uniones fabricadas utilizando consumibles ferríticos de bajo hidrógeno son superiores a aquellos comparados a sus contrapartes aceros inoxidable austeníticos. Una mayor resistencia a la cedencia y resistencia a la tensión en uniones de aceros ferríticos de bajo hidrógeno son mayormente utilizadas para acrecentar el límite de duración de las uniones y en esta situación se retarda más la iniciación de grietas por fatiga.

Una elongación mayor (mayor ductibilidad) de las uniones con aceros ferríticos de bajo hidrógeno también imparte una resistencia mayor a la propagación de grietas por fatiga y también aquí se retarda la falla por esa causa. El efecto combinado de una mayor resistencia a la cedencia y mayor ductilidad de las uniones de aceros ferríticos de bajo hidrógeno ofrece una resistencia mayor a la iniciación y propagación de grietas y el desempeño por fatiga de las uniones es superior comparado a sus contrapartes austeníticos e inoxidable.

Como resultados y conclusiones del estudio se tienen que la utilización de consumibles de aceros ferríticos de bajo hidrógeno se ha encontrado que es benéfico para incrementar la resistencia a la fatiga de aceros templados y revenidos grado blindaje. Un incremento de 13% mayor de vida a la fatiga se ha registrado en esas uniones, comparadas con las uniones fabricadas por medio de los consumibles de aceros inoxidable austeníticos convencionales.

Las uniones fabricadas por proceso de soldadura por electrodo revestido (SMAW) presentan una duración mayor al número de ciclos de fatiga comparado con las uniones fabricadas con proceso FCAW. Las uniones realizadas con el proceso SMAW mostraron un 6% mayor vida a la fatiga que

las uniones realizadas con el proceso FCAW. Finalmente las propiedades mecánicas superiores (mayor resistencia a la cedencia y dureza) y microestructuras preferidas en la región del metal soldado son las razones para la obtención de un desempeño superior a la fatiga de las uniones fabricadas utilizando consumibles ferríticos de bajo hidrógeno que las uniones fabricadas utilizando consumibles convencionales de aceros inoxidable austeníticos.

2.1.7 FUNDENTES [2]

Los fundentes protegen el charco de soldadura fundido de la atmósfera mediante la cubierta del metal con la escoria fundida. Los fundentes limpian el charco de soldadura, modifican la composición química del metal base e influyen en la forma del cordón de soldadura y en sus propiedades mecánicas.

Los fundentes son compuestos minerales granulares mezclados de acuerdo a varias formulaciones. Basados en la selección de diferentes métodos de manufactura, diferentes tipos de fundentes son fundidos, aglomerados y mezclados mecánicamente.

2.1.7.1 Clasificación de los fundentes

Fundidos: Para manufacturarlos, las materias primas son secadas, mezcladas y fundidas en un horno eléctrico. Después de fundir cualquier adición final, la carga del horno es vertida en grandes bloques enfriadores. El resultado es un producto con apariencia cristalina la cual es extraída, seleccionada por tamaño y empaquetada. Los fluxes fundidos tienen las siguientes ventajas:

1. Buena homogeneidad química
2. Fácil de remover sin afectar la composición del fundente
3. No son normalmente higroscópicos, lo cual simplifica problemas de manejo, almacenaje y soldadura.

4. Reciclables a través de sistemas alimentadores y de recuperación sin cambios significativos en el tamaño de las partículas o composición.

La principal desventaja de este tipo de fluxes, es la dificultad de agregarles desoxidantes y ferroaleaciones durante la manufactura sin la segregación de pérdidas extremadamente altas. Las altas temperaturas necesarias para fundir los ingredientes de la materia prima, limitan el rango de composición del fundente.

Depositados: Para manufacturar un fundente depositado, los materiales primarios son pulverizados, secados en seco y depositados con silicato de potasio, silicato de sodio o una mezcla de ambos. Después del depósito, una mezcla mojada es paletizada y horneada a una temperatura menor que la utilizada para fluxes fundidos. Los pellets son luego quebrados, seleccionados por tamaño y empacados.

Las ventajas de los fundentes depositados incluyen las siguientes:

- 1) Adición de desoxidantes y elementos aleantes; los elementos aleantes como las Ferro-aleaciones o como metales elementales para producir aleaciones no disponibles como electrodos o para ajustar composiciones de los metales base.
- 2) Utilizables en capas más gruesas de flux cuando son soldados
- 3) Identificación por color.

Mezclados mecánicamente: Para producir un fundente mecánicamente mezclado, dos o más fundentes depositados o mezclados son combinados en cualquier proporción necesaria para alcanzar los resultados deseados.

La ventaja de este tipo de fundentes, es que varios de ellos en presentación comercial pueden ser mezclados para obtener propiedades altamente críticas en operaciones de soldadura.

Las siguientes son desventajas de los fundentes mezclados mecánicamente:

- 1) Segregación de los fundentes combinados durante el embarque, Almacenamiento, y manejo.
- 2) La segregación ocurre en el sistema de alimentación y recuperación durante la operación de soldadura.
- 3) Inconsistencia en la combinación del fundente de mezcla a mezcla.

2.2 DEFECTOS DEL PROCESO SAW

En muchas situaciones los defectos de soldadura pueden ser relacionados a las fallas de los procedimientos; pero sólo unos cuantos defectos pueden ocurrir cuando no están directamente relacionados a las condiciones de la soldadura.

2.2.1 POROSIDAD

La porosidad mostrada en la Figura 2.8 es un defecto muy común el cual puede ser influenciado por muchos factores [6]. Algunas veces es claramente visible como un orificio de aguja (pin hole) en la superficie de la soldadura. Otras veces está debajo de la superficie y se revela únicamente a través de exámenes radiográficos o con las pruebas de ultrasonido. Algunas causas de la porosidad pueden ser:

- a) Contaminación en las superficies de la junta con aceite, pintura grasa, óxidos hidratados, etc. Dichos productos se descomponen en el arco en forma de productos gaseosos.
- b) Fundente contaminado: El fundente debe mantenerse seco. Una buena práctica consiste en secar todo el fundente antes de utilizarse y

almacenarse en un local calentado. Las recomendaciones de los fabricantes además de las temperaturas de secado. Note que si una unidad de recuperación de fundente funciona por aire comprimido y ésta es utilizada, el aire debe ser comprimido apropiadamente.

- c) Contaminación del electrodo.
- d) Insuficiente cubierta de fundente.
- e) Fundente atrapado en el fondo de la junta.
- f) Segregación de constituyentes en el metal de soldadura.
- g) Excesiva velocidad de desplazamiento.
- h) Residuos de escoria del punteo de la soldadura hecho con electrodos recubiertos.

Como con otros procesos de soldadura, el metal base y el electrodo deben estar limpios y secos. La alta velocidad de desplazamiento y la rápida solidificación del metal de soldadura asociada no permiten al gas escapar del metal de soldadura fundido. La velocidad de desplazamiento puede ser reducida.

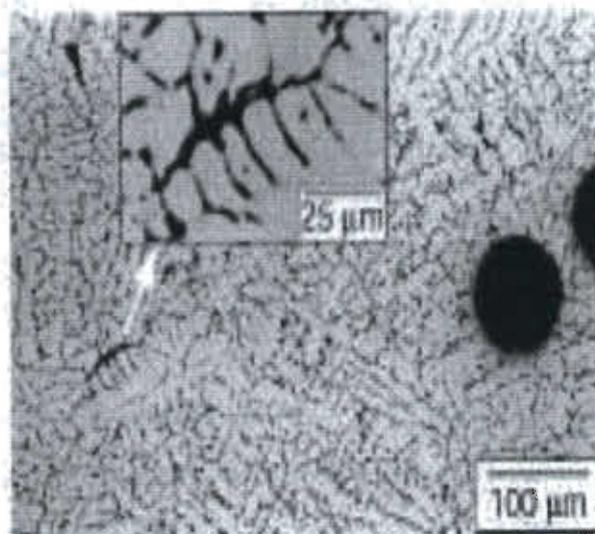


Figura 2.8.- Porosidad en la soldadura, mostrando poros por gas esféricos e interdendríticos. Un poro interdendrítico es agrandado para mayor claridad [6]

2.2.2 GRIETAS INDUCIDAS POR HIDRÓGENO

Algunos aceros son más susceptibles a la formación de grietas en frío que otros, pero afortunadamente, el arco sumergido generalmente no produce este tipo de defecto. Si el acero tiene dureza y el fundente está contaminado, la grieta en frío puede llegar a ocurrir. El seguir las recomendaciones del manejo del fundente y procedimientos de precalentamiento, interpase y post calentamiento deben ayudaran a evitar este problema [6]

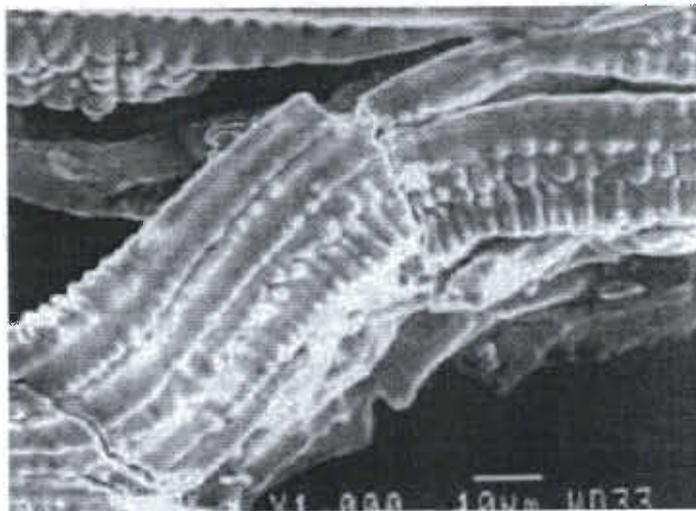


Figura 2.9.- Fractura superficial de una soldadura de acero inoxidable 316 [6]

2.2.3 GRIETAS POR SOLIDIFICACIÓN

Debido a grandes charcos de soldadura y a altas velocidades de soldado las grietas en caliente son comunes. Cuando esto ocurre el perfil de penetración de la soldadura debe ser examinado. Este problema es agravado por la presencia de fósforo, sulfuro y carbono, y si se conoce que estos elementos están en el material padre en cantidades más altas que lo habitual, se deben tomar las medidas para minimizar la dilución y asegurar un buen perfil en el cordón de soldadura. Una solución a los problemas de grietas es el mantener la profundidad del cordón de soldadura menor o igual al ancho de la cara de la

misma. La dimensión del cordón de soldadura puede ser medida por secciones y para corregir el problema, las variables de soldadura y la geometría de unión deben ser cambiadas.

Para reducir la profundidad de la penetración comparada con el ancho de la cara de la junta, la velocidad de desplazamiento así como la corriente de soldado puede ser reducida.

Las grietas en el metal base o en la zona afectada por el calor pueden ser causadas por la difusión del hidrógeno. En el metal de soldadura, el hidrógeno puede entrar al charco de soldadura desde las siguientes fuentes: fundente, grasa o polvo en el electrodo o en el metal base. Las grietas debidas a la difusión del hidrógeno en el metal de soldadura son generalmente asociadas con aceros de baja aleación y con incrementos de esfuerzo a la cedencia y tensión como se muestra en la Figura 2.9 [6]

En los aceros al carbono hay hidrógeno presente en el metal de soldadura depositado, pero éste debe ser limitado a cantidades relativamente pequeñas. Conforme la fuerza de tensión se incrementa, la cantidad de hidrógeno que se difunde en la soldadura de depósito decrece.

Las grietas debido a excesiva cantidad de hidrógeno en la soldadura son llamadas grietas retardadas, esto generalmente ocurre algunas horas, aproximadamente 72 horas, después que la soldadura se ha enfriado a temperatura ambiente. (Arriba de 200 ° F, es decir 93 ° C) generalmente no se producen grietas. Es a la temperatura ambiente que el hidrógeno acumulado como pequeños defectos en el metal de soldadura que produce grietas.

Para mantener el contenido de hidrógeno de la soldadura bajo se recomienda:

- 1) Remover la humedad del fundente calentándolo en un horno (se deberán seguir las recomendaciones del fabricante).
- 2) Remover el aceite, grasa o suciedad de los electrodos y el material base.

- 3) Incrementar la temperatura de trabajo para permitir que el gas hidrógeno escape durante la operación de soldadura.
- 4) Esto puede ser hecho por un precalentado continuo hasta que el cordón este completamente soldado, por un post-calentamiento en la unión de la soldadura, antes de permitir enfriar a temperatura ambiente.

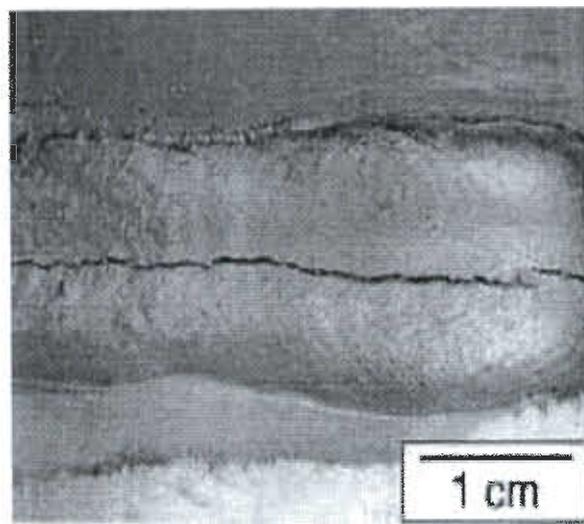


Figura 2.10 Agrietamiento por solidificación [6]

N. Georgiev y otros [7] consideran que la pregunta básica en el tratamiento térmico de un acero es la selección de la temperatura de revenido puesto que las propiedades de operación de los componentes y elementos estructurales dependen de una decisión correcta.

El propósito de su artículo es estudiar el efecto que tiene la temperatura de revenido en la resistencia cíclica a la fractura en los aceros estructurales. Es bien conocido que un cambio en la resistencia a la fractura tanto en aceros de alto como de bajo carbono con diferente contenido del mismo, puede ser ambigua debido a un incremento en la temperatura de revenido.

Los análisis realizados y que en la literatura ha hecho posible graficar un diagrama para la resistencia cíclica máxima a la fatiga, la cual depende de la

temperatura de revenido, proporcionan la resistencia máxima a la fractura cíclica para los aceros estructurales sobre el contenido de carbono en ellos.

El cambio en la resistencia cíclica a la fractura para aceros con diferentes contenidos de carbono está directamente relacionado con las características de sus estructuras. La martensita revenida en aceros al bajo carbono, muestra una serie de características que proporcionan la relajación plástica de esfuerzos en la parte superior de la grieta causada por fatiga, como resultado del revenido a 200 °C (y en ciertos casos directamente después del templeado) proporciona la más alta resistencia al crecimiento de grietas por fatiga.

Cuando los aceros de medio carbono son aleados con elementos que retardan el proceso de revenido y cambian los procesos de recristalización en la región de alta temperatura (600 °C y arriba), una dependencia extrema de resistencia a la grietas cíclica sobre la temperatura de revenido puede no observarse.

En aceros altos en carbono el máximo ciclo de resistencia a la fractura se alcanza únicamente como resultado de la desaparición final de todos los signos morfológicos de martensita laminar durante el revenido. También se debe destacar que una considerable cantidad de carburos de cementita formada, retarda el proceso de recristalización de la matriz ferrítica.

London y otros autores [17] realizaron un estudio para determinar el crecimiento de las grietas de fatiga en muestras por tensión de acero de alta pureza 4140 templeado y revenido para varios niveles de resistencia. Temperaturas de 200, 400, 550 y 700 °C producen resistencias a la tensión de 1600 a 875 MPa, respectivamente. La propagación de grietas fue monitoreada en pruebas de el decremento del factor K (factor de intensidad del esfuerzo a nivel máximo) realizadas bajo un $R=0.05$ en condiciones de carga en un laboratorio a temperatura ambiente. Los resultados indicaron que a medida que la resistencia

a la tensión se incrementa, la velocidad de crecimiento de la grieta se incrementa también cuando existe un incremento del valor de K.

La velocidad de crecimiento de la grieta disminuye a medida que la temperatura de revenido se incrementa a un cambio en el factor de intensidad dado. Esto se debe a que:

- (a) El cambio en el modo de la fractura de un mecanismo intragranular frágil (a una temperatura de revenido de 200 °C) a un mecanismo transgranular dúctil (a una temperatura de 700 °C).

- (b) El incremento en el cierre de la grieta con la temperatura de revenido.

En las micrografías tomadas con microscopio electrónico de barrido (SEM), las fracturas superficiales por fatiga indican una mayor diferencia en los mecanismos de crecimiento de la grieta en función de la temperatura de revenido como se muestra en la Figura 2.11.

Existe un cambio definido en el mecanismo de la fractura a un mayor valor del incremento en el factor de intensidad del esfuerzo (k). En la muestra con una temperatura de 200 °C el crecimiento de la grieta ocurre por un mecanismo intragranular frágil seguido de un límite de grano austenítico previo.

La extensión de grietas frágiles disminuye con el incremento de la temperatura hasta que a los 700 °C la grieta crece transgranularmente en un modo dúctil

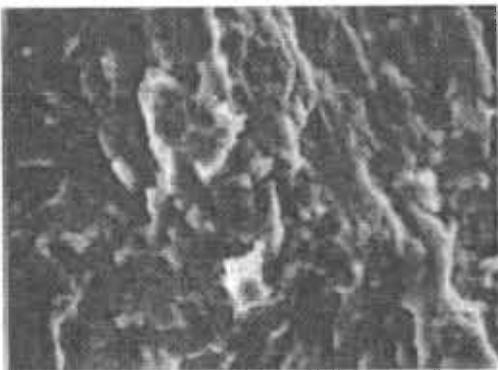
El crecimiento de la grieta intragranular en la muestra revenida a 200 °C se debió probablemente al debilitamiento por hidrógeno junto con el efecto del debilitamiento de la martensita revenida.



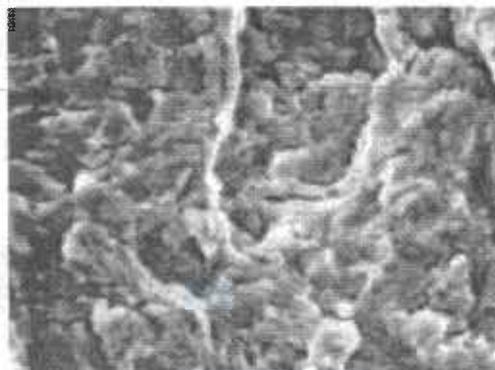
(a) Revenido a 200 °C



(b) Revenido a 400 °C



(c) Revenido a 550 °C



(d) Revenido a 700 °C

Figura 2.11. Microfracturas a diferentes temperaturas de revenido [9]

2.2.4 SOPLO DE ARCO

Este tipo de defecto es causado por las fuerzas magnéticas alrededor del arco y ocurre únicamente con la corriente DC. Aunque el electrodo puede ser correctamente posicionado en la unión del arco y la soldadura depositada puede ocurrir una mal formación. Este problema puede frecuentemente ser evitado moviendo el punto de posicionamiento.

2.2.5 FUSIÓN INCOMPLETA

Esta falla se describe cuando no ocurre la fusión entre el metal base y las caras del cordón de soldadura [8]. Esto es la fusión es menor que la especificada para un cordón en particular.

Debido a su linealidad y terminación relativamente filosa, las fusiones incompletas representan una discontinuidad de soldadura. Esta discontinuidad puede ocurrir en varios sitios dentro de la zona de soldado. La mayoría de las veces las fusiones incompletas se observan como fallas internas de soldadura, pero también pueden ocurrir en la superficie.

Las fusiones incompletas pueden resultar de un número de condiciones o problemas. Probablemente la causa más común de esta discontinuidad, es la manipulación inapropiada del electrodo. Algunos procesos son más proclives a este problema porque no hay suficiente concentración de calor para fundir y fusionar adecuadamente los metales (Figura 2.12)

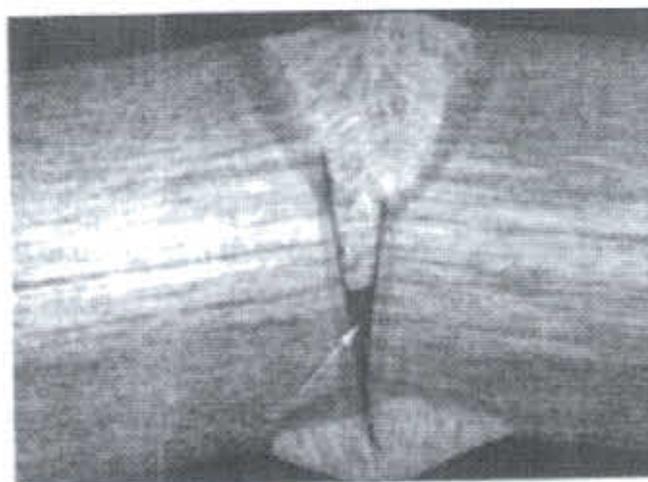


Figura. 2.12.- Fusión Incompleta [8]

2.2.6 PENETRACIÓN DE JUNTA INCOMPLETA

Esta es una discontinuidad asociada únicamente con la ranura de las soldaduras. Es una condición donde el metal de soldadura no se extiende enteramente a través de espesor de la junta aun cuando la penetración completa es requerida por la especificación. Su localización es siempre adyacente a la raíz de la soldadura.

Esta discontinuidad puede ser causada por las mismas condiciones que producen la fusión incompleta; esto es, técnica inapropiada, configuración inapropiada de la junta o contaminación excesiva.

2.2.7 INCLUSIONES

La definición de inclusión es un material sólido y extraño atrapado; por ejemplo escoria, fundente u óxido [8]. Así el término inclusión puede aludir a categorías tanto metálicas como no metálicas. Las inclusiones de escoria, como su nombre indica, son regiones dentro de la sección transversal de la soldadura o en la superficie, donde el fundente fundido es mecánicamente atrapado dentro del metal solidificado. Este fundente solidificado, o escoria, representa una porción de la sección transversal de soldadura en donde el metal no es fusionado así mismo. Esto puede resultar en una condición de debilidad que puede afectar el servicio del componente. Las inclusiones de escoria pueden ocurrir entre el metal base y el metal de soldadura, o entre condiciones individuales. De hecho las inclusiones de escoria son frecuentemente asociadas con las fusiones incompletas.

Las inclusiones de escoria pueden resultar cuando el proceso de soldadura utiliza algún tipo de fundente de protección. Estas inclusiones son más comúnmente causadas por técnicas inapropiadas de soldado (Figura 2.13)

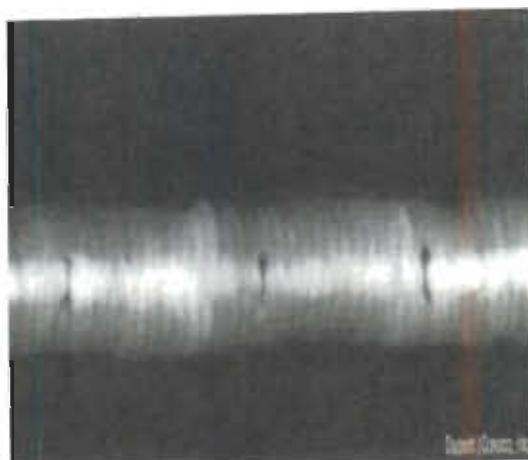


Figura 2.13 Discontinuidad por inclusiones [8]

2.2.8 SOCAVADOS

El socavado es una discontinuidad superficial la cual ocurre en el metal base directamente adyacente a la soldadura. Es una condición en la cual el metal base ha sido fundido aparte de la operación de soldadura, y hay insuficiente metal de aporte depositado para llenar adecuadamente la depresión resultante. El resultado es una ranura lineal en el metal base, la cual puede tener una configuración relativamente afilada.

Debido a que es una condición superficial, causa detrimento, particularmente en las estructuras las cuales estarán sujetas a las cargas por fatiga (Figura 2.14)

El socavado es normalmente el resultado de que la técnica de soldado es inapropiada, más específicamente si la velocidad de viaje es excesiva, no habrá suficiente material de aporte depositado para llenar adecuadamente las depresiones causadas por el fundido del metal base adyacente a la soldadura. El socavado puede resultar cuando el calor de soldado es demasiado alto, causando fundido excesivo del metal base, o cuando la manipulación del electrodo es incorrecta.



Figura 2.14. Discontinuidad por socavado

2.2.9 FALTA DE LLENADO

La falta de llenado al igual que el socavado, es una discontinuidad superficial la cual resulta en pérdida de material en la sección transversal. Sin embargo, la falta de llenado ocurre en el metal de soldadura de una soldadura de ranura; mientras que el socavado es encontrado en la base del metal adyacente a la soldadura. En términos simples, la falta de llenado resulta cuando no hay suficiente metal de aporte depositado para llenar adecuadamente la unión de soldado. Cuando la falta de llenado es descubierta, esto generalmente significa que el soldador no ha finalizado de realizar la soldadura o no tiene el entendimiento de los requerimientos de soldado (Figura 2.15).

La falta de llenado puede ocurrir tanto en la cara como en las superficies de raíz de la soldadura. La falta de llenado es a veces denominado concavidad interna. Éste puede ser causado por calor excesivo y fundido del pase raíz; durante la deposición del segundo paso. La causa primaria de la falta de llenado es la técnica empleada por el soldador, la velocidad excesiva no permite que suficiente metal de aporte sea fundido y depositado para llenar la zona de soldadura al nivel de la superficie del metal base.



Figura 2.15 Defecto causado por soldadura insuficiente

2.2.10 TRASLAPES

Esta discontinuidad es descrita como la protrusión del metal de soldadura más allá del pie de soldadura o de la raíz de la soldadura. Aparece como si el metal haya sobre fluido la junta y se haya depositado en la superficie del material base adyacente.

Debido a sus características la soldadura sobrepuesta es algunas veces, llamada rollada sobre sí. Esta discontinuidad puede ocurrir en la cara de la soldadura o bien en la raíz de cordones de ranura (Figura 2.16).

Los traslapes son considerados una discontinuidad significativa debido a que puede resultar en marcas con filos en la superficie de la pieza soldada. Más aún, si la cantidad de soldadura sobrepuesta es lo suficientemente grande, esta puede esconder una grieta la cual puede propagarse hasta un punto de esfuerzo. La ocurrencia de esta discontinuidad es debida principalmente a una técnica inapropiada de soldado.



Figura 2.16 Traslapes de soldadura

2.2.11 CONVEXIDAD

Esta discontinuidad particular aplica únicamente para las soldaduras de filete. La convexidad se refiere a la cantidad de metal de soldadura construido sobre la cara del filete de soldadura mas allá de lo que puede ser considerado. Por definición es la máxima distancia de la cara de la soldadura de un filete convexo perpendicular a la línea que une los pies de soldadura (Figura 2.17).

Con ciertos límites, la convexidad no es dañina. De hecho, una ligera cantidad de convexidad es deseable para asegurar que la concavidad no está presente, la cual puede reducir el tamaño y resistencia del filete. Sin embargo, cuando la cantidad de convexidad excede un límite, esta discontinuidad llega a ser una falla significativa. El hecho de que metal de soldadura adicional este presente no es un problema real a menos que se considere la economía de depositar más material de aporte del que es absolutamente necesario. El problema real creado por la existencia del exceso de convexidad es que el perfil de soldadura resultante ahora tiene partes agudas en los pies de la soldadura que pueden producir concentradores de esfuerzos los cuales pueden debilitar la estructura, especialmente cuando la estructura está cargada bajo fatiga. Por tanto excesiva convexidad debe ser evitada durante la soldadura.



Figura 2 .17 Defecto por convexidad en el cordón de soldadura

2.2.12 CHISPORROTEO

La AWS A3.0 define el chisporroteo como las partículas metálicas expelidas durante la fusión de la soldadura. Comúnmente pensamos en partículas que están a un lado del metal base adyacente a la soldadura. Sin embargo, las partículas las cuales son lanzadas de la soldadura del metal base pueden ser consideradas también como chisporroteo. Por esta última razón, otra definición corresponde a aquellas partículas de metal que son la diferencia entre la cantidad de metal fundido y la cantidad de metal depositado realmente en la unión soldada (Figura 2.18).

En términos de qué tan crítico es el chisporroteo, este puede no ser una gran preocupación para muchas de las aplicaciones. Sin embargo glóbulos grandes de chisporroteo pueden tener suficiente calor para causar zonas afectadas por el calor y localizadas en la superficie del metal base.

También, la presencia del chisporroteo en la superficie del metal base puede causar concentradores de esfuerzo locales los cuales pueden causar problemas durante el servicio.

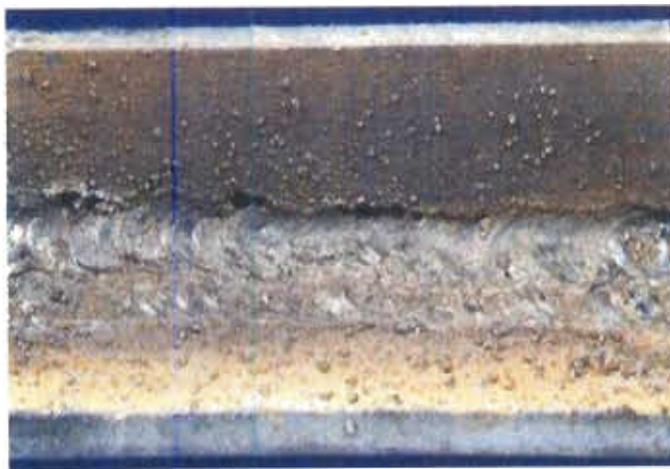


Figura 2.18.- Chisporroteo de la soldadura

2.3 PROCESO DE SOLDADURA AL ARCO CON ALAMBRE PROTEGIDO POR GAS (GMAW)

2.3.1 GENERALIDADES

El proceso de soldadura al arco con alambre protegido por gas [8] usa calor intenso de un arco eléctrico para derretir el metal de aportación y el metal base. El alambre electrodo sólido desnudo consumible, alimenta continuamente al arco. El metal de soldadura depositado se forma el metal fundido de la punta del alambre-electrodo y es transferido a través del arco a la pieza de trabajo, el gas protege la soldadura contra la contaminación

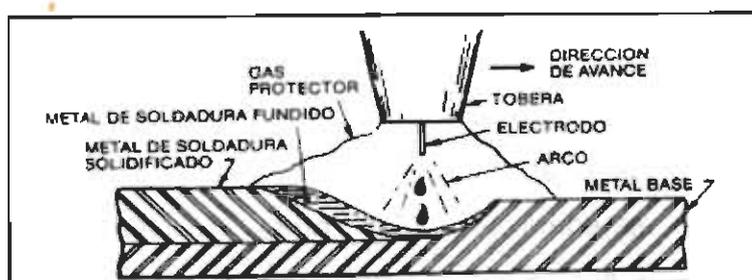


Figura 2.19 Proceso de soldadura GMAW [8]

2.3.2 EQUIPO [8]

El equipo necesario para soldar el arco con alambre protegido por gas está compuesto por:

- 1) Fuente de alimentación de corriente continua y voltaje constante
- 2) Alimentador de alambre
- 3) Sistema de control, alambre-electrodo,
- 4) Pistola de soldar,
- 5) Cable eléctrico y conjunto de manguera para el gas protector, y un suministro de gas protector.

La fuente de alimentación es un transformador rectificador o un generador. Tiene un ciclo de trabajo de cien por ciento, la fuente de alimentación funciona continuamente a cargas nominales mientras se alimenta el alambre electrodo al arco. Produce voltaje casi constante con amperaje variable similar a la corriente doméstica, con la excepción que esta última tiene el mismo voltaje para todos los artefactos.

En las fuentes de alimentación de voltaje constante, una gran variación del amperaje da una pequeña variación en el voltaje. Una vez que la unidad de control y el alimentador de alambre están ajustados, mantiene constante la velocidad apropiada de alimentación del alambre.

El amperaje es controlado por la velocidad de avance. Cuando mayor la velocidad de alimentación, tanto, mayor el amperaje. A diferencia de la soldadura con electrodos revestidos, la soldadura con alambre se ve afectada por la sobre-extensión de la punta de la pistola de trabajo. Mientras en esta soldadura, el soldador puede ajustar la longitud de la sobre-extensión, tanto menor amperaje. Esto da al soldador control preciso de amperaje incorporado. La pistola de soldador actúa como un conductor y control de arranque parada corriente. También entrega el alambre electrodo y gas protector.

La pistola tiene una forma tal que puede agarrarse cómodamente con el ángulo apropiado del alambre electrodo. Los dos tipos disponibles de pistolas son el de cuello de cisne y el tipo de tirar o halar auto contenido.

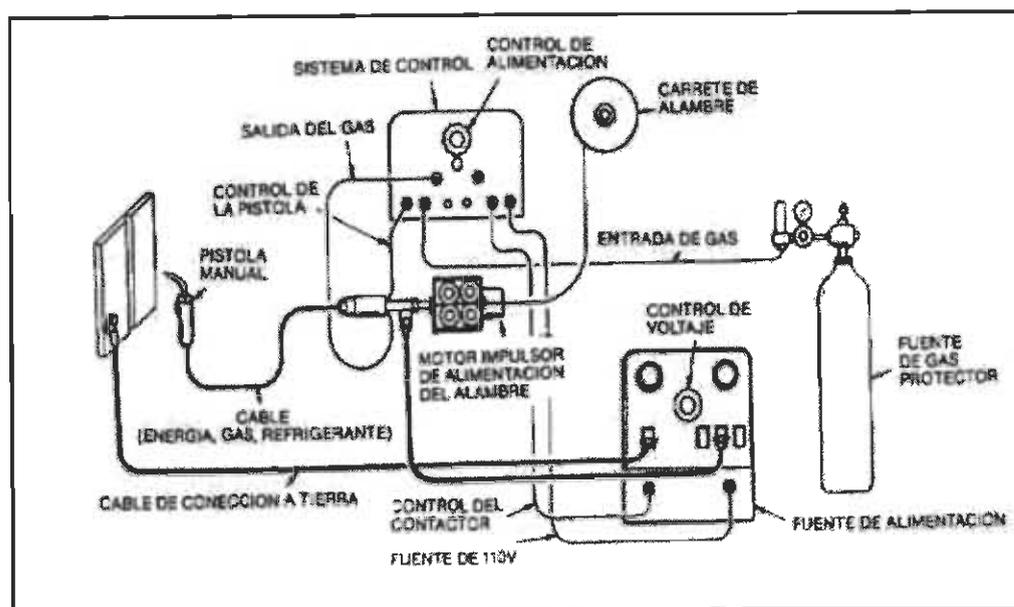


Figura 2.20 Diagrama de un equipo utilizado en el proceso GMAW [8]

El conjunto del cable y manguera conduce la corriente eléctrica, el alambre electrodo y el gas protector a la pistola. Se fabrica en unidades simples o con partes separadas atadas juntas. El alambre electrodo es un metal especialmente aleado que consiste en alambre de acero, con un enchapado de cobre para mejorar el contacto eléctrico e impedir la oxidación. Está disponible en carretes de tamaños convencionales.

La Sociedad Americana de Soldadura (AWS por sus siglas en inglés) clasifica el alambre electrodo para la soldadura de arco con alambre protegido con gas, usando una serie de letras y dígitos. Un ejemplo de dicho alambre es:

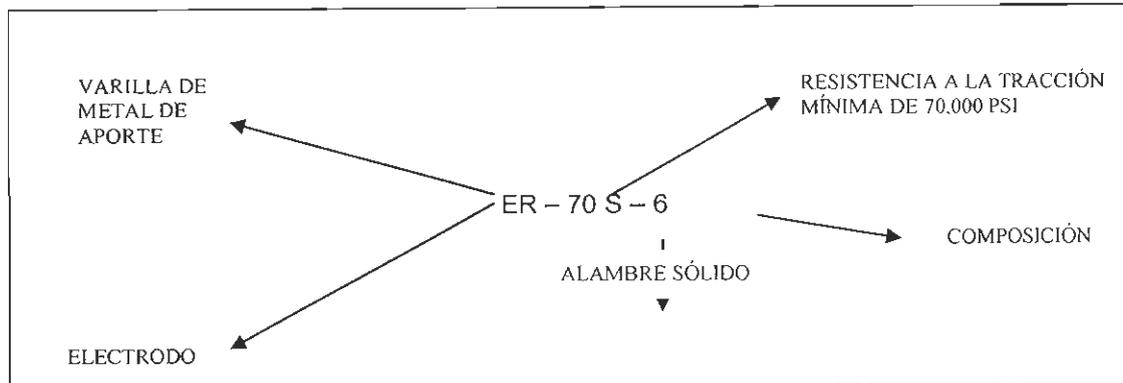


Figura 2.21 Clasificación del alambre AWS [8]

En todos los métodos de aplicación, el alambre electrodo se alimenta automáticamente en el arco. En el método de aplicación semiautomático la guía para el avance y la junta son suministrados por el soldador, mientras que en el método automático son suministrados mecánicamente. La soldadura semiautomática es la más corriente. La soldadura automática también puede hacerse con alambre protegido por gas, donde todas las funciones de soldadura son realizadas por el equipo. El proceso de soldadura al arco con alambre protegido por gas puede emplearse para soldar metales ferrosos y no ferrosos.

2.3.3 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL METAL

La soldadura de alambre tiene una variable de transferencia de metal, puede ser: de corto circuito, globular, de rocío y pulsada. La transferencia de metal al usar esta afectada por el amperaje y el voltaje, el tipo y tamaño del alambre electrodo, y el tipo de gas protector. La soldadura con alambre es un proceso de todas posiciones, pero cada variable tiene su propia capacidad de posición dependiendo del tamaño del electrodo y de la transferencia de metal.

Las transferencias de corto circuito y la pulsada se usan en todas posiciones en materiales más delgados. En las posiciones plana y horizontal con material de mas espesor se usa la transferencia globular y la de rocío.

La soldadura al arco con alambre protegido por gas es un proceso muy versátil. Se usa en metales ferrosos y no ferrosos en una amplia variedad de espesores de metales. También puede usarse para soldar la mayoría de los metales basándose en las distintas transferencias de metal posibles con este proceso.

La transferencia de metal es el método en que las gotas de metal derretido fluyen de la punta del alambre electrodo a través del arco y al baño de soldadura. El tipo de transferencia de metal es determinado por el amperaje, voltaje, tipo de gas protector y diámetro del alambre electrodo. Los cuatro tipos de transferencia de metal son: corto circuito, globular, rocío y pulsada.

2.3.3.1 Transferencia de cortocircuito

En el proceso de cortocircuito, la punta del alambre electrodo se funde en un pequeño glóbulo que avanza hacia el baño. El arco se extingue a medida que el glóbulo queda en contacto con el baño, produciendo un cortocircuito, la corriente aumenta y el glóbulo comienza a estrecharse en la base hasta cortarse, con lo que el arco se vuelve a encender, comenzando otra vez el mismo proceso.

La soldadura de transferencia de cortocircuito se usa principalmente en aceros de bajo o mediano carbono, y aceros de baja aleación y alta resistencia.

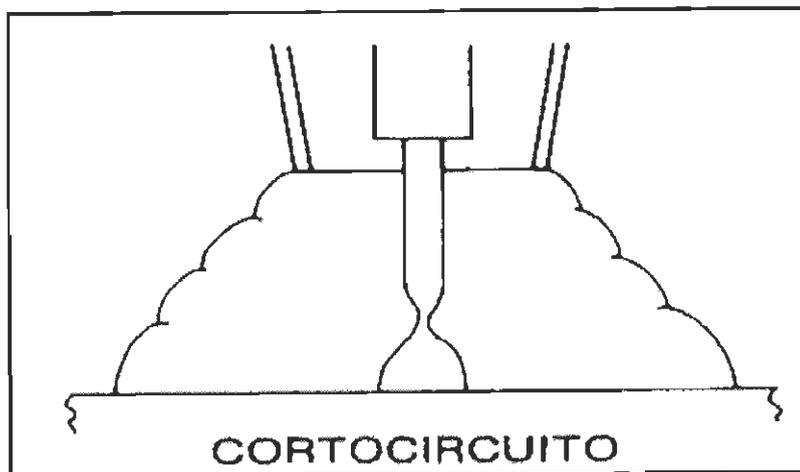


Figura 2.22 Transferencia de soldadura por corto circuito [8]

El tipo de gas protector usado tiene muy poco efecto en la transferencia de cortocircuito. La mayoría de las soldaduras al arco con alambre protegido por gas por transferencia de cortocircuito usan un gas protector de dióxido de carbono que es activo. Al usar 100% dióxido de carbono se tiene un baño de soldadura pequeño de congelación rápida con salpicadura pequeña fina. Se puede producir un arco más estable con una mezcla de 75% argón y 25% de dióxido de carbono.

El argón es químicamente inerte, por lo tanto, no se combina con otros materiales. Al usar acero inoxidable para soldar, se usa 90% de helio, 7.5% de argón y 2.5% de dióxido de carbono para promover la transferencia de cortocircuito porque mantiene las propiedades anticorrosivas.

La soldadura por cortocircuito puede usarse en todas posiciones, para todo tipo de juntas, para unir secciones delgadas de metal en posiciones vertical, horizontal y sobre cabeza, para rellenar aberturas de raíz grandes, y aplicaciones de metales ferrosos y no ferrosos y soldadura de tuberías.

Para la transferencia de cortocircuito, los ajustes del amperaje y voltaje son relativamente bajos, produciendo una adición de calor relativamente bajos. También usa alambre electrodo de diámetro pequeño. Para ajustar el equipo para este proceso, obtener el alambre electrodo y el gas protector correctos.

Ajustar la fuente de alimentación en la gama correcta de amperaje voltaje. El arco tiene que ser pequeño y producir un crepitar parejo.

Este modo se usa en aplicaciones de soldaduras de planchas y tuberías.

2.3.3.2 Transferencia globular

La transferencia globular forma una gota en la punta del alambre electrodo que se está fundiendo hasta que crece a un tamaño más grande que el diámetro del alambre. Debido a la fuerza de gravedad, se suelta del electrodo y se transfiere a través del arco. Puede ser de 1.5 a 2 veces el diámetro del electrodo. Este proceso se repite continuamente con la velocidad de deposición. La transferencia globular produce una velocidad de deposición mayor y más calor que la transferencia de cortocircuito.

Se usa en aceros bajo y mediano carbono, y aceros de alta resistencia y baja aleación. Se usa dióxido de carbono como gas protector. Este gas se utiliza para soldar aceros de baja y mediana aleación, y produce transferencia globular a niveles más altos de corriente.

La transferencia globular tiene un arco violento y un poco de salpicadura. No es adecuado para soldar fuera de posición debido al gran tamaño de la gota y a que depende de la fuerza de gravedad para transferir el metal de aportación.

Puede usarse en una amplia variedad de espesores de metales a partir del calibre 18, y en todo tipo de juntas. Al soldar ranuras en v y biseladas, hay que reducir el ángulo del bisel y la abertura de raíz.

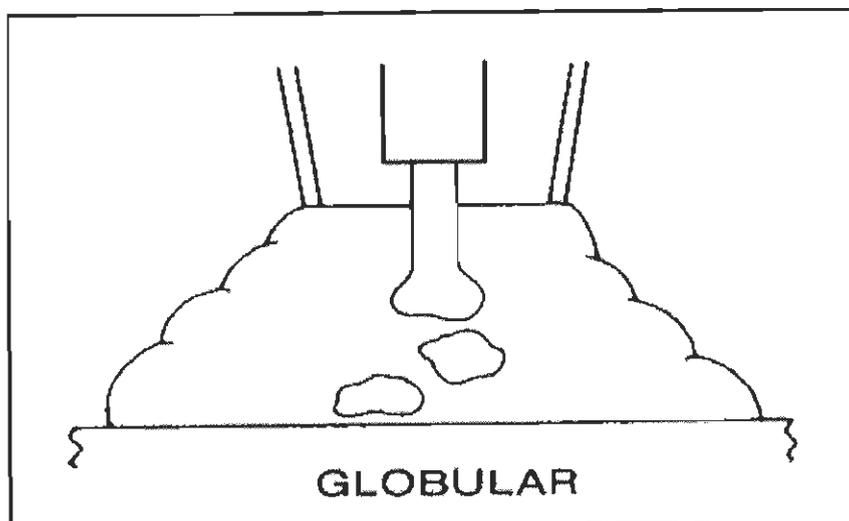


Figura 2.23 Transferencia globular [8]

Ajustar el voltaje y el amperaje más altos que para la transferencia de cortocircuito y usar un electrodo de diámetro mayor. Para preparar el equipo obtener el diámetro de alambre electrodo y gas de protector correctos, y ajustar la fuente de alimentación para lograr el amperaje y voltajes apropiados. El arco será un poco más grande que para la transferencia de cortocircuito y tendrá un ruido de crepitar constante.

Donde más frecuente se usa la transferencia globular es en la industria en aceros al carbono gruesos en posición plana y horizontal.

2.3.3.3 Transferencia por rocío

La transferencia de rocío [8] consiste en gotas de fundición muy finas que electromagnéticamente se desprenden de la punta cónica que se forma en el extremo del alambre electrodo. Las gotas se transfieren rápidamente a través del arco al baño desde menos de cien hasta varios cientos de veces por segundo.

Se usa para soldar metales ferrosos y no ferrosos. Para los metales no ferrosos se usa una combinación de argón y oxígeno como gas protector. Puede ser una mezcla de 95% argón, 5% oxígeno; 98% argón, 2% oxígeno; o 99% argón, 1% oxígeno. El argón limita el tamaño de las gotas de metal

derretido, solo se transfieren gotitas pequeñas de metal. El oxígeno en la mezcla ayuda a estabilizar el arco, reducir las salpicaduras, ensanchar la penetración de la soldadura e impedir el socavado o indentación marginal. Se puede usar un máximo de 5% de oxígeno, si no se tendrá problemas de porosidad.

El argón con oxígeno se usa para soldar aceros de bajo y mediano carbono, aceros de baja aleación y alta resistencia y aceros inoxidable en las posiciones plana y horizontal.

El argón, helio o una mezcla de ambos se usa para soldar aluminio y aleaciones de aluminio, níquel y aleaciones de níquel, aleaciones de cobre, titanio y otros metales no ferrosos.

El argón puro no produce socavaduras en los metales no ferrosos, por lo tanto no se necesita oxígeno. Para soldar metales no ferrosos en todas posiciones, se usa cien por ciento de argón y un electrodo de diámetro pequeño.

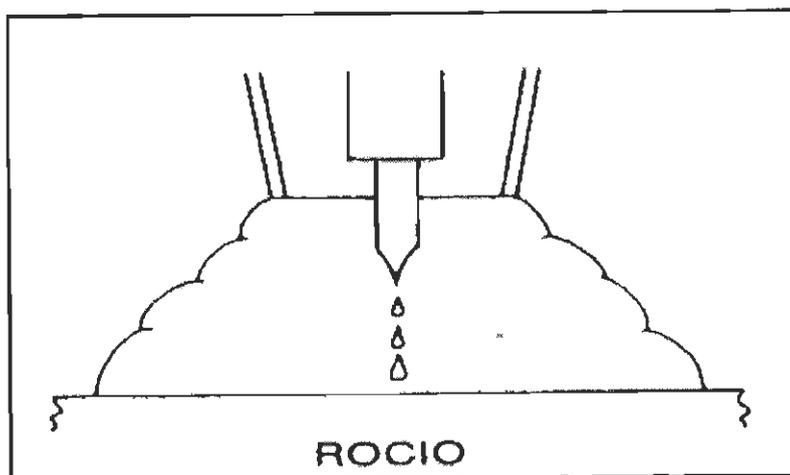


Figura 2.24 Transferencia por rocío [8]

El método de transferencia de rocío puede usarse en todo tipo de juntas. En una junta con apertura de raíz, se recomienda usar una chapa de respaldo. Con lo que se puede rebajar en 25% la apertura y el ángulo de bisel. Con la

transferencia de rocío se puede soldar metales de espesor de 1/8" a mayores.

Para metales ferrosos usar corriente más alta y alambre electrodo de diámetro mayor. La gama común de alambre electrodo usada con la transferencia de rocío es de 1/16" a 3/32" de diámetro.

Para iniciar el equipo, obtener el alambre electrodo y gas protector recomendados y ajustar la fuente de alimentación al voltaje y amperajes apropiados para usar el método de transferencia de rocío. El arco tiene que ser más grande que para la transferencia de corto circuito y tener apariencia de rocío con un sonido silbante suave.

La transferencia de rocío se usa más a menudo con una mezcla de argón oxígeno, y se produce una soldadura de penetración profunda en las posiciones plana y horizontal.

2.3.3.4 Transferencia pulsada.

La transferencia de corriente pulsada en soldadura con alambre protegido por gas, es una forma de transferencia de rocío. Ocurre en intervalos regularmente espaciados con el amperaje pulsado entre un valor alto pre ajustado y un valor base más bajo a una razón de 60 ciclos por segundo. Cada impulso de corriente transfiere una gota de metal derretido. Para conducir la onda pulsante la corriente se obtiene alternadamente de dos fuentes de poder de voltaje constante.

Para obtener transferencia pulsada, el amperaje máximo se ajusta sobre el punto de transición de la transferencia de rocío y el amperaje base se ajusta en la gama de la transferencia globular, la punta del alambre electrodo se funde durante la porción base del ciclo. A medida que el amperaje sube sobre el punto de transición, la punta se agudiza.

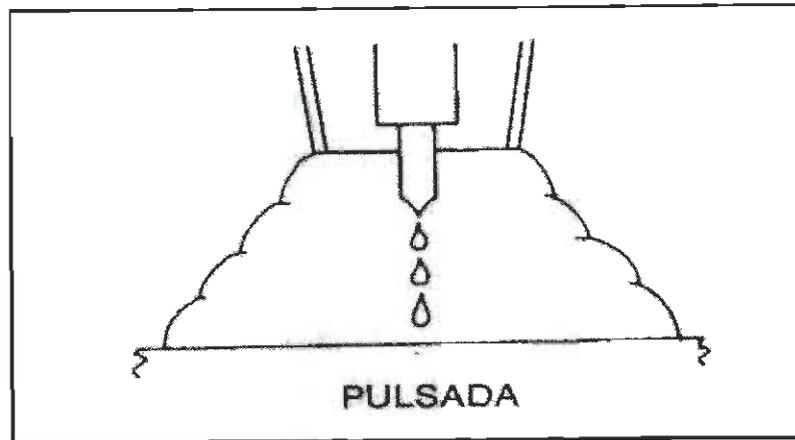


Figura 2.25 Transferencia pulsada [8]

Una gota se separa y se transfiere a través del arco al baño de soldadura. Entonces, el ciclo se repite. El baño de soldadura se solidifica más rápido que aquel de transferencia de rocío, debido a que la intensidad del arco aumenta y disminuye constantemente.

La corriente pulsada puede usarse para soldar metales ferrosos y es ideal para los no ferrosos debido a la baja aplicación de calor. Puede extenderse a soldaduras fuera de posición debido a la corriente y al baño de congelación rápida.

El gas protector más adecuado para la transferencia pulsada es una mezcla de 98% argón y 2% de oxígeno. Puede usarse en todo tipo de juntas.

La transferencia pulsada necesita equipo especial y se usa solamente en aquellos casos en que no se puede usar otro tipo de transferencia.

2.3.3.5 Soldadura por puntos.

Soldar al arco por puntos es fundir a través de una de las piezas para soldarla a la otra. El espesor de la pieza es limitado. La operación de soldadura por puntos consiste en iniciar y mantener el arco sin avanzar en un punto donde las partes a unir se mantienen juntas. El proceso más usado para soldar por puntos es el de alambre protegido por gas.

Para soldar por puntos se puede usar el equipo de soldar semiautomático normal con la adición de un cronómetro para controlar la cantidad de tiempo del arco, y una tobera especial de pistola lo suficientemente resistente para

transmitir la fuerza necesaria para sostener juntas las partes y mantener una sobre extensión constante del alambre electrodo.

En metales ferrosos usar dióxido de carbono como gas protector. Si se desea menos penetración, usar una mezcla de 75% argón y 25% de dióxido de carbono. Para depositar el punto de soldadura, seleccionar el alambre electrodo y gas protector, conectar el cronómetro, instalar la tobera especial y después ajustar el tiempo adecuado para el espesor de la parte superior.

2.3.3.6 Ventajas del proceso GMAW

- 1) Las operaciones de soldadura pueden hacerse en todas las posiciones mediante el modo de transferencia por rociado.
- 2) No se requiere limpieza adicional de escoria.
- 3) La velocidad de depósito es relativamente elevada
- 4) Tiempos totales de aplicación de soldadura de aproximadamente la mitad de aquellos obtenidos con electrodo recubierto
- 5) Alta calidad en las uniones soldadas
- 6) Gran aprovechamiento de metal de aporte
- 7) Reducción del humo y vapores
- 8) Puede fácilmente automatizarse.
- 9) El método semiautomático de soldadura con alambre protegido por gas requiere menos pericia.

2.3.3.7 Limitaciones del proceso

- 1) El equipo de soldadura es más complejo, costoso y menos transportable que el de electrodo recubierto.
- 2) Es más difícil de utilizar en lugares de difícil acceso
- 3) El arco de soldadura debe protegerse contra corrientes de aire que puedan dispersar el gas protector
- 4) Niveles relativamente altos de calor radiado e intensidad del arco

2.3.4 ELECTRODOS

Las ventajas de la soldadura con alambres son altas velocidad de deposición, alto factor de operación, gran aprovechamiento de metal de aporte, eliminación de la remoción de escoria, reducción del humo y vapores, y puede ser automáticamente. El método semiautomático de soldadura con alambre protegido por gas requiere menos pericia.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DEL PROCESO DE ARCO SUMERGIDO (SAW)

De acuerdo con el análisis de la información revisada para el proceso de soldadura por arco sumergido, las principales variables de proceso a ser consideradas en la experimentación son:

- 1) Amperaje: 600 A
- 2) Voltaje: 34V
- 3) Velocidad de alimentación del alambre: 10 Pulgadas / minuto
- 4) Temperatura de precalentamiento: 150 °C
- 5) Stick out: 1.5 Pulgadas máximo

3.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para evaluar como el proceso de reparación afectan las propiedades tanto mecánicas como microestructurales, se propone el siguiente diseño de experimentos.

- 1) Diseño 4¹
- 2) Niveles 1
- 3) Factores 4 (Sin reparación, con una reparación, con dos reparaciones, con tres reparaciones)

3.3 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE SOLDADURA

Para la elaboración de las probetas de soldadura se tomó como requerimiento lo indicado en el documento de la AWS D1.1/D1.1m:2008 "Structural Welding Code Steel":

Se elaboraron cuatro probetas con las siguientes características:

- 1) Se utilizó el mismo material base acero A-633 de $\frac{1}{2}$ " y de 1 "
- 2) Se habilitó el material con el corte, bisel y limpieza de la junta
- 3) Se agregó la barra de respaldo y se establecieron las mismas variables de control del proceso normal incluyendo el precalentamiento
- 4) Se realizó una prueba de UT para determinar las discontinuidades antes de cada uno de las reparaciones

De las cuatro probetas que se elaboraron una no contenía reparación alguna y solo fue fabricada utilizando el proceso de soldadura SAW, las otras tres contaban con una, dos y tres reparaciones respectivamente. Cada una de las reparaciones se realizaron utilizando proceso GMAW.

El proceso se inicio con preparación de las placas, las cuales fueron elaboradas con placas de acero AG33 grado E, una de 0.5 pulgadas de espesor, una de 1.0 pulgada de espesor, una barra de respaldo cuadrada de $\frac{1}{4}$ de pulgada, con un ángulo de 30° y utilizando una junta TC-U4a tal como se muestra en la Figura 3.1

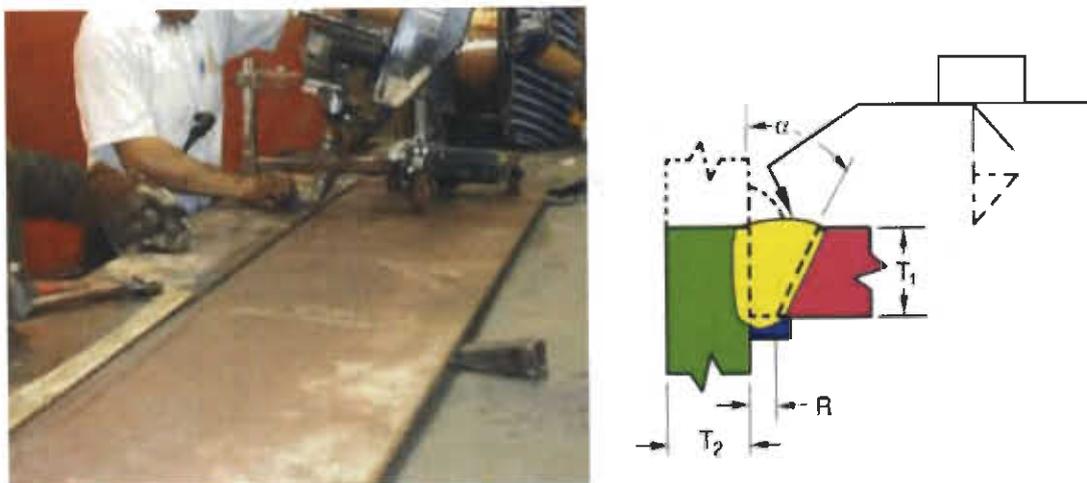


Figura 3.1 Preparación de la probeta para pruebas de laboratorio

Posteriormente se le aplicó un proceso de precalentamiento a 150 °C a cada una de las probetas realizadas como se muestra en la Figura 3.2 y posteriormente se procedió a aplicar los diferentes cordones con el proceso de arco sumergido como se muestra en la Figura 3.3



Figura 3.2 Aplicando el precalentamiento en la preparación de probetas



Figura 3.3 Aplicación del arco sumergido en las probetas de prueba

Una vez que se ha completado de rellenar la junta, se procede a evaluar la calidad de la soldadura mediante una prueba de ultrasonido como se muestra en la Figura 3.4



Figura 3.4 Inspección por ultrasonido en las probetas de prueba

Si la probeta no pasa la prueba de ultrasonido se procede a retirar los cordones de soldadura hasta la profundidad del defecto indicada por la prueba 3.5. Para ello se utiliza el pulidor como se muestra en la Figura 3.5 y ocasionalmente la herramienta de arco-aire



Figura 3.5 Preparando el área para iniciar la reparación de una de las probetas de prueba

Una vez que el cordón es retirado se procede a sanear el área limpiándola adecuadamente y luego se procede al relleno utilizando para ello el proceso GMAW como se muestra en la Figura 3.6



Figura 3.6 Realizando la reparación de una de las probetas de prueba

Una vez realizada la reparación se deja enfriar la pieza hasta una temperatura máxima de 40 °C.

Y luego se procede a verificarla por ultrasonido nuevamente, si se vuelven a encontrar defectos se procede con la reparación descrita anteriormente, este proceso puede llevarse a cabo una, dos y hasta tres veces. Para el caso de las

probetas, una no se reparó ya que paso la prueba de UT la primera vez, y las otras tres se repararon una, dos y tres veces respectivamente hasta obtener las cuatro probetas de 60" de largo por 30" de ancho tal y como se muestra en las Figuras 3.7 y 3.8 y las cuales serán enviadas al laboratorio para realizar en cada una de ellas las pruebas metalográficas así como las pruebas mecánicas.



Figura 3.7 Identificación de áreas de prueba de la probeta # 4



Figura 3.8 Identificación de áreas de prueba probeta # 1

3.4 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIO

3.4.1 PRUEBAS METALOGRAFICAS

- Metalografías del metal base, y las uniones soldadas de las zonas afectadas por el calor (Z.A.C) y área soldada

Este ensayo consiste en cortar por el centro del punto de soldadura una sección de la probeta y realizar la preparación metalográfica correspondiente para el análisis de la variación de la microestructura en el metal base, zona afectada por el calor (ZAC) y soldadura

3.4.2 PRUEBAS DE ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS METALES DE APORTE

- Caracterización química del metal base
- Caracterización de los materiales de aporte de los procesos GMAW y SAW
- Prueba de Macroataque

El material base

3.4.2.1 Acero ASTM 633 grado E, a través de espectrometría para determinar el contenido de los elementos químicos del mismo.

3.4.2.2 El metal de aporte

Tanto para el proceso de fabricación del componente (SAW): Electrodo para proceso por arco sumergido A5.17/ A5.23 LA-100,
Fundente: F9A6-EM2-M2-H8, como para el proceso de reparación por GMAW: ER-70S-6

3.4.3 PRUEBAS MECÁNICAS

- Ensayo de tensión en la soldadura
- Ensayo de microdureza
- Ensayo de impacto

3.4.3.1 Ensayo de tensión

Este ensayo consiste en estirar una probeta hasta su rompimiento, en una máquina de tensión y los resultados obtenidos nos proporcionan una gran cantidad de información como la resistencia máxima a la tensión, esfuerzo de cedencia, % de elongación, % de reducción de área.

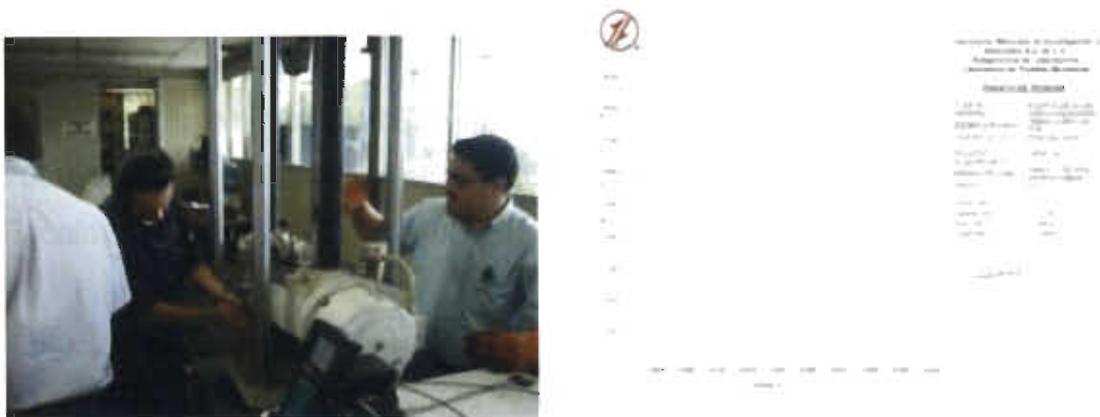


Figura 3.9 Prueba de tensión

El ensayo de resistencia a la tensión en soldadura se realizara bajo el estándar ASTM E8/E8 M-2008, AWS D1, 1era Ed. 2008, el equipo utilizado fue una máquina TINIUS-OLSEN 100 TON.

3.4.3.2 Ensayo de microdureza

Se evaluó la microdureza en cada una de las áreas O, W y G como se indica en la Figura 3.10

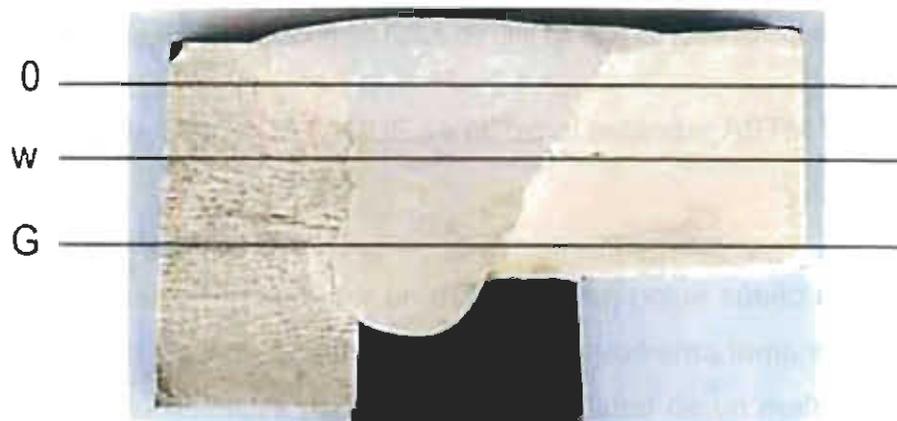


Figura 3.10 Áreas definidas para prueba de de dureza

- Mapeo de microdureza: Se evaluarán cinco zonas de cada una de las condiciones como se muestra en la Figura 3.10
 - La zona del material base de cada uno de los dos espesores
 - La zona afectada por el calor de cada uno de los materiales disímiles
 - La zona de soldadura

El ensayo de MICRODUREZA se realizó utilizando el estándar ASTM E384-2008, el equipo utilizado es el: WILSON INSTRON, Penetrador TIPO: $\leq 136^\circ$, Escala: HV10, carga utilizada 0.5 Kfg

3.4.3.3 Prueba de macroataque

Es una prueba para determinar la sanidad de la soldadura aplicada

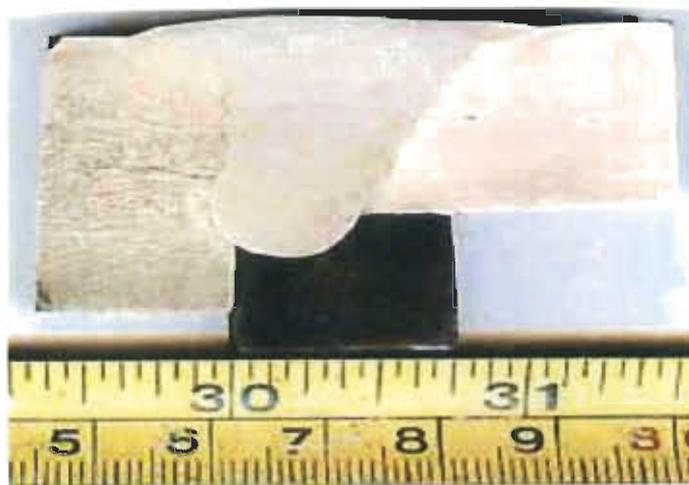


Figura 3.11 Fotografía típica de una prueba de macroataque

Para la prueba de MACROATAQUE se utilizó el estándar ASTM E340/2000

3.4.3.4 Ensayo de impacto

Esta prueba consiste en someter un material a un golpe súbito e intenso, en el cual la velocidad de aplicación del esfuerzo es extremadamente grande, esta prueba a menudo se utiliza para evaluar la fragilidad de un material bajo esas condiciones.

La prueba de impacto se realizará bajo el estándar ASTM E23/07, el equipo utilizado TINIUS-OLSEN, capacidad: 385 joules. Dimensiones de las probetas: 10.00 X 10.00 mm, ranura tipo "V".

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRUEBAS METALOGRAFICAS

Se obtuvieron los resultados de las pruebas metalográficas para el metal base y para cada una de las cuatro probetas con las condiciones de sin reparación, una, dos o tres reparaciones.

METAL BASE

No se encontraron cambios mayores en el análisis metalográfico del metal base de ambas placas de 1" y ½" unidas por soldadura se encontró estructura perlítica y granos equiaxiales de ferrita con un tamaño de grano de 9-9.5 de acuerdo a la norma ASTM como se puede observar en la Figura 4.1.

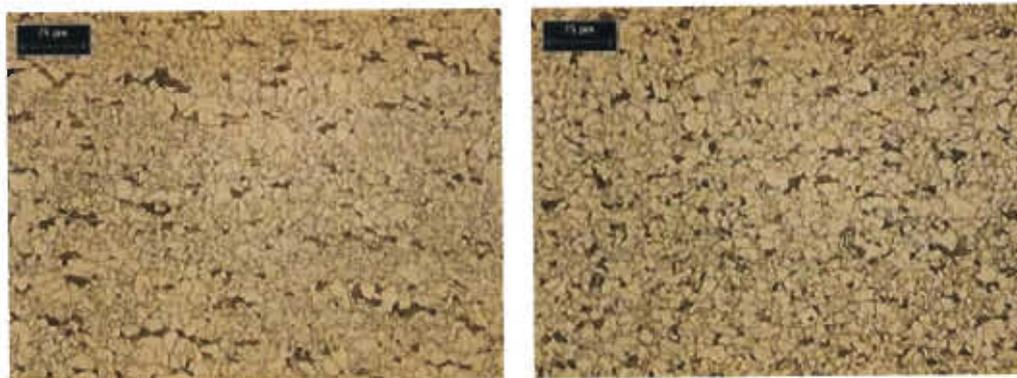


Figura 4.1. Microestructura formada por granos equiaxiales de ferrita más perlita con tamaño de grano ASTM 9-9½ de las placas de ½" y 1" de espesor, respectivamente, (Nital 5%) 100X.

ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)

Las soldaduras multipases; como las utilizadas en la elaboración de las probetas, pueden causar una influencia térmica adicional en la ZAC. La retransformación de ferrita a austenita ocurre parcialmente cuando el grano grueso de la ZAC es recalentado entre los rangos de A_{c1} y A_{c3} a temperaturas de 707 y 865°C, las cuales se obtienen del diagrama hierro carbono con la composición del C de la aleación en cuestión. La formación de austenita en este rango representa el inicio y fin de la transformación de la microestructura de la aleación. Para mayor exactitud en la medición de estos cambios, se utiliza el modelo de ecuaciones propuesto por Andrew [9].

La ZAC de las cuatro condiciones estudiadas evidencian una transformación de microestructura equiaxial (del metal base) a una mezcla de granos refinados de ferrita alotriomórfica y granos alargados de ferrita acicular. En la muestra sin reparación se observan la misma microestructura, pero con granos más gruesos que las de varias reparaciones como se muestra en las Figuras 4.2 y 4.3.



Figura 4.2. Microestructura de la ZAC en muestras sin reparación y con una reparación, respectivamente (Nital 5%) 200X.



Figura 4.3 Microestructura de la ZAC en muestras con dos y tres reparaciones, respectivamente (Nital 5%) 200X.

Se observaron las mismas zonas afectadas por el calor de las cuatro muestras, en microscopía electrónica de barrido (MEB) a magnificaciones de 1000X, evidenciando un ligero crecimiento de grano ferrítico y en general las microestructuras muy similares, tal como se muestran en la Figura 4.4 con una y tres reparaciones respectivamente.

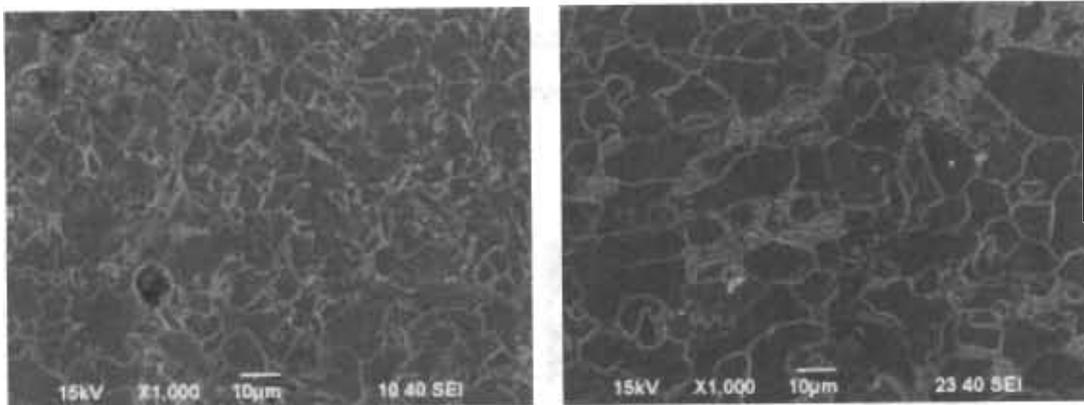


Figura 4.4 Microestructura de la ZAC de las muestras con una y tres reparaciones respectivamente (MEB)

Se pueden observar las diferentes microestructuras del área de soldadura así como de las zonas afectadas por el calor tanto grano grueso como grano fino de la muestra sin reparación, la cual se presenta en la Figura 4.5.

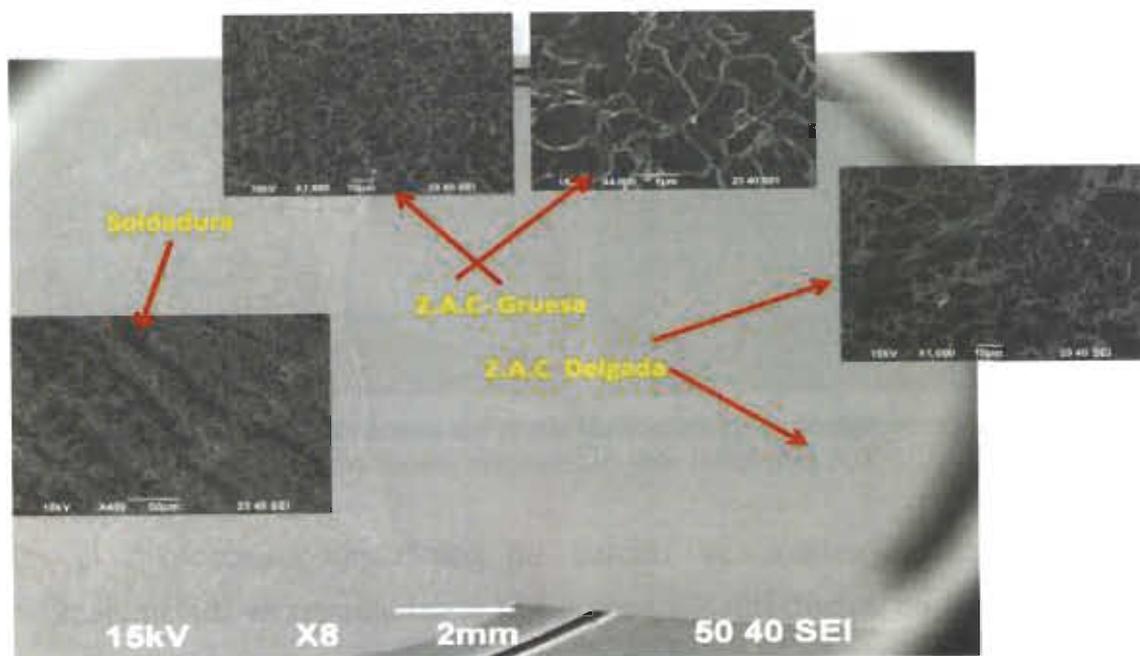


Figura 4.5. Microestructuras del metal de soldadura y ZAC probeta sin reparación (MEB)

METAL DE SOLDADURA

En las cuatro condiciones del área de soldadura (sin reparación, con una, dos y tres reparaciones, respectivamente) brazos columnares y granos proeutectoides de ferrita y ferrita acicular fueron observados en el microscopio óptico como se muestra en las Figuras 4.6 y 4.7.



Figura 4.6. Microestructura del metal de soldadura, probetas sin reparación y con una reparación, respectivamente (Nital 5%) 50X.



Figura 4.7. Microestructura del metal de soldadura, probetas con dos y tres reparaciones, respectivamente (Nital 5%) 50X

En el microscopio electrónico de barrido se pueden observar que la microestructura es caracterizada por granos proeutectoides de ferrita y ferrita acicular.

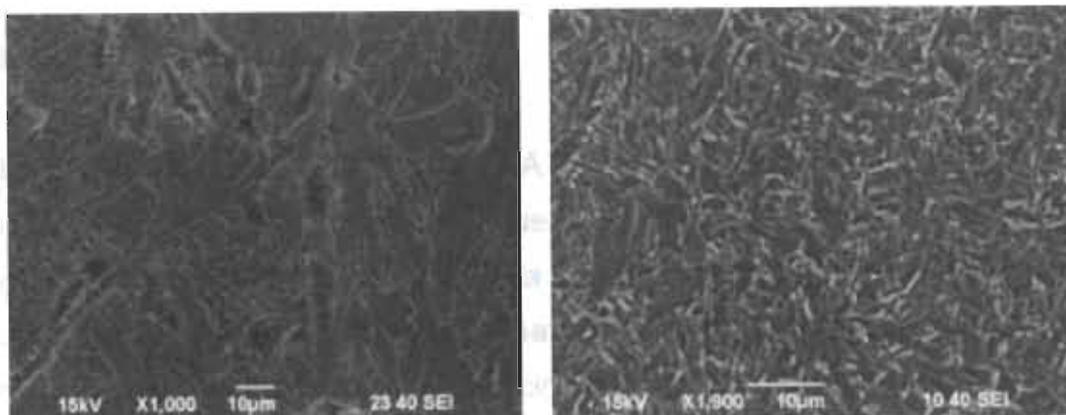


Figura 4.8 Microestructura del metal de soldadura de las probetas con una y tres reparaciones, respectivamente. (MEB)

4.2 ANÁLISIS QUÍMICO

Se obtuvieron los resultados de la caracterización del metal base y los elementos químicos que lo componen mostrándose estos en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Análisis químico (%) del metal base de ambas muestras de ½" y 1"

MUESTRAS	C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	W
MB ½" de espesor	0,05	0,01	1,37	0,009	0,23	0,13	0,11	0,04	0,236	0,01	0,021	0,0195	<0,002
MB 1" de espesor	0,06	0	1,38	0,008	0,22	0,14	0,12	0,04	0,259	0,009	0,019	0,02	<0,002
ASTM A633 Grado E (máx)	0,20	0,006	1,65	0,025	-	-	-	-	-	0,10	-	-	-

Se obtuvieron los resultados de la composición química de los materiales de aporte: para el alambre ER-70S-6 del proceso GMAW utilizado para la reparación de las piezas y para el AWS F9A6-EM2-M2-H8 utilizado en el proceso de arco sumergido (SAW) el cual es utilizado en la fabricación de los componentes, que no necesitan ser reparados. Los elementos químicos de estos materiales se muestran en la tabla 4.2

Tabla 4.2. Análisis químico (%) de los materiales de aporte de los procesos GMAW y SAW

Identificación	C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	W
Proceso GMAW : ER70S-6	0.1	0.034	0.95	0.025	0.45	0.15	0.1	0.1	0.45	0.002	-	-	-
Proceso SAW: LA-100	0.06	0.004	1.58	0.005	0.48	0.05	1.88	0.43	0.11	0.01	-	0.03	-

4.3 PRUEBAS MECÁNICAS

4.3.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN EN LA SOLDADURA

No se encontró una correlación que mostrara que la reparación afecta negativamente el valor de la resistencia a la tensión de la unión soldada aun y cuando los resultados de esta prueba para las cuatro probetas (Sin reparación y con una, dos y hasta tres reparaciones) mostraron entre ellas algunas variaciones en el esfuerzo máximo.

Una explicación del porque no hay una degradación en la resistencia a la tensión en el área soldada en cada una de las cuatro muestras, es que ambos materiales de aporte, tanto el utilizado en el proceso de producción normal con arco sumergido (Material LA-100 combinación de fundente y cable) el cual tiene una resistencia a la tensión de 106,000 Psi (730 MPa) como el material utilizado para realizar las reparaciones (soldadura con protección de gas: GMAW ER70S-6) son capaces de proporcionar valores de resistencia al ensayo de tensión por arriba de los 70,000 Psi (482 MPa)

A pesar de las diferencias obtenidas entre los cuatro valores los cuales son mostrados en la tabla 4.3 y graficados en la Figura 4.8, los valores de

resistencia a la tensión obtenidos en cada una de las cuatro condiciones son considerados aceptables por las especificaciones del producto, la cual llama a un valor de mínimo 70,000 Psi (482 MPa).

Tabla 4.3. Valores obtenidos del ensayo de tensión.

MUESTRAS	ESPESOR (Mm)	ANCHO (MM)	CARGA MAXIMA (kgf)	ESFUERZO MAXIMO (Mpa / Psi)	ZONA DE RUPTURA
Sin reparacion	10.54	18.61	11,000	550 / 79,762	METAL BASE
Una reparacion	12.02	12,650	537 / 77,839	METAL BASE	
Dos reparaciones	11.82	18.69	12,870	572 / 82,860	METAL BASE
Tres reparaciones	10.59	18.91	11,060	542 / 78,552	METAL BASE

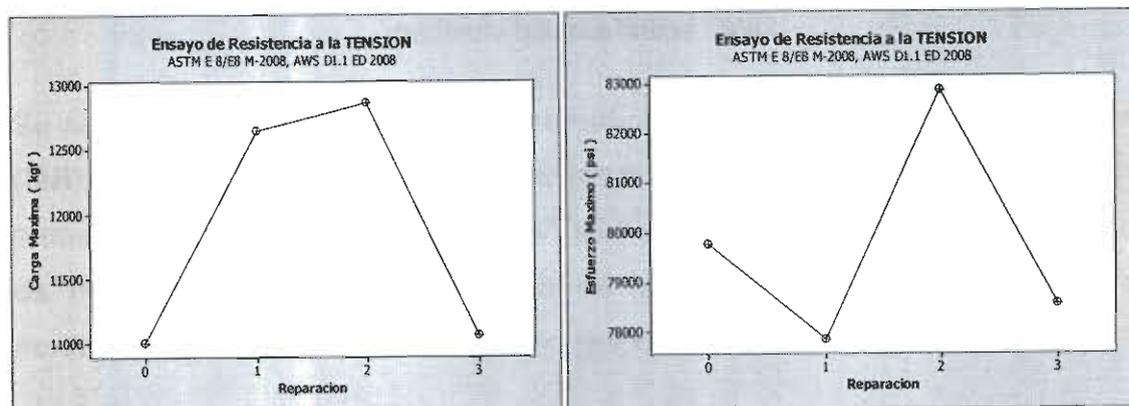


Figura 4.9. Comportamiento del ensayo de tensión carga máxima y esfuerzo máximo, respectivamente

4.3.2 ENSAYO DE MICRODUREZA

El ensayo de microdureza se realizó con un Microdurómetro Wilson Instron (T2100 BR 2106) con ángulo de penetrador $\alpha = 136^\circ$, con 10 Kgf de carga en la escala de Vickers (HV_{10}) durante 10s. en las diferentes zonas del metal de soldadura, ZAC y metal base de 1" y 1/2" se realizaron mediante tres mapeos de línea identificados como OWG, en cada una de las cuatro muestras tal como se observa en la Figura 4.10

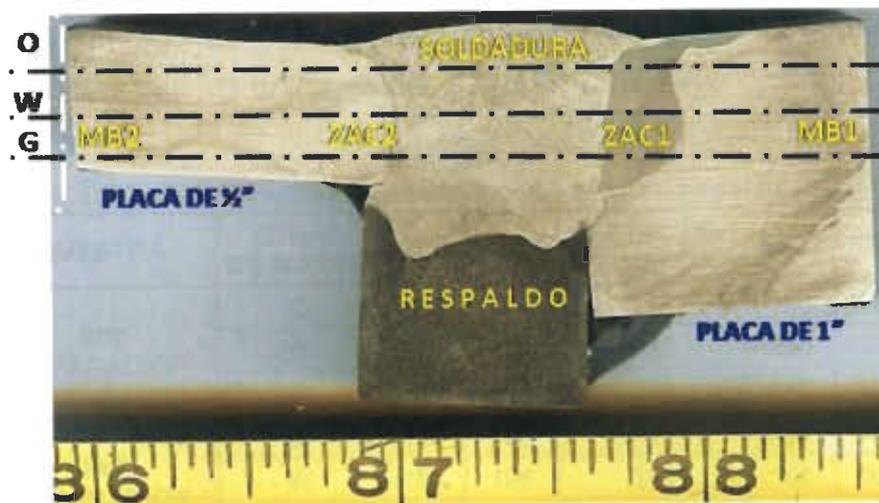


Figura 4.10 Mapeos de las mediciones de la microdureza de las diferentes zonas del metal de soldadura, ZAC y metal base de 1" y 1/2", mediante las tres líneas OWG

Se realizaron un promedio de tres indentaciones en cada zona del metal base (MB), metal de soldadura (MS) y la zona afectada por el calor (ZAC) hacia ambos lados de las placas de 1" y 1/2", respectivamente. Los valores promedios de microdureza HV para cada una de las cuatro probetas de prueba se muestran en la tabla 4.4 y la gráfica correspondiente en la Figura 4.10.

La distribución de dureza es homogénea en todas las zonas evaluadas, sin embargo es notorio que aquellos valores más altos se obtienen en el metal de la soldadura. Lo cual es congruente con la microestructura obtenida de ferrita acicular y ferrita alotriomórfica en el metal de soldadura, mientras que los valores más bajos corresponden a las zonas del metal base, cuya microestructura es la de condición de normalizado, es decir granos equiaxiales de ferrita con trazas de perlita.

El hecho de que la dureza más elevada se encuentre en la probeta sin reparación se puede explicar por el hecho de que la probeta sin reparación fue elaborada exclusivamente con el proceso SAW cuyo material de aporte (Material LA-100 combinación de fundente y cable) proporciona una mayor

dureza en la zona soldada que la que proporciona el material de aporte utilizado para las probetas que fueron reparadas (GMAW ER70S-6).

Tabla 4.4. Resultados del ensayo de microdureza (HV_{10}).

MUESTRA	ZONAS DE MAPEO	MB1	ZAC1	METAL DE SOLDADURA	ZAC2	MB2
SIN REPARACION	O	183	187	234	190	170
	W	179	186	232	200	168
	G	171	274	230	175	163
UNA REPARACION	O	184	188	195	194	171
	W	194	196	182	180	166
	G	189	202	192	191	170
DOS REPARACIONES	O	187	184	184	200	169
	W	185	177	176	183	169
	G	180	173	167	199	170
TRES REPARACIONES	O	173	203	187	198	183
	W	170	206	180	187	186
	G	166	199	172	180	190

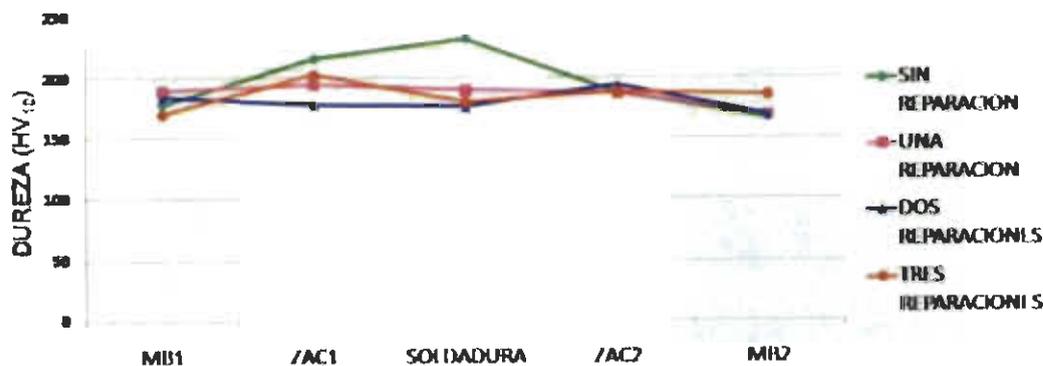


Figura 4.11 Comportamiento de la microdureza de las diferentes zonas en las cuatro probetas.

4.3.3 PRUEBA DE MACROATAQUE

La prueba de macroataque fue llevada de acuerdo con el estándar ASTM E340 en una superficie rectificada para cada uno de las cuatro muestras. Las muestras fueron introducidas en un recipiente refractario con una solución ácida 1:1 (HCL + H₂O) a una temperatura de 70 °C a 80 °C durante 15 a 20 minutos

De las cuatro probetas solo en una de ellas, la probeta que fue reparada en tres ocasiones mostró una discontinuidad que después de su evaluación se catalogó como defecto, se trata de un defecto localizado entre el área de soldadura, la placa de respaldo y el material base de espesor de 0.5 pulgadas como se muestra en la Figura 4.15 . Las otras tres probetas (Sin reparación, con una y con dos reparaciones respectivamente) no mostraron discontinuidades en el área de interés, por lo que se considera aceptable esta prueba en ellas. (Figuras 4.12 a 4.15).

La penetración de la soldadura en la probeta sin reparación se muestra en una forma geométrica regular, sin penetrar en la barra de respaldo de la unión, mientras que en las probetas que fueron reparadas muestran una penetración irregular y con una marcada penetración hasta la barra de respaldo. También puede observarse que en la probeta sin reparación se muestra bien marcada la zona afectada por el calor no así en las probetas reparadas en las cuales la zona afectada por el calor no se observa bien delimitada



Figura 4.12 Probeta sin reparación Figura 4.13 Probeta con una reparación)

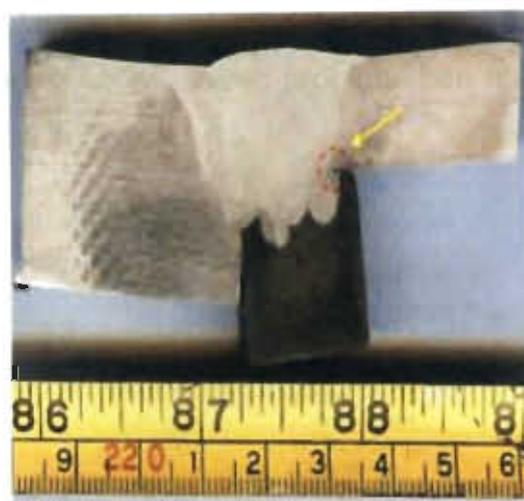


Figura 4.14 Probeta con dos reparaciones Figura 4.15 Probeta con tres reparaciones

4.3.4 PRUEBA DE IMPACTO

Se realizó un ensayo de resistencia al impacto en el metal base, en las zonas afectadas por el calor y en la soldadura de cuatro probetas: Una sin reparación y las otras tres con uno, dos y tres reparaciones respectivamente. Todas las pruebas se llevaron a cabo a temperatura controlada de -40°C .

La prueba de impacto fue llevada a cabo de acuerdo con el estándar ASTM E23 Equipo utilizado: TINIUS-OLSEN, Capacidad: 385 joules, Dimensiones de las probetas: 10.00 X 10.00 mm, ranura Tipo "V"

Se obtuvieron los resultados de las pruebas de impacto de cada una de las cuatro condiciones los cuales son mostrados en la tabla 4.5

Tabla 4.5. Valores de la prueba de impacto

PROBETA	MB1	ZAC1	SOLDADURA	ZAC2	TEMPERATURA °c	TEMPERATURA °c
Sin reparación	211	109	44	32	-40	18
Una reparación	161	176	13	23	-40	18
Dos reparaciones	212	90	13	21	-40	18
Tres reparaciones	93	30	10	27	-40	18

Una diferencia muy significativa en el valor de la resistencia al impacto fue encontrada entre la probeta sin reparación, y las otras tres probetas con una, dos y tres reparaciones como se muestra en la Figura 4.16.

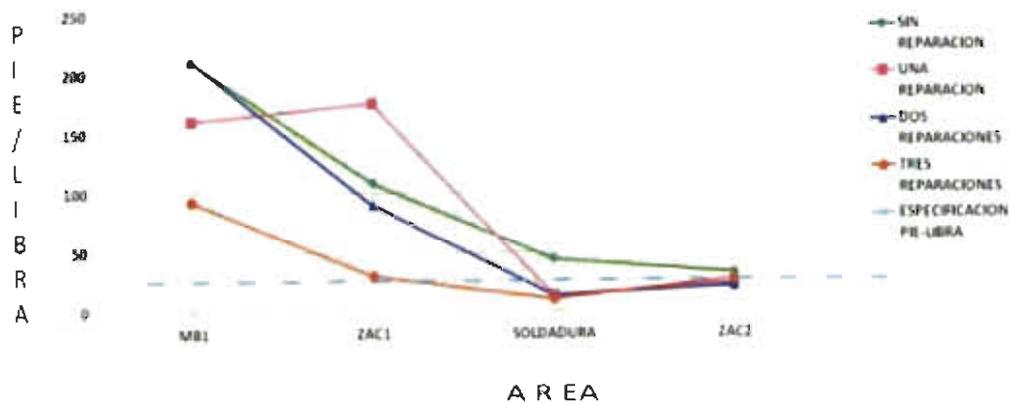


Figura 4.16. Valores del ensayo de resistencia al impacto de las diferentes zonas en las cuatro probetas.

Únicamente la probeta que no fue reparada, fue capaz de pasar la prueba de impacto definida por la especificación de ingeniería de este producto la cual tiene un valor mínimo de 18 ft-lb a una temperatura de prueba de -40°C .

Es conocido; gracias a diferentes estudios realizados, que a temperaturas altas la energía de impacto absorbida es relativamente alta. A medida que la temperatura desciende, la energía absorbida cae relativamente rápido en un rango de temperaturas estrecho. A menores temperaturas la energía absorbida tiene un valor pequeño y aproximadamente constante. Esta zona corresponde a la fractura frágil. Esta curva es llamada curva de transición dúctil-frágil.

La composición química tiene una decidida influencia en la energía de impacto, la tenacidad puede ser incrementada bajando el contenido de carbono e incrementando el contenido de manganeso

En el caso de las probeta soldadas únicamente con el proceso SAW con alambre LA-100 (Probeta SIN reparar) se tiene un contenido de carbono bajo

(0.06%) y de manganeso alto (1,58%) mientras que para el caso de las probetas reparadas se agrega a la unión el material de aporte del proceso GMAW: ER70S-6 el cual tiene un contenido de carbono más alto (0.10) y un contenido de manganeso más bajo (0.95) es decir por el cambio del material de aporte durante el proceso de reparación se degrada la tenacidad del material

Por otro lado, desde la perspectiva de la microestructura, la zona afectada por el calor (ZAC) de la soldadura tiene características diferentes de tenacidad que las del metal base, debido a que se crean varias tipos de microestructuras que se desarrollan en dicha área.

Por las micrografías obtenidas con el microscopio electrónico de barrido de la zona afectada por el calor (ZAC) se puede observar que los granos de la micrografía de la probeta sin reparación son más finos que los de la micrografía de la probeta con tres reparaciones como se muestra en la Figura 4.17

Se ha demostrado en diversos estudios que los granos pequeños tienden a absorber una mayor cantidad de energía que los granos de tamaño grande. Esto puede explicarse desde el aspecto metalográfico el porqué la probeta sin reparación tiene un valor más elevado en la resistencia a la prueba de impacto que la probeta que fue reparada en tres ocasiones

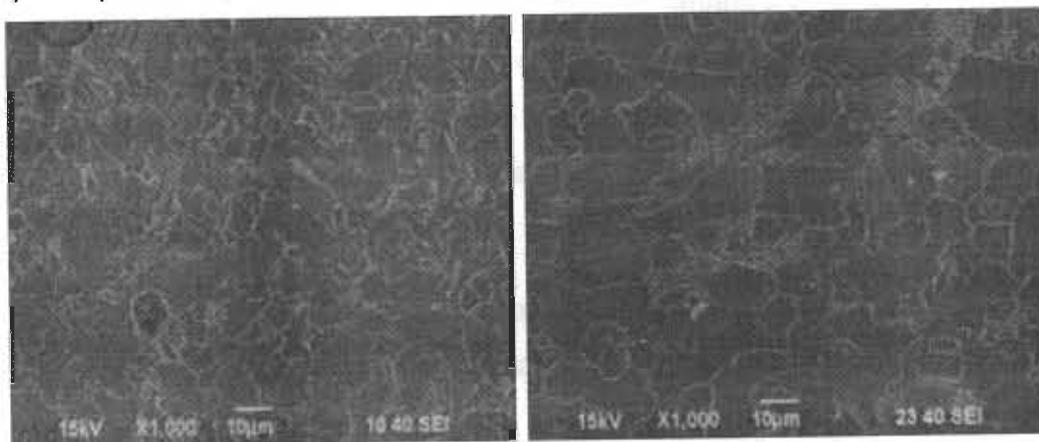


Figura 4.17 Metalografías (ZAC) sin reparación y con tres reparaciones

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES Y TRABAJO

FUTURO

De acuerdo a la evaluación metalográfica y las pruebas mecánicas realizadas podemos obtener las siguientes conclusiones:

1. No se observaron diferencias mayores en las microestructuras de las cuatro muestras (Sin reparación, con una, dos y tres reparaciones) sin embargo la ZAC de las cuatro condiciones estudiadas evidencian una transformación de microestructura equiaxial (del metal base) a una mezcla de granos refinados de ferrita alotriomórfica y granos alargados de ferrita acicular. En la muestra sin reparación se observan la misma microestructura, pero con granos más gruesos que las de varias reparaciones. En general se puede concluir que el proceso de reparación no afecta significativamente las microestructuras de los materiales cuando estos son reparados.
2. Los cambios entre los valores de resistencia a la tensión en el área de soldadura de cada una de las muestras no se ve afectado de manera significativa por causa del proceso de reparación ya que tanto las probetas sin reparar así como las tres probetas reparadas alcanzaron valores por encima de los 70,000 Psi que es el valor mínimo requerido por la especificación de Ingeniería en la fabricación. No se encontró una

correlación que mostrara que la reparación afecta negativamente el valor de la resistencia a la tensión de la unión soldada aun y cuando los resultados de esta prueba para las cuatro probetas (Sin reparación y con reparaciones) mostraron entre ellas algunas variaciones en el esfuerzo máximo. Una explicación del porque no hay una degradación en la resistencia a la tensión en el área soldada en cada una de las cuatro probetas, es que ambos materiales de aporte, tanto el utilizado en el proceso de producción normal con de arco sumergido (Material LA-100 combinación de fundente y cable) el cual tiene una resistencia a la tensión de 106,000 Psi (730 MPa) como el material utilizado para realizar las reparaciones (soldadura con protección de gas: GMAW ER70S-6) son capaces de proporcionar valores de resistencia al ensayo de tensión por arriba de los 70,000 Psi (482 MPa)

3. Los resultados de la microdureza encontrados en las diferentes zonas muestran un rango con un valor mínimo de 163 vickers hasta un máximo de 236 vickers. observándose los valores más elevados en el área de soldadura en cada una de las cuatro probetas. La distribución de dureza es homogénea en todas las zonas evaluadas, sin embargo es notorio que aquellos valores más altos se obtienen en el metal de la soldadura. Lo cual es congruente con la microestructura obtenida de ferrita acicular y ferrita alotriomórfica en el metal de soldadura, mientras que los valores más bajos corresponden a las zonas del metal base, cuya microestructura es la de condición de normalizado, es decir granos equiaxiales de ferrita con trazas de perlita.

La dureza más elevada se encuentra en la probeta sin reparación se explica por el hecho de que esta fue elaborada exclusivamente con el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) cuyo material de aporte (Material LA-100 combinación de fundente y cable) proporciona una mayor dureza en la zona soldada que la que proporciona el material de

aporte ER70S-6 utilizado para las probetas que fueron reparadas con el proceso de soldadura con protección de gas (GMAW)

4. La prueba de impacto mostró que únicamente la probeta sin reparación obtuvo un valor por encima del valor mínimo de especificación el cual es de 15 libra-pie. Las tres probetas que fueron reparadas una, dos o tres veces muestran una degradación en el valor de su resistencia al impacto a la temperatura de prueba (- 40°C).
5. En el caso de las probeta soldadas únicamente con el proceso SAW con alambre LA-100 (Probeta sin reparar) se tiene un contenido de carbono bajo (0.06%) y de manganeso alto (1,58%) mientras que para el caso de las probetas reparadas se agrega a la unión el material de aporte del proceso GMAW: ER70S-6 el cual tiene un contenido de carbono más alto (0.10) y un contenido de manganeso más bajo (0.95).

La composición química tiene una decidida influencia en la energía de impacto, la tenacidad puede ser incrementada bajando el contenido de carbono e incrementando el contenido de manganeso, el efecto opuesto es decir la degradación de la tenacidad ocurre con el cambio del material de aporte durante el proceso de reparación ya que se incrementa el contenido de carbono (De 0.06 a 0.10) y se disminuye el contenido de manganeso (De 1.58% a 0.95%). Por otro lado desde la perspectiva de la microestructura, la zona afectada por el calor (ZAC) de la soldadura tiene características diferentes de tenacidad que las del metal base, debido a que se crean varios tipos de microestructuras que se desarrollan en dicha área.

Por las micrografías obtenidas con el microscopio electrónico de barrido de la zona afectada por el calor (ZAC) se puede observar que los granos

de la micrografía de la probeta sin reparación son más finos que los de la micrografía de la probeta con tres reparaciones.

Se ha demostrado en diversos estudios que mientras que los granos pequeños tienden a absorber una mayor cantidad de energía que los granos de tamaño grande. Esto puede explicar desde el aspecto metalográfico el porqué la probeta sin reparación tiene un valor más elevado en la resistencia a la prueba de impacto que la probeta que fue reparada en tres ocasiones.

BIBLIOGRAFÍA

1. The Welding Institute, Abington Hall Abington Cambridge CB1 6AL, 1978
Submerged Arc Welding
2. O'Brien R.L., 1992; Welding Handbook, Eight Edition Vol. 2, Welding
Proxess,550N.W.Lejeune Road P.O. Box 351040; Miami, Fl 33135; USA,
American Welding Society
3. ASTM Designation: A 633/A633M – 01 (Reapproved 2006), Standard
Specification for Normalized High-Strength Low-Alloy Structural Steel
Plates
4. Yaowu Shia, Zhunxiang Hanb " Effect of weld thermal cycle on
microstructure and Fracture toughness of simulated heat-affected zone
for a 800MPa grade high strength low alloy steel. " Journal of materials
processing technology No. 207 " (2008)
pp 30–39
5. G. Magudeeswaran a, V. Balasubramanian, G. Madhusudhan Reddy "
Effect of Welding processes and consumables on high cycle fatigue life of
high strength, quenched and tempered steel joints ", Materials and
Design No.29 (2008) pp1821–1827
6. Sindo KouU, "Welding Metallurgy, 2nd. Ed, John Willey & Sons Inc.,
Hoboke, New Jersey
7. M. N. Georgiev, N. Ya. Mezhova, V.N. Minaev, and Yu N. Simonov ,
"Structural
8. Aspects the cyclic crack resistance of hardened and tempered steels,
Metallovedenie
9. Termicheskaya obrabotka metallov, No. 6, pp24-25, Junio, 1988
- 10.American Welding Society " Welding Inspection Technology (WIT), Fifth
Ed-2008

11. M.N. Georgiev, N. Ya. Mezhova, V. N. Minaev, and Yu. N. Simonov, "Structural aspects the cyclic crack resistance of hardened and tempered steels," *Fiz. Khim. Mekh. Mater.*, No. 5, 48-53 (1985).
12. I. V. Kudryavtsev and E. V. Rymynova, "Effect of structural factors and strain hardening on sensitivity of steels to stress concentrations with cyclic loads" in: *New Investigations of Strength and Service Life on Machine Parts and Equipment [in Russian]*, Trudy TsNIITMASH. No. 53, Izd. ONTI, Moscow (1965).
13. Sadegh Moenifar, Amir Hossein Kokabi, Hamid Reza Madaah Hosseini "Effect on tandem submerged arc welding process and parameters of Gleeble simulator thermal cycles on properties of the intercritically reheated heat affected zone", *Materials and Design*, February 2010
14. S. Shen, I., N.A. Oguocha, S. Yannacopoulos, "Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc weld ASTM A709 Grade 50 steel joints" *Journal of Materials Processing Technology*, May 2011
15. Gunaraj V., Murugan N, *Welding Journal*, October 2000, Prediction and optimization of Weld bead volume for submerged arc process part 1, pp 283-294
16. American Welding Society, Educational Department, *Welding Inspection Technology*, fourth
17. B. London, D.V. Nelson and J.C. Shyne, "The Effect of Tempering Temperature on Near-Threshold Fatigue Crack Behavior in Quenched and Tempered 4140 Steel" *Metallurgical Transactions A*, Volumen 19A, October 1988, pp 1988-2497
18. L.J. Yang, R.S. Chandel, M.J. Bibby, *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, The effects of process variables on the bead width of submerged arc weld deposits
19. S. Shen, I.N.A. Oguochaa, S. Yannacopoulosb, *Journal of Materials Processing Technology*, September 2011 "Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded" ASTM A709 Grade 50 steel joints"

20. E. L. Kharish, S. Ya. Yarema, G. D. Stefanov, A. B. Kuslitskii, G. A. Khasin, and S. N. Chuvatina "Limited Impact Endurance of 30CrMnSiNiN Steel" *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*, Vol. 5, No. 4, pp. 503-505, 1969

LISTADO DE FIGURAS

- Figura 2.1 Vista de un proceso de soldadura por arco sumergido
- Figura.2.2 Superficie de fractura de una grieta de un espécimen simulado térmicamente
- Figura 2.3 a) ZAC con grano grueso simulado con bandas como microestructura
b) Listones de martensita a 50,000 X con microscopio electrónico de Transmisión
- Figura 2.4 a) Constituyente de M/A de ZAC con fase parcialmente transformada
b) Estructura Ferrita-Bainita a 20,000 X con microscopio electrónico de transmisión
- Figura 2.5 Micrografía óptica del material base
- Figura 2.6 Micrografía óptica metal de soldadura unión con acero inoxidable austenítico (FA)
- Figura 2.7 Micrografía óptica metal de soldadura unión con acero ferrítico de bajo hidrógeno (SF)
- Figura 2.8 Porosidad en la soldadura, mostrando poros por gas esféricos e interdendríticos. Un poro interdendrítico es agrandado para mayor claridad
- Figura 2.9 Fractura superficial de una soldadura de acero inoxidable 316
- Figura 2.10 Agrietamiento por solidificación
- Figura 2.11 Microfracturas a diferentes temperaturas de revenido
- Figura 2.12 Fusión Incompleta
- Figura 2.13 Discontinuidad por inclusiones
- Figura 2.14 Discontinuidad por socavado
- Figura 2.15 Defecto causado por soldadura insuficiente
- Figura 2.16 Traslapos de soldadura
- Figura 2.17 Defecto por convexidad en el cordón de soldadura
- Figura 2.18 Chisporroteo de la soldadura
- Figura 2.19 Proceso de soldadura GMAW
- Figura 2.20 Diagrama de un equipo utilizado en el proceso GMAW
- Figura 2.21 Clasificación del alambre AWS
- Figura 2.22 Transferencia de soldadura por corto circuito

Figura 2.23 Transferencia globular

Figura 2.24 Transferencia por rocío

Figura 2.25 Transferencia pulsada

Figura 3.1 Preparación de la probeta para pruebas de laboratorio

Figura 3.2 Aplicando el precalentamiento en la preparación de probetas

Figura 3.3 Aplicación del arco sumergido en las probetas de prueba

Figura 3.4 Inspección por ultrasonido en las probetas de prueba

Figura 3.5 Preparando el área para iniciar la reparación de una de las probetas de prueba

Figura 3.6 Realizando la reparación de una de las probetas de prueba

Figura 3.7 Identificación de áreas de prueba de la probeta # 4

Figura 3.8 Identificación de áreas de prueba probeta # 1

Figura 3.9 Prueba de tensión

Figura 3.10 Áreas definidas para prueba de dureza

Figura 3.11 Fotografía típica de una prueba de macroataque

Figura 4.1 Microestructura formada por granos equiaxiales de ferrita más perlita con tamaño de grano ASTM 9-9½ de las placas de ½" y 1" de espesor, respectivamente, (Nital 5%) 100X

Figura 4.2 Microestructura de la ZAC en muestras sin reparación y con una reparación, respectivamente (Nital 5%) 200X.

Figura 4.3 Microestructura de la ZAC en muestras con dos y tres reparaciones, respectivamente (Nital 5%) 200X.

Figura 4.4 Microestructura de la ZAC de las muestras con una y tres reparaciones respectivamente (MEB)

Figura 4.5 Microestructuras del metal de soldadura y ZAC probeta sin reparación (MEB)

Figura 4.6 Microestructura del metal de soldadura, probetas sin reparación y con una reparación, respectivamente (Nital 5%) 50X

Figura 4.7 Microestructura del metal de soldadura, probetas con dos y tres reparaciones, respectivamente (Nital 5%) 50X

Figura 4.8 Microestructura del metal de soldadura de las probetas con una y tres reparaciones, respectivamente. (MEB)

Figura 4.9 Comportamiento del ensayo de tensión carga máxima y esfuerzo máximo, respectivamente

Figura 4.10 Mapeos de las mediciones de la microdureza de las diferentes zonas del metal de soldadura, ZAC y metal base de 1" y ½", mediante las tres líneas OWG

Figura 4.11 Comportamiento de la microdureza de las diferentes zonas en las cuatro probetas.

Figura 4.12 Probeta sin reparación

Figura 4.13 Probeta con una reparación

Figura 4.14 Probeta con dos reparaciones

Figura 4.15 Probeta con tres reparaciones.

Figura 4.16 Valores del ensayo de resistencia al impacto de las diferentes zonas en las cuatro probetas

Figura 4.17 Metalografías (ZAC) sin reparación y con tres reparaciones

LISTADO DE TABLAS AUTORA

Tabla 2.1 Propiedades de tensión transversal

Tabla 4.1 Análisis químico (%) del metal base de ambas muestras de ½" y 1"

Tabla 4.2 Análisis químico (5) de los materiales de aporte de los procesos GMAW y SAW

Tabla 4.3 Valores obtenidos del ensayo de tensión

Tabla 4.4 Resultados del ensayo de microdureza (HV₁₀)

Tabla 4.5 Valores de la prueba de impacto

AUTOBIOGRAFÍA:

Manuel Eduardo Valenzuela Hipólito

Fecha y lugar de nacimiento: 06 de Septiembre de 1966, Hidalgo del Parral Chihuahua, México

Estudios:

ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL.

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. DE C.V.

Sept. 2008 – Sept. 2009 Promedio: 90.5

INGENIERÍA INDUSTRIAL EN PROCESOS DE PRODUCCIÓN.

Instituto Tecnológico de Chihuahua, 1990 – 1994 Promedio: 88.75

MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN, ESPECIALIDAD OPERACIONES

Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de

Chihuahua / Universidad Autónoma de Cd. Juárez 1995 -1998. Promedio: 94.5

MAESTRÍA EN FINANZAS,

Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de

Chihuahua 2002 – 2004. Promedio: 92.5

CERTIFICACIÓN COMO ESPECIALISTA EN LA ADMINISTRACIÓN Y PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL CONTROL DE INVENTARIOS (CPIM)

Asociación Americana para la Optimización de las Operaciones

(APICS Capítulo Chihuahua), 2004 – 2006

CERTIFICACIÓN COMO ESPECIALISTA EN LA ADMINISTRACIÓN DE CADENA DE SUMINISTROS (CSCP).

Asociación Americana para la Optimización de las Operaciones (APICS -Universidad de

Houston), 2007-2008