

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA POR
ARCO FCAW Y GMAW EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN EN UNIONES
CON ESPEORES SUPERIORES A 50 MM**

POR

LÁZARO MAGAÑA MARTÍNEZ

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA, 25 DE SEPTIEMBRE DE 2013

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA POR
ARCO FCAW Y GMAW EN ACEROS DE BAJA ALEACIÓN EN UNIONES
CON ESPEORES SUPERIORES A 50 MM**

POR

LÁZARO MAGAÑA MARTÍNEZ

MONOGRAFÍA

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

SALTILLO, COAHUILA, 25 DE SEPTIEMBRE DE 2013

AGRADECIMIENTOS

Considero oportuno el momento para dar gracias a todas aquellas personas que durante todo el tiempo dedicado a esta especialidad han sido guía, impulso y apoyo para poder alcanzar los objetivos planteados en un inicio, son muchas personas a las que agradezco, creo si describo realmente todo lo que debo, este aparatado de agradecimientos tendría más hojas que el mismo proyecto. Gracias a:

Mis maestros

Gracias al Dr. Arturo y la Dra. Rocío por sus correcciones en la estructura y redacción de este proyecto, gracias por sus consejos y por regalarme parte de su experiencia. Gracias a la maestra Maru por ser como mi madre adoptiva durante este tiempo y no creo poder verla de otra manera aún terminada la especialidad. Gracias al Dr. Héctor, Dr. Felipe de Jesús, M.C. Víctor, M.C. Fernando, Dra. Gladys, Dr. Carlos Vera por brindarnos sus conocimientos y experiencias, sin los cuales la culminación en buenos términos de este trabajo sería un objetivo inverosímil. Gracias de verdad...

Mis amigos

Gracias a Gerardo, Sergio y Daniel, mis amigos tabasqueños por haber hecho más agradable este año lejos de casa, aunque no lo crean esas diferencias que a veces hubo entre nosotros fueron de mucho aprendizaje para mí. Gracias a Joel por su apoyo en acondicionar con algunos muebles la embajada tabasqueña. Gracias a Marisol, Valentín, Alejandro, Miguel, Mario, Ramiro, Rolando, Javier y Lupe por la unidad que caracterizó a esta generación.

CONACYT

Gracias al Conejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante este tiempo, apoyo que sin duda estimula para seguir buscando nuevos horizontes. Gracias por apoyar a la ciencia y la tecnología, llaves del progreso.

COMIMSA

No quiero sonar exagerado, pero no creo alcancen las letras del abecedario para agradecer por todo lo vivido y aprendido durante este año en mi “alma mater” COMIMSA. Gracias por permitirme formar parte de esta generación, gracias por formarme académicamente al más alto nivel, gracias por haberme dado la oportunidad de comparar lo que se está haciendo en términos de materiales y soldadura fuera del continente, gracias por permitirme alcanzar mi horizonte y por motivarme a seguir por más. Por eso y más, GRACIAS...

DEDICATORIAS

Con todo mi amor dedico este trabajo a mis abuelitos Mace y Pablo que aunque se han adelantado en el camino de la vida, estoy seguro, ellos me acompañaron en esas noches de estudio.

Dedico también este proyecto a mis padres Eva y Miguel, quienes con su apoyo y amor han sido la principal motivación para concluir en buenos términos este trabajo.

Sin duda mis hermanos Gris, Gela y Pablo son fuente de admiración, por eso dedico a ustedes este esfuerzo.

Con mucho amor para ustedes...

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Justificación.....	6
1.4. Planteamiento del problema.....	6
1.5. Aportación industrial.....	7
1.6. Alcance	7
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1. Aceros de baja aleación y alta resistencia HSLA	8
2.1.1. Propiedades.....	10
2.1.2. Clasificación.....	11
2.1.3. Aplicaciones.....	13
2.1.4. Soldabilidad	15
2.1.5. Metalurgia	16
2.1.6. Aleaciones ASTM A-572.....	19
2.2. Proceso de soldadura por arco metálico y gas GMAW	20
2.2.1. Introducción	20
2.2.2. Consumibles	24

2.2.3. Variables del proceso	25
2.2.4. Calidad de la soldadura	27
2.2.5. Parámetros de soldadura en uniones de grandes espesores	29
2.3. Proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente FCAW	31
2.3.1. Introducción	31
2.3.2. Consumibles	32
2.3.3. Variables del proceso	34
2.3.4. Calidad de la soldadura	34
2.4. Metalurgia en uniones de grandes espesores.....	36
2.4.1. ZAC en soldaduras multi-pasadas	36
2.4.2. Zona de fusión en soldaduras multi-pasadas	38
2.4.3. Soldaduras de una sola pasada vs multi-pasadas.....	39
2.4.4. Soldadura multi-pasadas en aceros HSLA	39
2.4.5. Transformaciones displacivas.....	42
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA.....	48
3.1. Aceros de baja aleación y alta resistencia.	48
3.2. Parámetros de soldadura del proceso GMAW en uniones de grandes espesores.....	49
3.3. Metalurgia en uniones de acero HSLA de grandes espesores.	49
CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO	51
4.1. Metodología	51
4.2. Materiales.....	55
4.3. Ensayos	57
4.4. Resultados	59
CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ÍNDICE DE TABLAS	79
ÍNDICE DE FIGURAS.....	80
APÉNDICE A	82
APÉNDICE B	86
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.....	90

SÍNTESIS

Con el fin de considerar si existe factibilidad para cambiar el proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW, por sus siglas en inglés) con el que se fabrica el cilindro de suspensión del camión minero, se ha llevado a cabo un análisis comparativo microestructural con el proceso por arco metálico y gas (GMAW, por sus siglas en inglés). Para dicho análisis se ha considerado tanto la composición química del metal base como del metal de soldadura. Los cupones de soldadura se unieron con los parámetros que se utilizan actualmente en la planta, y con parámetros propuestos para el proceso GMAW. La entrada de calor fue mayor con el proceso FCAW (3.5 KJ/mm) contra los 2.9 KJ/mm en el proceso GMAW. Las uniones se sometieron a ensayos de análisis químico, metalografía, microdureza y ensayo de tensión. Las microestructuras encontradas en ambas uniones fueron similares puesto que en los valores de su composición química no existe mucha diferencia; el contenido de C en los metales de soldadura oscila en 0.10 %. Se localizaron las diferentes regiones de la zona afectada por el calor (ZAC, por sus iniciales), las cuales están determinadas por los rangos de temperatura que alcanzan durante la soldadura. El perfil de dureza tiene un comportamiento decreciente con los valores máximos en el metal de soldadura con una dureza máxima de aproximadamente 210 HV en la unión soldada con el proceso FCAW. El

esfuerzo último a la tensión (UTS, por sus siglas en inglés) fue mayor con el proceso GMAW cuya fractura se presentó en el metal base; por otra parte las probetas que se soldaron con el proceso FCAW fracturaron en el la ZAC, por la mayor fragilidad que se obtuvo en la región de grano grueso.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La industria de la construcción, minera y agrícola exigen el uso de equipo y maquinaria pesada con materiales y manufactura de calidad, siendo la empresa que permitió llevar a cabo el proyecto, líder en este rubro. Actualmente dicha fábrica aplica la mayor cantidad de soldadura de toda la corporación para cubrir las necesidades en estas áreas.

Debido a esto, el interés de esta investigación se centra en componentes soldados en grandes espesores, ya que la mayor parte del equipo pesado está sometido a altos esfuerzos como:

- Fatiga
- Abrasión
- Tensión
- Compresión

Por lo anterior se desea estudiar y analizar a detalle la soldadura por ser una discontinuidad en el metal base en donde se generan zonas con diferentes microestructuras, lo cual impacta en las propiedades mecánicas.

En el presente trabajo se analizará la unión soldada en un cilindro de suspensión, que forma parte de un camión minero. Tales uniones son de espesores superiores a los 50 mm requiriendo así tamaños de soldaduras que en un solo cordón no se logran concebir.

Al requerir la unión de multicordones de soldadura, la entrada de calor en el componente se incrementa. Actualmente dicha unión se realiza por el proceso de soldadura FCAW obteniendo uniones aceptables, sin embargo la producción de escoria y la emisión de gran cantidad de gases durante el proceso generan contaminación, la cual es indispensable disminuir, e incita a obtener la unión con otro proceso que contrarreste los efectos del proceso FCAW. De esta forma se evaluará el proceso actual contra el proceso de soldadura GMAW.

Para esto es necesario aplicar principios metodológicos y tecnológicos en los diversos procedimientos de soldadura para generar uniones soldadas a partir de la coalescencia calidad-productividad.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar las propiedades microestructurales y mecánicas de la unión soldada con espesores superiores a 50 mm en el cilindro de suspensión de un camión minero, por los procesos de soldadura por arco FCAW y GMAW en aceros de baja aleación ASTM A-572.

1.2.2. Objetivos específicos

- Llevar a cabo el estado del arte de aceros de baja aleación y alta resistencia y procesos de soldadura FCAW y GMAW para uniones con espesores superiores a 50 mm.
- Proponer en base a la literatura los parámetros adecuados para el proceso de soldadura GMAW para uniones con espesores superiores a 50 mm.
- Realizar un caso de estudio elaborando uniones de placas de acero de baja aleación con espesores superiores a 50 mm con el proceso de soldadura GMAW con los parámetros obtenidos en la literatura y con el proceso FCAW.
- Llevar a cabo un análisis comparativo a nivel microestructural y de propiedades mecánicas (tensión y microdureza) de las placas soldadas por los procesos FCAW y GMAW.

1.3. Justificación

Una soldadura ideal es aquella que presenta homogeneidad en términos de microestructura y propiedades mecánicas en las piezas a unir, sin embargo este supuesto queda lejos de la realidad. No obstante se cuenta con herramientas metodológicas y tecnológicas que pueden ser aplicadas en el diseño, fabricación y funcionalidad de las uniones soldadas con mira en lograr dicha soldadura.

En la actualidad, para soldar espesores mayores a 50 mm se emplea el proceso FCAW, sin embargo, además de hacer multicordones, se tiene un alto nivel de contaminación debido a los gases que se emiten. Por tal motivo es necesario emplear otro proceso y llevar a cabo un comparativo para disminuir tiempos de obtención de la unión soldada, obtener buenas propiedades mecánicas y microestructurales, además de disminuir el grado de contaminación.

1.4. Planteamiento del problema

Los diferentes componentes de las maquinarias y equipos pesados están sometidos en su mayoría a cargas cíclicas. En este trabajo se analizará el cilindro de suspensión del camión minero fabricado de acero de baja aleación y alta resistencia (HSLA por sus siglas en inglés).

El proceso FCAW ofrece uniones soldadas de buena calidad, sin embargo genera escoria entre cada cordón aplicado, además de la emisión de una gran cantidad de gases.

Por tal motivo es necesario analizar otro proceso que otorgue las propiedades y la calidad deseada en la unión soldada de componentes con espesores superiores a 50 mm; dicho proceso es el GMAW.

1.5. Aportación industrial

La industria encargada de la fabricación de maquinaria pesada demanda procesos de soldadura que brinden la calidad deseada en la unión, un alto nivel de producción y a un bajo costo. De ahí la necesidad de establecer el proceso de soldadura que ofrezca las mejores características microestructurales y con buenas propiedades mecánicas en la unión de placas con espesores superiores a 50 mm.

1.6. Alcance

El presente trabajo brindará información acerca de la soldabilidad de los aceros HSLA con espesores superiores a 50 mm bajo los procesos GMAW y FCAW, definiendo por medio de análisis microestructural y propiedades mecánicas, cuál es el que ofrece mejores resultados.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Aceros de baja aleación y alta resistencia HSLA

Los aceros constituyen la categoría más usada de materiales metálicos, porque se pueden obtener productos económicamente en grandes cantidades con especificaciones muy precisas, además de que proporcionan una amplia gama de propiedades mecánicas (1). La clasificación de estos aceros está en función de algunas características, tales como:

- Composición
- Métodos de manufactura
- Acabado
- Forma del producto
- Mecanismo de desoxidación
- Microestructura
- Nivel de resistencia requerida
- Tratamiento térmico
- Descripción de la calidad

Los aceros HSLA son una clasificación de los aceros en función de la composición química de este.

También son conocidos como aceros microaleados, pueden definirse como aquellos que contienen pequeñas cantidades, generalmente menores de 0.15% de elementos de aleación formadores de carburos, nitruros y carbonitruros, los cuales controlan directa o indirectamente la resistencia y otras propiedades de los aceros estructurales (2).

Composición química

Son aceros de bajo contenido de carbono, variando su composición entre 0.05-0.20% C, 0.60-1.60% Mn y los elementos formadores de carburo en contenido cercano al 0.10% de Nb, V o Ti, aunque algunos otros elementos tales como Cu, Ni, y Mo pueden estar presentes en pequeñas cantidades alrededor de 0.10%. Elementos tales como Al, B, O, y N presentan un efecto importante sobre el comportamiento de los aceros microaleados, cuyo contenido se encuentra en el orden de milésimas (3).

La tabla 2.1 muestra los rangos de composición química de estos aceros, según la clasificación de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés).

Tabla 2.1. Límites y rangos de composición para aceros HSLA (1).

Designación SAE	Límite de composición%		
	C máx.	Mn máx.	P máx.
942X	0.21	1.35	0.04
945 ^a	0.15	1.00	0.04
945C	0.23	1.40	0.04
945X	0.22	1.35	0.04
950 ^a	0.15	1.30	0.04
950B	0.22	1.30	0.04
950C	0.25	1.60	0.04
950D	0.15	1.00	0.15
950X	0.23	1.35	0.04
955X	0.25	1.35	0.04
960X	0.26	1.45	0.04
965X	0.26	1.45	0.04

2.1.1. Propiedades

Estos aceros se laminan en caliente bajo condiciones controladas y diseñados para suministrar una mejor resistencia en comparación con los aceros al carbono, sin sacrificar su formabilidad o soldabilidad. Su fortalecimiento se debe a una aleación por solución sólida; el tratamiento térmico no es posible debido a su bajo contenido de carbono (4).

Los elementos de aleación denominados microaleantes, modifican las propiedades del acero debido a que forman fases precipitadas de carburos y/o nitruros (2). Esto promueve las mejores propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión en los aceros HSLA en comparación con otros aceros al carbono convencionales.

Las pequeñas cantidades de elementos de aleantes son utilizadas para obtener esfuerzos de fluencia mayores a 275 MPa (5). Estos aceros tienen mejores propiedades mecánicas y a veces mejor resistencia a la corrosión que los aceros al carbono laminados.

El endurecimiento por precipitación está generalmente asociado con una reducción en tenacidad, el refinamiento de grano es utilizado junto con el endurecimiento por precipitación para mejorar la tenacidad (6).

Los elementos de aleación comúnmente usados y elementos de impurezas pueden ser categorizados en tres grupos dependiendo de su influencia sobre las propiedades mecánicas de los aceros (7).

1. Elementos microaleantes. Controlan resistencia, tenacidad y transformaciones microestructurales: Nb, V, Ti, Al y B.
2. Elementos sustitucionales. Controlan resistencia, tenacidad y transformaciones microestructurales: Si, Mn, Mo, Cu, Ni y Cr.
3. Impurezas y elementos usados para su control. Tienen directa influencia en la ductilidad del acero: P, S, Ca, Zr y tierras raras.

En la tabla 2.2 se enlistan algunos aceros HSLA y sus respectivas propiedades mecánicas.

Tabla 2.2. Características mecánicas de material laminado en caliente de aceros HSLA (8).

Designación ASTM	Resistencia a la tensión (MPa)	Límite elástico (MPa)	Ductilidad (%)
A 440	435	290	21
A 633 grado E	520	380	23
A 656 grado I	655	552	15

2.1.2. Clasificación

De acuerdo a la SAE, los grados específicos de estos aceros son identificados en una nomenclatura de seis dígitos que describen el nivel de resistencia, composición química general, nivel general de carbono y desoxidación o control de inclusiones de sulfuros, tal como se describe a continuación (6):

- Primer, segundo y tercer caracter. Mínimo esfuerzo de cedencia expresado en miles de libras por pulgada cuadrada: 35, 40, 45, 50, 60, 70 y 80. La designación SAE para los aceros HSLA es 9XX.
- Cuarto caracter. Composición química general:
 - X: alta resistencia baja aleación, que puede ser, Cr, Cu, Mo, Nb, Ni, Si, Ti, V, Zr. Con 70 MPa.
 - Y: mismo significado que X pero con 100 MPa.
 - Z: mismo significado que X pero con 140 MPa.
- Quinto caracter. Nivel general de carbono.
 - H: máximo nivel de carbono 0.23%
 - L: máximo nivel de carbono 0.13%
- Sexto caracter. Control de inclusiones de sulfuros.
 - K: calmado con práctica de grano fino.

F: calmado con práctica de grano fino y control de inclusiones de sulfuros.

Aunque hay numerosas normas y grados comerciales, los aceros microaleados están divididos en siete categorías (2) (1).

a) Aceros para exposición al ambiente

Son aceros con pequeñas cantidades de cobre y fósforo que mejoran la resistencia a la corrosión. Ejemplos de estos aceros son: ASTM A 242 y ASTM A 588. La corrosión se reduce a partir de su propio óxido como película superficial.

b) Aceros microaleados ferríticos-perlíticos

Aceros que utilizan elementos de aleación como niobio y vanadio para aumentar la resistencia sin aumentar los contenidos en carbono o en manganeso. De esta manera el contenido de carbono se puede disminuir para aumentar la soldabilidad y tenacidad.

c) Aceros perlíticos laminados

Algunos de estos aceros son los aceros al carbono-manganeso. Estos aceros una vez laminados tienen límites elásticos de 290 a 345 MPa.

d) Aceros de ferrita acicular

Aceros con una microestructura muy fina de ferrita acicular y de elevada resistencia. Tienen una combinación de límites elásticos (de 415 a 690 MPa), alta tenacidad, y buena soldabilidad.

e) Aceros de doble fase

Tienen una microestructura con un 80-90% de ferrita y de un 10 a 20% de islas de martensita dispersas en la matriz. Tienen un límite elástico que va de los 310 a los 345 MPa.

f) Aceros libres intersticiales

Aceros con muy bajo contenido intersticial que exhiben excelente maquinabilidad, con bajo límite elástico y alta elongación.

g) Aceros con inclusiones de forma controlada

Las inclusiones de sulfuro son plásticas a la temperatura de laminación y se transforman en inclusiones deformadas y elongadas que afectan negativamente la ductilidad. El método preferido para el control de la forma es la adición de calcio-silicio.

2.1.3. Aplicaciones

Las aplicaciones de estos aceros están directamente relacionadas con su elevada resistencia y baja densidad. Así suponen un buen sustituto para aceros estructurales empleados en la construcción de puentes y edificios, además del gran uso que tienen en la industria automotriz (2).

Algunos de las aplicaciones de estos aceros son las siguientes:

- Oleoductos y conducción de gas
- Sector automotriz y grúas
- Aplicaciones estructurales
- Construcción de barcos
- Transporte ferroviario

La tabla 2.3 describe algunos aceros HSLA, su disposición y sus aplicaciones.

Tabla 2.3. Aplicaciones de aceros HSLA descritos en las especificaciones ASTM (1).

Especificación ASTM	Elementos de aleación	Aplicaciones
A 242	Cr, Cu, N, Ni, Si, Ti, V, Zr	Miembros estructurales soldados, atornillados o remachados.
A 572	Nb, V, N	Estructuras soldadas, atornilladas o remachadas, sobre todo en puentes y edificios remachados o atornillados.
A 588	Nb, V, Cr, Ni, Mo, Cu, Si, Ti, Zr	Estructuras soldadas, atornilladas o remachadas, principalmente puentes y construcciones soldadas.
A 606	No especificado	Estructural y diversos propósitos donde el ahorro en peso y durabilidad son importantes.
A 607	Nb, V, N, Cu	Estructural y diversos propósitos en los cuales mayores resistencia o ahorros en peso son necesarios.
A 618	Nb, V, Si, Cu	Propósitos estructurales en general.
A 633	Nb, V, Cr, Ni, Mo, Cu, N, Si	Estructuras soldadas, atornilladas y remachadas que estarán en servicio a temperaturas > -45°.
A 656	V, Al, N, Ti, Si	Bastidores de camiones, brazos de grúas, vagones de ferrocarril.
A 690	Ni, Cu, Si	Muros de muelles, rompeolas, malecones y estructuras similares expuestas a ambientes marinos.
A 709	V, Nb, N, Cr, Ni, Mo	Puentes.
A 714	V, Ni, Cr, Cu, Mo, Nb	Tubería.
A 715	Nb, V, Cr, Mo, N, Si, Ti, Zr, B	Aplicaciones estructurales donde alta resistencia, ahorro en peso y buena soldabilidad son necesarias.
A 808	V, Nb	Ferrocarriles.
A 812	V, Nb	Recipientes a presión soldados en capas.
A 841	V, Nb, Cr, Mo, Ni	Recipientes a presión soldados.
A 847	Cu, Cr, Ni, Si, V, Ti, Zr, Nb	Tubos estructurales redondos, cuadrados o formas especiales para construcciones soldadas, atornilladas o remachadas.
A 860	Cu, Cr, Ni, Mo, V, Ti, Nb	Líneas de conducción de alta presión de gas y petróleo.
A 871	Cu, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ti	Estructuras tubulares y postes.

2.1.4. Soldabilidad

La soldabilidad es la capacidad con que un metal se puede conformar por soldadura, así como la habilidad de la unión soldada para resistir las condiciones de servicio. Existen tres tipos de soldabilidad (9):

Soldabilidad operatoria: está relacionada con el enlace de los átomos, de las moléculas o de los iones que forman el material. El enlace metálico tiene elevada soldabilidad operativa.

Soldabilidad metalúrgica: determina hasta qué punto pueden soldarse dos metales sin que su composición represente inconvenientes graves por fusión, oxidación, tratamiento térmico, etc.

Soldabilidad constructiva: dependen de las transformaciones que ocurren en las piezas durante la soldadura. En la metalografía de la unión soldada se ven dos zonas bien diferenciadas, el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor.

Los factores principales de la soldabilidad son la composición química, calor de entrada y velocidad de enfriamiento. Estos factores producen varios efectos como el crecimiento de grano, cambios de fases, esfuerzos de tensión y compresión, lo que a su vez determina la soldabilidad. La entrada de calor y la velocidad de enfriamiento son características del proceso específico, técnica utilizada y espesor de la pieza del metal que se está soldando.

Debido a que el esfuerzo de fluencia de los aceros HSLA puede obtenerse con menores contenidos de carbono, la soldabilidad de muchos de ellos es comparable al del acero suave y en ocasiones, mejor (5). El carbono y nitrógeno desarrollan un papel muy importante en la soldabilidad, un óptimo nivel del contenido de carbono es determinante sobre las propiedades del metal base y soldabilidad (7).

Los aceros HSLA se sueldan fácilmente por cualquier proceso de soldadura usado en los aceros estructurales al carbono, incluyendo los procesos por arco metálico protegido, arco sumergido y arco con núcleo de fundente, (SMAW, SAW y FCAW por sus siglas en inglés, respectivamente). La soldadura en estos aceros puede ser realizada sin la necesidad de precalentamiento o poscalentamiento; lo anterior ocasionado por el bajo contenido de carbono. La soldabilidad por lo general disminuye con el incremento en el contenido de carbono (1). Sin embargo cuando el carbono equivalente excede 0.35%, el precalentamiento es recomendado para minimizar la susceptibilidad de fractura por hidrógeno (10).

2.1.5. Metalurgia

El desempeño de los aceros depende de las propiedades asociadas con su microestructura, es decir, su arreglo atómico, fracción de volumen, tamaño y morfología de las diversas fases que constituyen una sección macroscópica de acero con una composición dada (1).

La mayoría de los aceros HSLA son entregados en su condición de laminación en caliente con microestructura de ferrita y perlita. Existen también aceros microaleados con microestructura de ferrita acicular y los de doble fase, los cuales poseen una estructura mixta que les otorga endurecimiento.

Mientras tanto la ferrita en los aceros HSLA es típicamente endurecida por refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y en menor medida por solución sólida (5) (6).

a) Refinamiento de grano

Afectado por los efectos del diseño de aleación y tratamientos termomecánicos. Esto incluye:

- Adición de titanio o aluminio para retardar el crecimiento de grano austenítico cuando el acero es recalentado.
- El laminado controlado de aceros microaleados para condicionar la austenita y que esta transforme en ferrita de grano fino.
- El uso de aleantes o rápidas velocidades de enfriamiento para reducir la temperatura de transformación de austenita a ferrita.

b) Endurecimiento por precipitación

Formación de partículas dispersas desarrolladas durante el calentamiento y enfriamiento. El endurecimiento está influenciado por el tipo de carbonitruro, tamaño de grano y número de carbonitruros precipitados. La formación de carburos del tipo MC (carburo metálico, por sus iniciales) resulta ser más efectivo en el endurecimiento por precipitación de los aceros microaleados con niobio o titanio. El número de partículas finas de MC formadas durante el calentamiento y enfriamiento está determinado por la solubilidad de los carburos en la austenita.

c) Solución sólida

La función principal de los elementos aleantes es contribuir al endurecimiento de la ferrita (5). Los elementos de aleación son seleccionados para influir en la temperatura de transformación de austenita a ferrita cuyos productos son de grano muy fino (6).

Algunos efectos de los elementos de aleación en las propiedades mecánicas de los aceros HSLA se enlistan a continuación (6):

Carbono (C): incrementa la cantidad de perlita en la microestructura. El alto contenido de este elemento reduce la soldabilidad y la tenacidad al impacto del acero. El contenido máximo en los aceros HSLA en su condición de laminado es de aproximadamente 0.20%.

Nitrógeno (N): su adición en aceros con contenidos de vanadio mejora el endurecimiento por precipitación. La precipitación de nitruro de vanadio mejora el refinamiento de grano debido a su menor solubilidad en la austenita que el carburo de vanadio.

Manganeso (Mn): su función es como endurecedor por solución sólida en ferrita, además de reducir la temperatura de transformación austenita-ferrita y mejorar el endurecimiento por precipitación de los aceros con contenido de vanadio.

Silicio (Si): utilizado como desoxidante en metal líquido; mejora el esfuerzo de cedencia por endurecimiento por solución sólida. Cantidades superiores a 0.30% produce un deterioro en tenacidad y soldabilidad.

Cobre (Cu): adicionado en cantidades de 0.20% para proveer resistencia a la corrosión, la cual es mejorada cuando el fósforo se encuentra en cantidades de 0.05%.

Fósforo (P): efectivo endurecedor por solución sólida en la ferrita. Mejora la resistencia a la corrosión, pero con un decremento en la ductilidad. Con bajas cantidades < 0.005% puede causar fragilización por segregación en las fronteras del grano austenítico.

Níquel (Ni): incrementa moderadamente la resistencia por endurecimiento por solución en la ferrita. Aumenta la resistencia a la corrosión atmosférica y en combinación con cobre y fósforo mejoran la resistencia en ambiente marino.

Molibdeno (Mo): incrementa la solubilidad de niobio en la austenita.

Niobio (Nb): incrementa el esfuerzo de cedencia por la combinación de endurecimiento por precipitación y refinamiento de grano. La menor solubilidad del carburo de niobio en la austenita provee partículas de precipitado más

estables que retardan el crecimiento de grano austenítico al estar presente en sus fronteras.

Aluminio (Al): usado como desoxidante. Controla el crecimiento de grano austenítico.

Vanadio (V): incrementa la resistencia de los aceros HSLA por endurecimiento por precipitación en la ferrita y refinamiento del tamaño de grano ferrítico.

Titanio (Ti): provee endurecimiento por precipitación. Pequeñas cantidades de este elemento limitan el crecimiento del grano austenítico.

Circonio (Zr): en los aceros HSLA calmados se adiciona para mejorar las características de inclusiones, particularmente de sulfuros con cambios en su forma que mejoran la ductilidad.

Elementos de las tierras raras: principalmente cerio, lantano y praseodimio pueden ser utilizados para el control de forma de inclusiones de sulfuros. La función principal de estos es de formar inclusiones de sulfuros y además inclusiones de oxisulfuros que no afecten la ductilidad. Actualmente se prefiere usar el calcio en lugar de estos elementos para controlar la forma de inclusión.

2.1.6. Aleaciones ASTM A-572

En este trabajo se analizará la unión soldada de placas con espesores superiores a 50 mm de un acero comercial ASTM A 572. En las tablas 2.4 y 2.5 se muestran la composición química y las propiedades mecánicas de este acero.

Tabla 2.4. Composición química de un acero A 572 (11).

% e.p	C	Mn	P	S	Si
Grado 42 [290]	0.21	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40
Grado 50 [345]	0.23	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40
Grado 60 [415]	0.26	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40
Grado 65 [450] espesor > ½"	0.23	1.65	0.04	0.05	N/A

Tabla 2.5. Propiedades mecánicas de un acero A 572 (11).

	Esfuerzo máx. (MPa)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	% Elongación 2"
Grado 42 [290]	415	290	24
Grado 50 [345]	450	345	21
Grado 60 [415]	520	415	18
Grado 65 [450]	550	450	17

2.2. Proceso de soldadura por arco metálico y gas GMAW

2.2.1. Introducción

La soldadura es el método más eficaz y el único posible de unir dos piezas metálicas y hacerlas funcionar como un solo elemento. Es un proceso de unión de materiales que produce su coalescencia calentándolos a temperatura de fusión, con o sin la aplicación de presión, o por medio de la aplicación de calor solamente y con o sin el uso de material de aporte (12).

El proceso GMAW es una soldadura que usa un arco entre un electrodo consumible de aporte continuo y el charco de soldadura. El proceso es usado con una protección de un suministro externo de gas sin la aplicación de presión (13).

Es un proceso que consiste de una corriente directa con polaridad invertida (CD y PI, por sus respectivas iniciales), en el cual el electrodo consumible es protegido del aire por medio de una atmósfera como se muestra en la figura 2.1. También puede ser usado con polaridad directa, sin embargo, ésta presenta menor profundidad de penetración (14).

Todos los metales importantes comerciales como acero al carbono, baja aleación y alta resistencia, aceros inoxidable, aluminio, cobre, titanio, y aleaciones base níquel pueden ser soldados en todas posiciones con este proceso seleccionando apropiadamente el gas de protección, electrodo y variables del proceso (13).

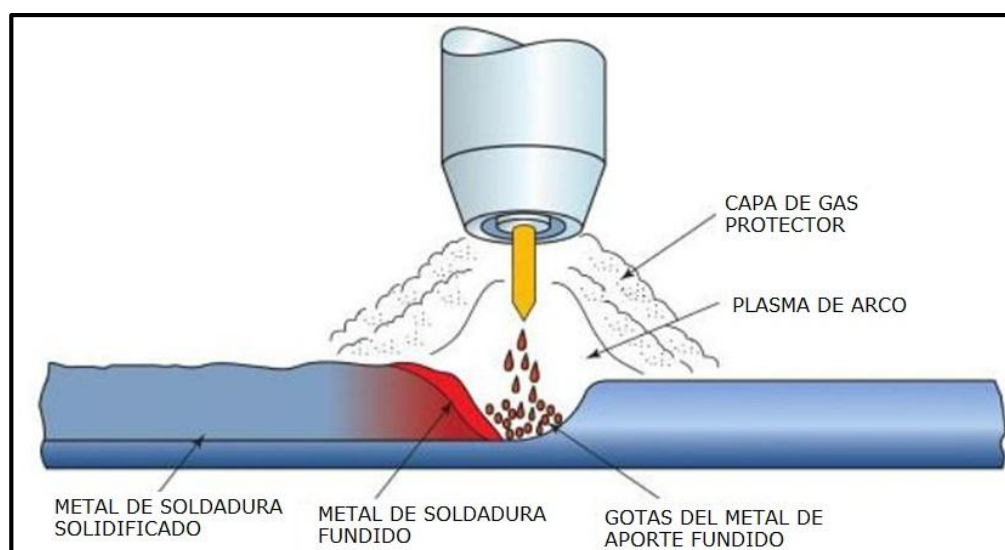


Figura 2.1. Proceso de soldadura por arco GMAW (15).

Ventajas y desventajas

Las ventajas de este proceso son (13):

- Es el único proceso de electrodo consumible que puede ser utilizado para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- Las soldaduras pueden ser efectuadas en todas las posiciones.
- Altas tasas de depósito. Ver tabla 2.6.

- Velocidad de soldadura más alta porque el electrodo continuo permite elevados rangos de deposición.
- Con el uso de la transferencia por rocío se logra penetración más profunda permitiendo así el uso de tamaños de filete más pequeños para resistencias equivalentes en otros procesos.
- Requiere de mínima limpieza después de la soldadura debido a que no se genera escoria.

Por otro lado las limitantes son (13):

- El equipo de soldadura es más complejo, costoso y menos portable.
- Es más difícil de usar en lugares de acceso limitado porque la pistola de soldadura es más larga que el portaelectrodo de otros procesos.
- La soldadura debe estar protegida contra corrientes de aire que pudieran dispersar el gas de protección. Esto limita la aplicación al aire libre, a menos que se coloquen mamparas de protección en el área de soldadura.
- Altos niveles de calor irradiado y la intensidad del arco podrían afectar el desempeño del soldador.

Principios de operación

La pistola guía el electrodo consumible y conduce la corriente eléctrica y el gas protector a la pieza de trabajo, esto proporciona la energía para establecer y mantener el arco y fundir el electrodo, además de la protección contra las corrientes de aire (13).

Tabla 2.6. Velocidades de depósito con soldadura GMAW (15).

Diámetro del electrodo (pulg.)	Kilogramos por hora		
	1/8	3/16	1/4
Amperaje			
50	0.90		
100	2.18	1.90	
150	3.40	3.00	2.30
200		3.95	3.50
250		5.80	5.00
300			6.50

La mejor forma de describir las características del proceso GMAW es en término de los tres mecanismos básicos empleados para transferir metal del electrodo a la pieza de trabajo. En la tabla 2.7 se presentan los rangos de las variables para los diferentes tipos de transferencia. Dichas transferencias son (13):

1. Transferencia en corto circuito. Abarca el intervalo más bajo de corriente y de diámetro del electrodo. Genera un charco pequeño apropiado para unir secciones delgadas, soldar fuera de posición y tapar aberturas de raíz anchas.
2. Transferencia globular. Con corriente continua electrodo al positivo (CCEP por sus iniciales) existe transferencia globular con temperatura baja. Con CO₂ y He como gas de protección, ocurre esta transferencia con todas las corrientes de soldadura. El tamaño de gota es mayor que el tamaño del electrodo.
3. Transferencia spray o rocío. Se produce con una protección rica en argón. Se debe usar CCEP, no se aplica en soldaduras fuera de posición, a menos que se emplee una fuente de poder con arco pulsado que produce ondas y frecuencias controladas que pulsan la corriente de soldadura.

Estas transferencias están determinadas por:

- Magnitud y tipo de corriente de soldadura.
- Diámetro del electrodo y su composición.
- Extensión del electrodo.
- Gas protector.

Tabla 2.7. Parámetros de operación de los tipos de transferencias (16).

Transferencia	Posición	Voltaje (V)	Corriente (Amp)
Corto circuito	Vertical (V), sobre cabeza (OH)	16 - 22	50 -150
Globular	Plana (F) y horizontal (H)	20 - 35	70 -255
Espray o Rocío	Plana (F) y horizontal (H)	24 - 40	150 -500

2.2.2. Consumibles

Electrodos (13)

El electrodo que se utilice debe ser similar al metal base. Estos electrodos contienen desoxidantes (Mg, Si y Al) que ayudan a minimizar la porosidad. La selección de metal de aporte adecuado se define como aquel que logre las siguientes características en el metal de soldadura:

- Depósito similar al del metal base (propiedades mecánicas y físicas).
- Metal de soldadura íntegro y sin discontinuidades.
- Resistencia mecánica igual o superior al metal base.

Gas de protección (13)

El gas de protección impide que la atmósfera entre en contacto con el metal fundido. Si esto llega a ocurrir podemos tener en el metal de soldadura porosidad, una gran tendencia a formar óxidos, se disminuye la tendencia a formar nitruros y el oxígeno reacciona con el carbono formando CO₂ ó CO.

Principales efectos del gas de protección:

- Características del arco
- Contribuye al tipo de transferencia del metal
- Penetración en la soldadura
- Velocidad de soldadura

En la tabla 2.8 se muestran algunas de las mezclas de protección usados en este proceso así como sus principales características.

Tabla 2.8. Características de las mezclas de gases empleadas en el proceso GMAW (13).

Mezcla de gases	Características
Argón - CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Aplica en aceros al carbono y baja aleación. • Disminuye las salpicaduras y aumenta la penetración. • El argón es 1.4 veces más denso que el aire, haciendo óptimo para la posición plana. • Una mezcla rica en argón favorece la transferencia por espray.
Argón – Helio	<ul style="list-style-type: none"> • El helio es 0.14 veces más denso que el aire, requiere más tasa de flujo (2-3 veces más), tiene mayor conductividad térmica. • Se emplea en transferencia por cortocircuito. • Se utilizan mezclas entre 60-90% de helio.
Argón - Helio - CO ₂ - O	<ul style="list-style-type: none"> • Mezcla conocida como “quad-mix”. • Se utiliza para alto depósito. • Aplicaciones principales para soldaduras de acero de baja aleación y alta resistencia.
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Aplica en aceros al carbono y de baja aleación. • Mayor velocidad de soldadura, mayor penetración y bajo costo. • Solo aplica por cortocircuito y globular.

2.2.3. Variables del proceso

El conocimiento y control de estas variables es indispensable para producir soldaduras de buena calidad. Estas variables no son independientes

porque cuando se modifica una, casi siempre es necesario modificar una o más de las otras para producir los resultados deseados. En la tabla 2.9 se presentan las variables que más impactan en algunas características de las soldaduras tales como penetración, geometría y calidad de la soldadura.

Tabla 2.9. Variables del proceso de soldadura GMAW (13).

Variables	Características
Corriente de soldadura	<ul style="list-style-type: none"> • Varía con la velocidad de alimentación del electrodo. • Un aumento en la corriente de soldadura, ocasiona: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Aumento en la profundidad y anchura de penetración. ➤ Incremento en la tasa de deposición. ➤ Aumento en el tamaño de la franja de soldadura.
Polaridad	<ul style="list-style-type: none"> • Polaridad inversa (CDEP). Produce un arco estable, una transferencia de metal uniforme, pocas salpicaduras y profundidad máxima de penetración. • Polaridad directa (CDEN). Con esta polaridad no puede obtenerse transferencia por espray, tiene alta velocidad de fusión, tiene alta tasa de deposición y menor penetración. Para usar esta polaridad es necesario añadir un mínimo de 5% de oxígeno al escudo de argón.
Voltaje de arco (longitud de arco)	<ul style="list-style-type: none"> • Depende en gran medida de la longitud de arco, composición y dimensión del electrodo, gas protector y técnica de soldadura.
Velocidad de avance	<ul style="list-style-type: none"> • Si se reduce la velocidad, se incrementa la tasa de deposición, se reduce la penetración, el arco actúa en el charco no en el metal base, generando una franja de soldadura más ancha. • Si se aumenta la velocidad, se aumenta la entrada de calor, una velocidad mayor aumenta la tendencia al socavamiento.
Extensión del electrodo	<ul style="list-style-type: none"> • Es la distancia entre el extremo del tubo de contacto y la punta del electrodo. Un aumento en esta extensión produce un aumento en la tasa de fusión del electrodo. • Transferencia por cortocircuito: 1/4" – 1/2" • Para las demás transferencias: 1/2" – 1"
Orientación del electrodo	<ul style="list-style-type: none"> • Existen dos tipos de ángulos de desplazamiento: de arrastre y empuje. • De arrastre: se obtiene la penetración máxima, franja de soldadura más convexa y angosta, arco más estable y menos salpicaduras. • De empuje: se disminuye la penetración y se obtiene una franja de soldadura más ancha y plana.

2.2.4. Calidad de la soldadura

El proceso GMAW requiere una limpieza más estricta que otros procesos de arco como el SMAW, FCAW y SAW donde el fundente atrapa las impurezas. En la tabla 2.10 se muestran las discontinuidades típicas de este proceso, así como las posibles causas y las acciones correctivas.

Tabla 2.10. Discontinuidades, causas y acciones correctivas (13).

Discontinuidad	Posibles causas	Acciones correctivas
Excesiva fusión (perforación)	Excesiva entrada de calor	Reducir la velocidad de alimentación del alambre (corriente de soldadura) y el voltaje. Incrementar la velocidad de desplazamiento.
	Configuración inapropiada de la unión	Reducir la abertura de raíz. Incrementar la cara de la raíz.
Grietas en la ZAC	Endurecimiento en la ZAC	Precalentamiento para retardar la velocidad de enfriamiento.
	Altos esfuerzos residuales	Usar un tratamiento térmico para aliviar esfuerzos.
	Fragilización por hidrógeno	Usar electrodos limpios y gas de protección sin humedad y eliminar contaminantes del metal base. Mantener el metal de soldadura por varias horas a temperaturas elevadas para hacer que el hidrógeno difunda.
Fusión incompleta	Superficie de la zona de soldadura con óxidos	Limpiar las caras de la ranura de cualquier cascarilla de laminación antes de la soldadura.
	Insuficiente entrada de calor	Incrementar la velocidad de alimentación de alambre. Reducir la extensión del electrodo.
	Charco de soldadura demasiado grande	Minimizar la oscilación del electrodo. Incrementar la velocidad de desplazamiento.
	Técnica de soldadura inadecuada	Si se emplea la técnica de oscilación, se debe detenerse momentáneamente en las caras de las ranuras. Mantener el electrodo en dirección del borde delantero del charco de soldadura.
	Diseño de unión inapropiada	Usar un ángulo de ranura suficientemente grande para permitir el acceso a la parte inferior de la cara de la ranura mientras se mantiene una adecuada extensión del electrodo. Usar ranuras en "U" o "J".

Penetración incompleta	Inadecuada preparación de la unión	El diseño de la unión debe proporcionar acceso a la parte inferior de la ranura. Reducir la cara de la raíz. Incrementar la abertura de la raíz en uniones a tope, e incrementar la profundidad de saneado.
	Inapropiada técnica de soldadura	Mantener entre 5-15° el ángulo de arrastre para alcanzar la máxima penetración. Mantener el arco sobre el borde delantero del charco.
	Corriente de soldadura inadecuada	Incrementar la velocidad de alimentación del alambre.
	Excesiva o deficiente velocidad de avance	Reducir o incrementar la velocidad de avance.
Porosidad	Gas de protección inadecuado	Incrementar el flujo de gas para desplazar el aire circundante a la zona de soldadura. Disminuir el flujo de gas para impedir turbulencias. Eliminar cualquier fuga en la línea del gas. Y disminuir corrientes de aires, así como reducir la distancia de la boquilla de la pistola de soldadura a la pieza de trabajo.
	Contaminación del gas de protección o del electrodo	Usar gas de protección grado soldadura y usar electrodos limpios y secos.
	Contaminación de la pieza de trabajo	Remover grasas, aceites, humedad, óxido, pintura y suciedad de las superficies de las piezas de trabajo antes de la soldadura. Usar electrodos con más agentes desoxidantes.
	Voltaje de arco muy alto	Reducir el voltaje.
	Distancia excesiva de la punta de contacto a la pieza de trabajo	Reducir la extensión del electrodo.
Socavado	Velocidad de avance muy alta	Usar velocidad de avance muy bajo.
	Alto voltaje y elevada corriente de soldadura.	Disminuir el voltaje y reducir la velocidad de alimentación del alambre.
	Insuficiente permanencia	Incrementar la permanencia en los bordes del charco de soldadura.
	Ángulo de la pistola	Cambio en el ángulo de la pistola para permitir que la fuerza del arco ayude a la colocación de la soldadura.

2.2.5. Parámetros de soldadura en uniones de grandes espesores

Los parámetros de soldadura adecuados son aquellos que logran una unión soldada con características químicas y propiedades mecánicas específicas de acuerdo a su aplicación, satisfaciendo los requerimientos de calidad y sanidad establecidos en la ingeniería de proyecto.

En el año 2006 Mukhopadhyay y Pal (17) realizaron una investigación en referencia al efecto de la mezcla de los gases de protección en la unión de aceros HSLA de grandes espesores unidos por el proceso de soldadura GMAW. Ellos comprobaron que la composición química del electrodo y del gas de protección determina las características de las inclusiones, la microestructura y las propiedades mecánicas del metal de soldadura como se muestra en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Características del metal de soldadura (17).

Característica del metal de soldadura	Depende de:	Es función de:
Microestructura	Composición química del metal de soldadura	<ul style="list-style-type: none"> • Composición química del gas de protección • Composición química del alambre • Composición del metal base • Tiempo permitido para la reacción
	Velocidad de enfriamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada de calor • Espesor de metal base • Temperatura de precalentamiento

En esta investigación se emplearon tanto electrodos sólidos como tubulares, siendo este último el que ofrece mayor tasa de depósito y mejor mojabilidad del metal fundido. En el rubro de los gases de protección se determinó que usar sólo CO₂ provoca un exceso de chisporroteo y sobre todo está limitado a ciertas posiciones (plana y horizontal), mientras que usar sólo

argón además de aumentar el costo del proceso no brinda las características específicas que se requieren.

Es así que se propuso usar ciertas mezclas de Ar-CO₂-O₂ siendo la mezcla de 80 % Ar, 16 % CO₂ y 4 % O₂ la que mejor propiedades mecánicas proporciona. Los parámetros de soldadura empleados con esta mezcla de gas protector se especifican en la tabla 2.12.

Una investigación similar fue desarrollada en el año 2009 por Simoneau y colaboradores (18) en la que encontraron que el martilleo entre cordones de soldadura disminuye la susceptibilidad de fractura por hidrógeno y el reblandecimiento de la ZAC. Para efectuar la unión soldada se empleó una mezcla de gas de protección de 92 % Ar y 8 % de CO₂ con un precalentamiento de 100°C y una temperatura entre cordones máxima de 160°C.

Los parámetros de soldadura empleados en ambas investigaciones y los parámetros seleccionados para el caso de estudio de este trabajo se muestran en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Parámetros de soldadura empleados en las investigaciones y la propuesta para el caso de estudio.

Investigador y propuesta	Parámetros					
	Diámetro electrodo (mm)	Mezcla de gas (%)	Velocidad de avance (mm/seg)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Entrada de calor (KJ/mm)
Mukhopadhyay (17)	1.2	Ar-CO ₂ -O ₂ 80-16-4	4.7	230	33	1.61
Simoneau (18)	1.2	Ar-CO ₂ 85-15	6.7	290	33	1.43
Propuesta	1.3	Ar-CO ₂ 90-10	5.0	370	32	2.37

2.3. Proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente FCAW

2.3.1. Introducción

El FCAW es un proceso de soldadura que emplea un arco entre un electrodo continuo y un charco de soldadura. La protección se obtiene de un fundente contenido dentro del electrodo tubular que protege el metal fundido de la atmósfera. Existen dos variantes de este proceso (13):

- Autoprotegido (FCAW-S). Protege el metal de soldadura con la descomposición y vaporización del fundente. Tiene gran aplicación en campo. Figura 2.2 a).
- Con protección externa de gas (FCAW-G). Doble protección al metal fundido. Tiene gran aplicación en taller. Figura 2.2 b).

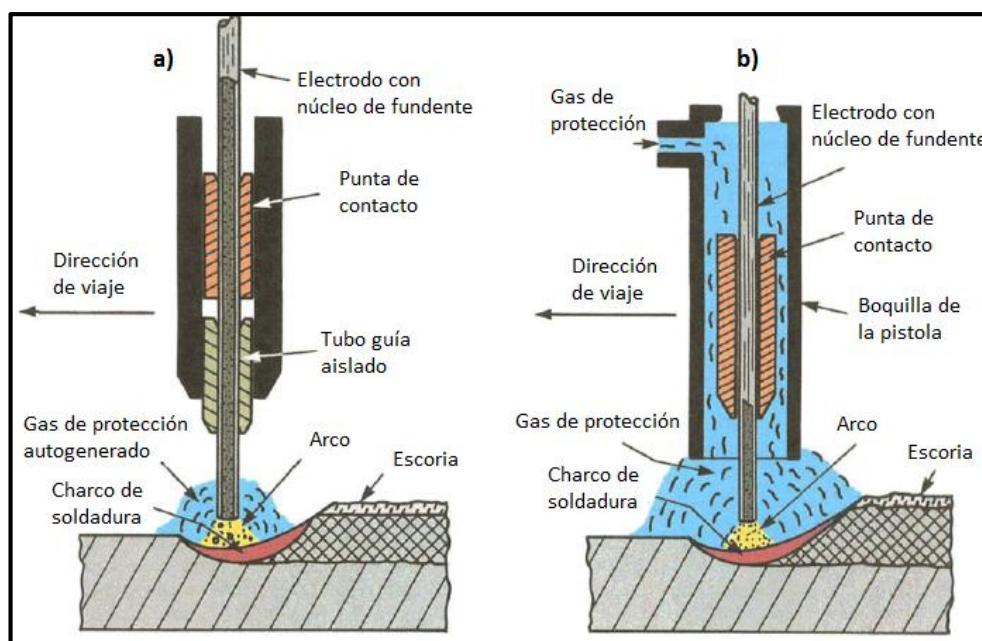


Figura 2.2. a) Proceso FCAW autoprotegido, b) proceso FCAW con gas de protección externo (13).

Este proceso tiene las siguientes ventajas:

- Suelda varios aceros en un amplio rango de espesores.

- Alta tasa de depósito.
- Permite diseño de uniones económicas.
- Requiere menos limpieza previa.
- Alta tolerancia a contaminantes que pueden causar grietas en la soldadura.
- Genera escoria que sustenta y moldea la franja de soldadura.

La mayor limitación del FCAW es el alto costo y la compleja configuración del equipo. Dentro de sus limitaciones se encuentran las siguientes:

- Está limitado a metales ferrosos y aleaciones base níquel.
- Produce una capa de escoria que debe ser removida.
- El electrodo de alambre es más caro que el alambre sólido.
- El equipo de soldadura es más caro y complejo.
- Mayor emisión de gases y humos (13).

2.3.2. Consumibles

Las principales funciones del fundente del electrodo son (13):

- Provee ciertas características mecánicas, metalúrgicas y de resistencia a la corrosión al metal de soldadura.
- Atmósfera que protege al metal fundido del O y N.
- Extrae impurezas del metal fundido.
- Genera escoria que protege al metal depositado del aire durante la solidificación.

En la tabla 2.13 se enlistan la mayoría de los elementos que se encuentran por lo general en fundente del electrodo tubular.

Tabla 2.13. Elementos comunes en el núcleo de los electrodos del proceso FCAW (13).

Elemento	Propósito en la soldadura
Aluminio	Desoxidante y desnitrificante.
Boro	Refinamiento de grano.
Calcio	Provee protección y forma escoria.
Carbono	Incrementa la dureza y resistencia.
Cromo	Provee resistencia a la fractura frágil, resistencia, dureza y resistencia a la corrosión.
Fierro	Depósitos de aleación con matriz base hierro, aleación base níquel, y otro depósito no ferrosos.
Manganeso	Desoxidante, previene la fragilidad en caliente por la combinación con el azufre para formar sulfuro de manganeso, incrementa la dureza, resistencia y forma escoria.
Molibdeno	Incrementa resistencia y dureza.
Níquel	Proporciona dureza, resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión.
Potasio	Estabiliza el arco y forma escoria.
Silicio	Desoxidante y forma escoria.
Sodio	Estabiliza el arco y forma escoria.
Vanadio	Incrementa la resistencia.
Titanio	Desoxidante y desnitrificante; forma escoria.
Zirconio	Desoxidante y desnitrificante; forma escoria.

En el rubro de los gases de protección para el proceso FCAW-G, el dióxido de carbono (CO₂) y mezcla de Ar-CO₂ son los gases más empleados. El CO₂ es el más usado por su bajo costo y gran penetración. En la mezcla de gases se recomienda una mayor cantidad de gas inerte para aumentar la transferencia de los desoxidantes. La mezcla más común es 75 % Ar – 25 % CO₂, la cual genera una transferencia por rocío (13).

2.3.3. Variables del proceso

Las variables que afectan la eficiencia del depósito de soldadura y la calidad de esta, se presentan en la tabla 2.14.

Tabla 2.14. Variables del proceso de soldadura FCAW (13).

Variables	Características
Corriente de soldadura	<ul style="list-style-type: none"> • Varía con la velocidad de alimentación del electrodo. • Un aumento en la corriente de soldadura, produce: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Mayor tasa de depósito. ➤ Incrementa penetración. ➤ Menor salpicadura ➤ Menor absorción de hidrógeno.
Voltaje de arco (longitud de arco)	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de arco excesivo (longitud de arco muy grande), produce: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Salpicaduras ➤ Soldaduras anchas y de forma irregular. ➤ En los electrodos autoprotegidos genera mucha absorción de nitrógeno. • Voltaje insuficiente (longitud de arco demasiado corto), produce: <ul style="list-style-type: none"> ➤ Franjas de soldaduras angostas y convexas. ➤ Demasiadas salpicaduras. ➤ Poca penetración.
Velocidad de avance	<ul style="list-style-type: none"> • Si se reduce la velocidad, se incrementa la tasa de deposición, se reduce la penetración
Extensión del electrodo	<ul style="list-style-type: none"> • Para electrodos con protección externa de gas: 3/4" – 1-1/2" • Para electrodos con autoprotección: 1/2" – 3-3/4"
Flujo de gas protector	<ul style="list-style-type: none"> • Un flujo de gas pobre no protege el charco de soldadura generando óxidos y porosidad; de manera similar un flujo excesivo genera turbulencias ocasionando los mismos defectos. • Flujo recomendado para aire estático: 14-19 lts/min. • Flujo recomendado para aire dinámico: 26 lts/min.

2.3.4. Calidad de la soldadura

La calidad de la soldadura que puede ser producido con el proceso FCAW depende del tipo de electrodo usado, el método (autoprotegido o con gas de protección), condición del metal base, el diseño de la unión, condiciones

de la soldadura y la habilidad del soldador u operador. En la tabla 2.15 se muestran algunos defectos y problemas particulares del proceso FCAW.

Tabla 2.15. Problemas y defectos comunes en el proceso FCAW (13).

Problema	Posibles causas	Acción correctiva
Porosidad	Bajo flujo de gas	Incrementar el flujo de gas. Limpiar la boquilla sucia.
	Alto flujo de gas	Disminuir el flujo para eliminar turbulencias.
	Excesiva corrientes de aire	Proteger la zona de soldadura de las corrientes de aire.
	Gas contaminado	Checar la fuente de gas y verificar cualquier fuga en las mangueras.
	Metal base contaminado	Limpiar las caras de la unión.
	Metal de aporte contaminado	Limpiar el aceite del carrete. Evitar emplear electrodos sucios.
	Insuficiente fundente	Cambiar el electrodo.
	Voltaje excesivo	Configurar el voltaje.
	Excesivo o deficiente <i>stickout</i>	Ajustar la corriente y la extensión del electrodo.
	Velocidad de avance excesiva	Ajustar la velocidad de avance.
Penetración o fusión incompleta	Manipulación inapropiada	Dirigir el electrodo a la raíz de la unión.
	Parámetros inapropiados	Incrementar la corriente y velocidad de avance (para electrodos autoprotegidos), disminuir la velocidad de avance, <i>stickout</i> y el tamaño del electrodo.
	Diseño de unión inadecuada	Incrementar la abertura de la raíz y reducir la cara de la raíz.
Grietas	Excesiva restricción en la unión	Precalentar y usar un metal de aporte más dúctil.
	Electrodo inadecuado e insuficientes desoxidantes	Verificar la composición química del electrodo.
Alimentación del electrodo	Desgaste excesivo de la punta de contacto	Reducir la presión del rodillo impulsor.
	Punta de contacto fundida	Reducir el voltaje. Reemplazar el forro desgastado
	Tubo guía sucio	Cambiar el conducto. Limpiar con aire comprimido.

2.4. Metalurgia en uniones de grandes espesores

Las transformaciones en estado sólido que ocurren en la soldadura son de una naturaleza de no equilibrio y difieren claramente de las transformaciones que ocurren durante una fundición, procesos termomecánicos y tratamientos térmicos.

2.4.1. ZAC en soldaduras multi-pasadas

En la zona afectada por el calor en una soldadura de una sola pasada, la zona de grano grueso (ZAC GG) es la región que tiene menor tenacidad. Ahora para una soldadura de multi-pasadas, como se ilustra en la figura 2.3, muestra que la ZAC GG puede ser modificada por los pases subsiguientes y distribuida en cuatro subregiones dependiendo de la temperatura de recalentamiento. Estas subregiones son (10):

- Zona de grano grueso recalentado subcríticamente (GGSC), es la zona recalentada debajo de la línea AC_1 .
- Zona de grano grueso recalentado intercríticamente (GGIC), es la zona recalentada entre las líneas AC_1 y AC_3 .
- Zona de grano fino recalentado supercríticamente (GRSC), es la zona recalentada por encima de la línea AC_3 y por debajo de los $1200^{\circ}C$.
- Zona inalterada de grano grueso (GGIA), es la zona que no es recalentada por arriba de 200° o la zona que se recalienta de nuevo arriba de los $1200^{\circ}C$.

La ZAC GGIC por lo general tiene una menor tenacidad que la región GGSC o que GGIA, aunque todos ellos tienen aproximadamente el mismo tamaño de grano; esto se debe a la alta cantidad de constituyentes martensita-austenita (M-A) de alto carbono en la ZAC GGIA. Cabe decir que las regiones de baja tenacidad son conocidas como zonas frágiles locales (LBZs, por sus siglas en inglés).

Cuando la ZAC GG es recalentada a una temperatura entre AC_1 y AC_3 , la austenita nuclea en las áreas de alto contenido de carbono. Después del enfriamiento, esas áreas de alto contenido de carbono pueden transformarse para dar maclas de martensita con una delgada región de austenita retenida en medio. El contenido de carbono en las islas de M-A pueden variar de 0.3 a 0.5 % C; el significado de esto es que, para un contenido nominal de carbono en un acero, la fracción de volumen del constituyente M-A será mucho mayor si la mayoría del carbono formó carburos (por la regla de la palanca). Esto incrementará el número de sitios de nucleación de fractura y de este modo contribuye a la disminución en la tenacidad de ZAC GGIC (10).

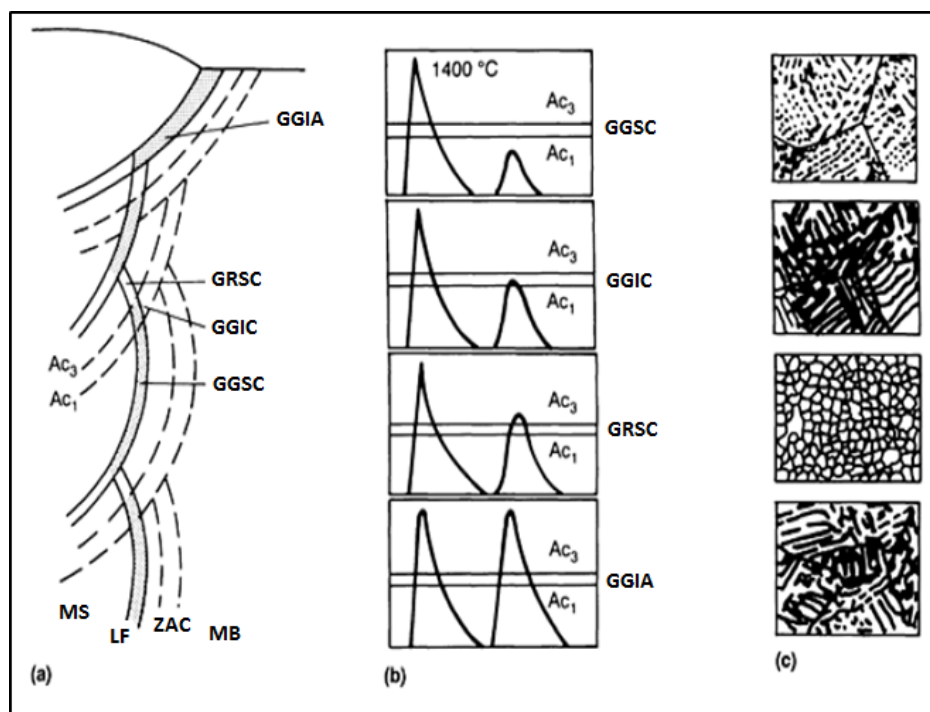


Figura 2.3. a) Posición de las subregiones en relación al metal base y el metal de soldadura. b) Gráfico de los ciclos térmicos en relación a las líneas AC_1 y AC_3 . c) Microestructuras de las diferentes zonas. El término FL se refiere a la línea de fusión (10).

La fracción de volumen del constituyente M-A también depende de la dureza del acero, el cual a su vez depende del contenido de elementos de aleación. El desarrollo de la microfase perlítica puede ser promovida en lugar del constituyente M-A, disminuyendo el contenido de elementos de aleación, la

tenacidad de la ZAC GGIC puede ser mejorada. Sin embargo, esto tendría repercusiones del cumplimiento de la resistencia de la placa. Una solución factible sería inhibir el crecimiento del grano en la ZAC. El procedimiento de soldadura de multipasadas, alternativamente puede ser controlada para limitar el tamaño de la LBZs (10).

2.4.2. Zona de fusión en soldaduras multi-pasadas

En el metal de soldadura de las uniones de múltiples pases el efecto del recalentamiento da lugar a diferentes microestructuras similar al de la ZAC. Sin embargo, en lugar de una clasificación detallada de estas, el metal en la zona de fusión está constituida en solo dos regiones (figura 2.4):

- Región primaria, donde la microestructura se desarrolla a medida se enfría la soldadura en fase líquida a temperatura ambiente.
- Región secundaria, donde la microestructura de la región primaria es recalentada a una temperatura arriba de la línea AC_1 .

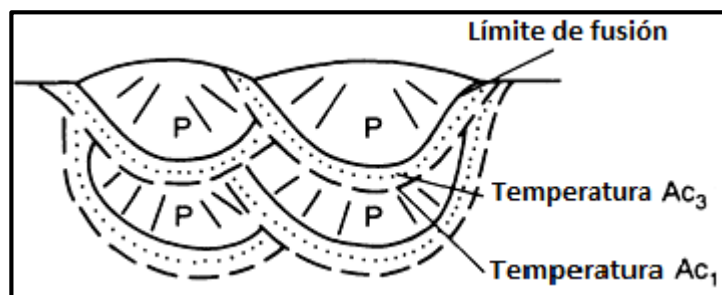


Figura 2.4. Región primaria (P) y reautenizada en el metal de soldadura de las uniones de multipasadas (10).

En la región reautenizada, la estructura columnar no está definida claramente. Las propiedades del metal de soldadura dependen del área relativa o fracción de volumen de las dos regiones, que a su vez depende del procedimiento de soldadura. Por lo tanto es necesario la calificación de procedimiento de soldadura por códigos y normas además de consumibles calificados (10).

2.4.3. Soldaduras de una sola pasada vs multi-pasadas

En términos de propiedades mecánicas, especialmente tenacidad, el metal de soldadura elaborada con múltiples cordones es mejor que una soldadura de cordón simple por las siguientes razones (10):

- El ciclo térmico del recalentamiento de cada paso subsecuente normaliza y refina parte de la microestructura en el metal de soldadura depositado anteriormente.
- Los cordones posteriores templan y alivian esfuerzos residuales del metal de soldadura depositado anteriormente.
- La entrada de energía total por los cordones es reducida, que es útil para limitar el crecimiento de grano.
- El cordón de soldadura anterior proporciona un determinado precalentamiento que disminuye la velocidad de enfriamiento de los cordones siguientes.

La figura 2.5 muestra que la ductilidad del metal de soldadura (área de la sección transversal) aumenta a medida que la superficie total de granos refinados se extiende.

2.4.4. Soldadura multi-pasadas en aceros HSLA

Según las investigaciones de González y colaboradores (19), la microestructura final depende de una compleja interacción del ciclo térmico creado por la soldadura y la composición química del metal base. Zalazar y colaboradores (20), definen que la sucesión de cordones en una soldadura multipasadas, genera en el metal base una ZAC muy compleja, con propiedades mecánicas no siempre adecuadas, debido a que la sucesión de ciclos térmicos produce problemas, tales como:

- Crecimiento de grano
- Formación de fases frágiles cercanas a la línea de fusión
- Inclusiones no metálicas
- Ablandamiento excesivo

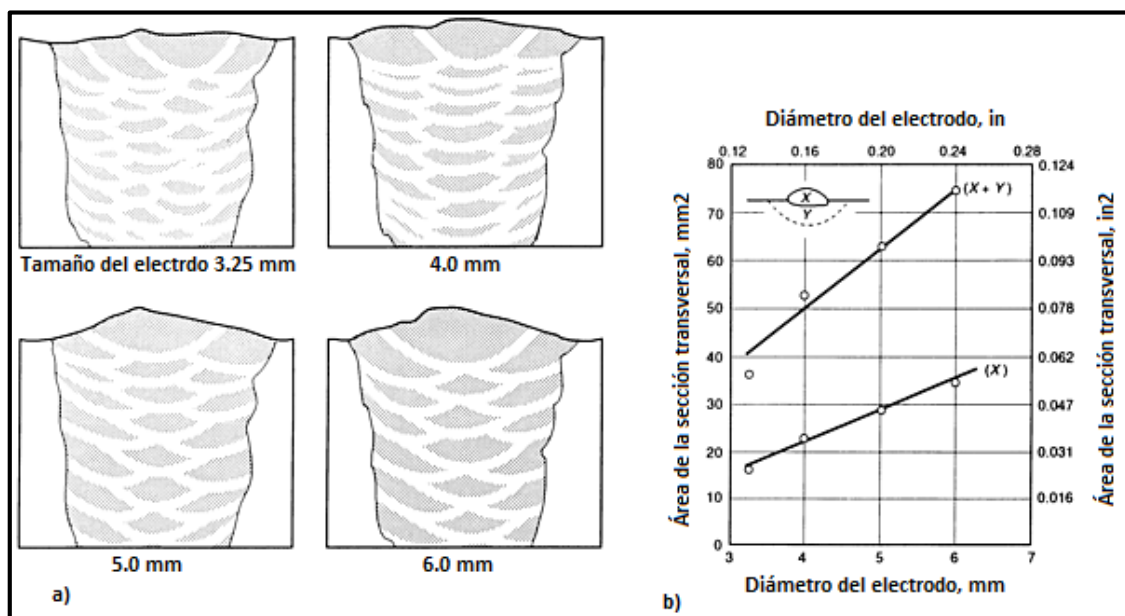


Figura 2.5. Efecto del tamaño del electrodo sobre la cantidad de metal de soldadura recristalizado en soldadura de múltiples pases. a) sección transversal como función del diámetro del electrodo; las áreas blancas representan el metal de soldadura recristalizado, b) representación gráfica (10).

Lo anterior es más notorio con contenidos de carbono altos con lo que la susceptibilidad de formación de fases frágiles es mayor.

Como se ya se analizó en los temas anteriores, la sucesión de ciclos térmicos en la soldadura de múltiples pases tiene ventajas sobre las propiedades mecánicas de la unión soldada, sobre todo con contenidos de carbono bajos tanto en el metal base como en el metal de soldadura.

Los aceros HSLA tienen esta propiedad de bajo contenido de carbono por lo que una soldadura de múltiples pases proporciona adecuadas propiedades microestructurales a la unión soldada, esto se demuestra en

muchas investigaciones donde se hace referencia a las microestructuras producidas en soldaduras de múltiples pases.

En 1998, M. Zalazar *et al*, estudiaron las microestructuras producidas en la ZAC, utilizaron el proceso SMAW con una entrada de calor (HI, por sus siglas en inglés) de 1.10 KJ/mm. El metal base presentó una microestructura ferrítico-perlítico por su bajo contenido de carbono, mientras que en la ZAC hubieron pequeñas regiones frágiles, esto a pesar del bajo contenido de carbono, lo anterior está relacionado al bajo aporte térmico del proceso de soldadura empleado (20).

En el año 2006 se realizaron varias investigaciones en este rubro, una de ellas es la realizada por González Palma, *et al*, donde se usó un HI de 2.4 KJ/mm, encontrando una microestructura en el metal base de ferrita y perlita y en el metal de soldadura una mezcla de martensita de bajo carbono y bainita. Dichas microestructuras se presentan tanto en los cordones superiores como en la raíz debido a que el enfriamiento en estas zonas es más rápido (19).

En el mismo año, Keshav, *et al*, obtuvieron las mismas microestructuras en el metal base que los autores anteriores, en este trabajo las microestructuras presentes en las regiones de la ZAC fueron similares al metal base, con la diferencia de un refinamiento en los granos en las regiones que fueron recalentadas a una temperatura intercrítica, la diferencia puede radicar en el alto aporte térmico empleado en la unión soldada, entre 3.0 y 6.3 KJ/mm (21).

Bose-Filho, *et al*, emplearon un bajo HI, 1.3 KJ/mm, con la cual obtuvieron una microestructura de ferrita acicular y ferrita Widmanstätten en la soldadura y de ferrita acicular rodeada de ferrita alotriomórfica y mezcla de ferrita con constituyentes de austenita y martensita en la ZAC (22).

Con esta información se tiene un panorama de las microestructuras que se pueden presentar en la unión soldada del componente del cilindro de suspensión.

2.4.5. Transformaciones displacivas

En este mecanismo, las reacciones de transformación tienden a ser rápidas y a baja temperatura. Un cambio de la red cristalina de austenita a ferrita ocurre por una deformación ocasionada por un esfuerzo de corte dentro de un plano invariante. Las fases características de este mecanismo son: la martensita, bainita y ferrita Widmanstätten.

La presencia de estas fases está gobernada por una transformación en paraequilibrio; esto es, sin una redistribución de elementos sustitucionales de aleación durante la transformación.

- **Ferrita Widmanstätten**

La ferrita Widmanstätten no es el resultado de una transformación puramente de desplazamiento, pero se forma por un mecanismo de paraequilibrio, que involucra una rápida difusión del carbono intersticial, a través de la interfase dentro de la austenita retenida durante la transformación de corte. La ferrita Widmanstätten puede ser confundida fácilmente con bainita. El esquema de clasificación del Instituto Internacional de la Soldadura (IIW, por sus siglas en inglés) (figura 2.6) se refiere a estos modos de crecimiento como ferrita de segunda fase (FS).

Las placas de ferrita Widmanstätten primaria crecen a partir de los límites de grano austenítico o de inclusiones, mientras que las placas de ferrita Widmanstätten secundaria, lo hacen a partir de ferrita alotrópica WF- FS(A). De acuerdo a su sitio de nucleación se le asigna un término en particular, según IIW (23).

- **Ferrita acicular**

La ferrita acicular, tiene en sus tres dimensiones una morfología de placas delgadas ovaladas, las cuales nuclean intergranularmente durante la

transformación γ/α a partir de inclusiones dentro de los granos de austenita (siempre que exista una alta densidad de inclusiones), una fina estructura entrelazada (generalmente $< 5\mu\text{m}$) se puede producir, algunas de estas placas pueden estimular la nucleación de otras; un efecto conocido como auto catálisis. En el esquema IIW, la ferrita acicular es designada por AF (figura 2.7).

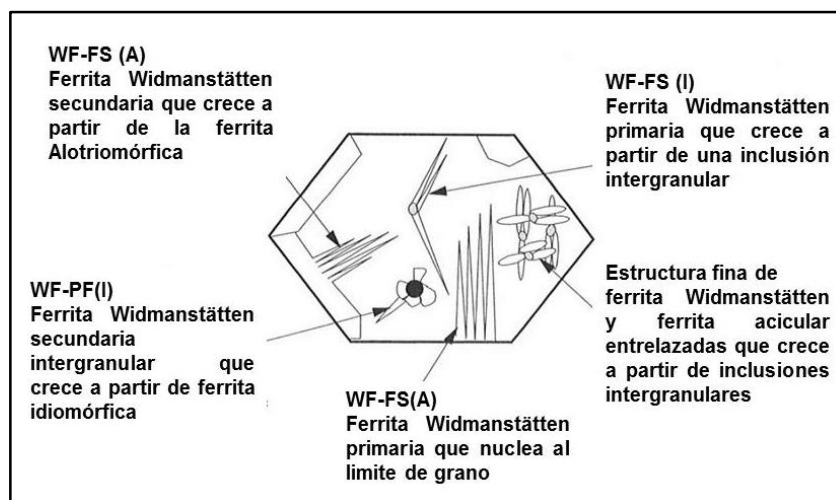


Figura 2.6. Ferrita de Segunda Fase (FS). Ferrita Widmanstätten (WF) (23).

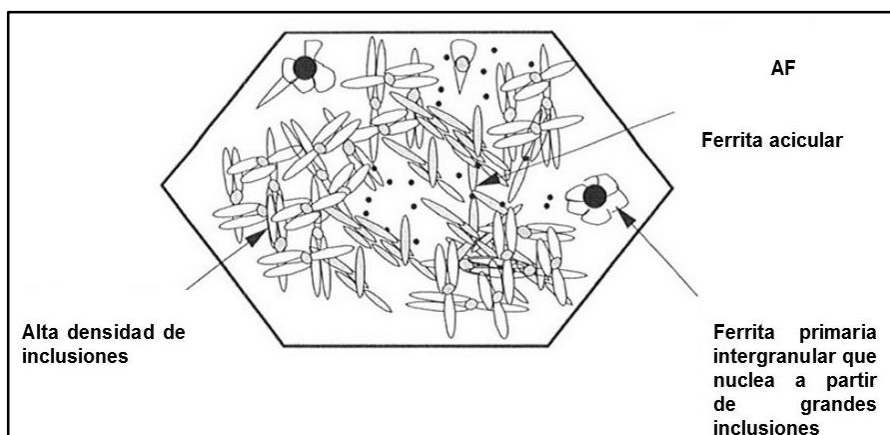


Figura 2.7. Ferrita acicular (23).

- **Bainita**

Cuando la austenita se enfría a grandes sobresaturaciones por debajo de la nariz de la curva de transformación perlítica, un nuevo producto eutectoide

llamado bainita es originado. Como la perlita, la bainita es una mezcla de ferrita y carburos, pero son microestructuralmente bastante distintos de la perlita. La microestructura de la bainita depende principalmente de la temperatura en la cual se forma.

La formación de la bainita se da a temperaturas en donde las transformaciones controladas mediante difusión son lentas y tienen características en común con las transformaciones martensíticas de baja temperatura, crece en listones individuales, o en sub-unidades, para formar arreglos paralelos a partir del límite de grano austenítico o de inclusiones intergranulares, (figura 2.8). El crecimiento de cada sub-unidad está acompañado por la deformación en un plano invariante causada por un movimiento de corte en la red. No hay redistribución de hierro o elementos sustitucionales en la interfase de transformación (23).

La bainita se ha clasificado dentro de dos componentes: bainita superior y bainita inferior, dependiendo de la temperatura de transformación, (figura 2.9).

- *Bainita superior*

A altas temperaturas (350 °C -550 °C) la bainita consiste en agujas o listones de ferrita con precipitación de cementita entre los listones como se muestra en la figura 2.10, se observan los listones de ferrita creciendo dentro de la austenita transformada parcialmente. Un mecanismo de paraequilibrio en la bainita superior involucra una transformación de corte acompañada por una rápida difusión de átomos de carbono a través de la interfase γ/α .

A más altas temperaturas donde la bainita y perlita crecen competitivamente en la misma muestra, puede ser difícil distinguir las colonias de perlita de la bainita superior. Ambas aparecen como líneas alternadas de cementita en ferrita, sin embargo, las dos microestructuras se forman en caminos bastante diferentes. La diferencia más grande entre los dos constituyentes es su cristalografía. En el caso de la perlita, la cementita y la

ferrita no tiene orientación específica relacionada al grano austenítico en la cual crecen, mientras la cementita y la ferrita en la bainita tiene una orientación relacionada con el grano en la cual ella crece (23).

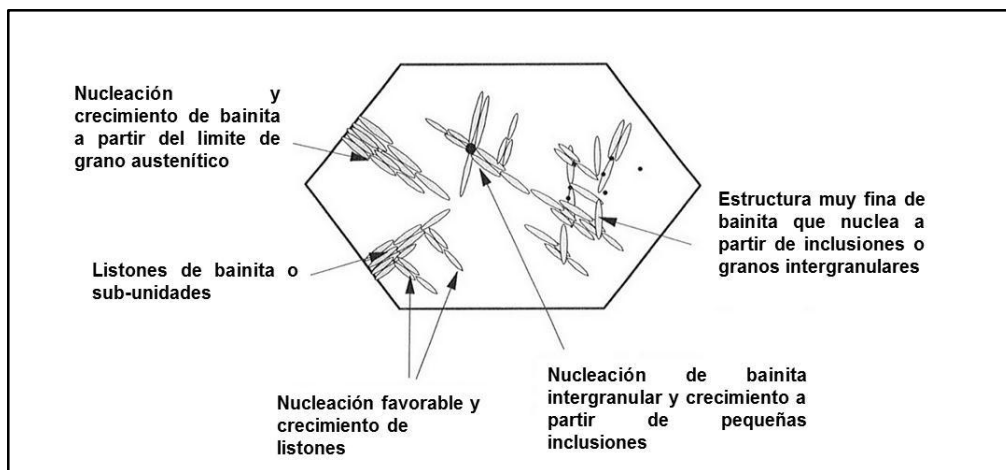


Figura 2.8. Crecimiento de la bainita.

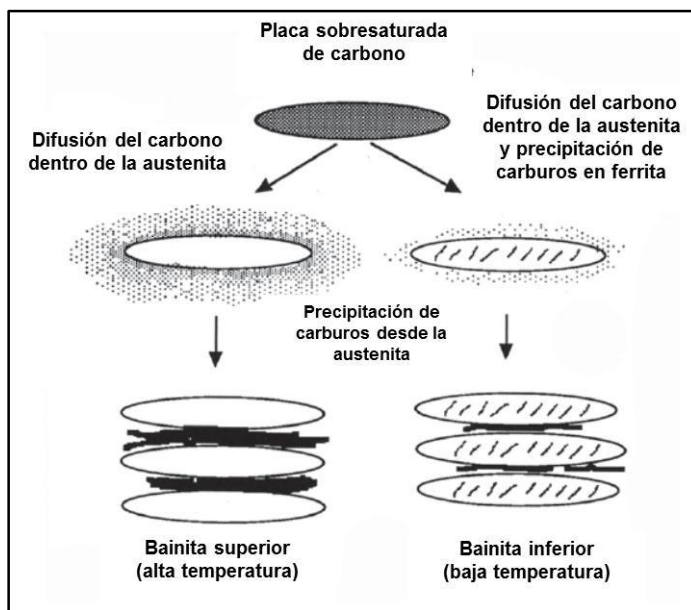


Figura 2.9. Esquema de trayectoria de transición de bainita superior e inferior (23).

- *Bainita inferior*

A temperaturas lo suficientemente bajas, la microestructura de bainita cambia de listones a placas y la dispersión de carburos llega a ser mucho más fina. La temperatura a la cual la transición de bainita inferior ocurre depende del

contenido de carbono. Para niveles de carbono debajo de 0.5 % e. p. la transición de temperatura incrementa con el incremento de carbono, de 0.5-0.7 % e. p. la temperatura disminuye y arriba del 0.7 % e. p. la temperatura es constante, cerca de 350 °C. A las temperaturas donde la bainita inferior se forma, la difusión del carbono es lenta. Los carburos son cementita o carburos de transición metaestable, como lo es el carburos ϵ , y están alineados aproximadamente a los mismos ángulos de los planos de las placas de ferrita. En la bainita inferior, la ferrita se satura con carbono originando una precipitación de carburos dentro de las sub-unidades de ferrita. Las placas de bainita se forman por un mecanismo de corte (23).

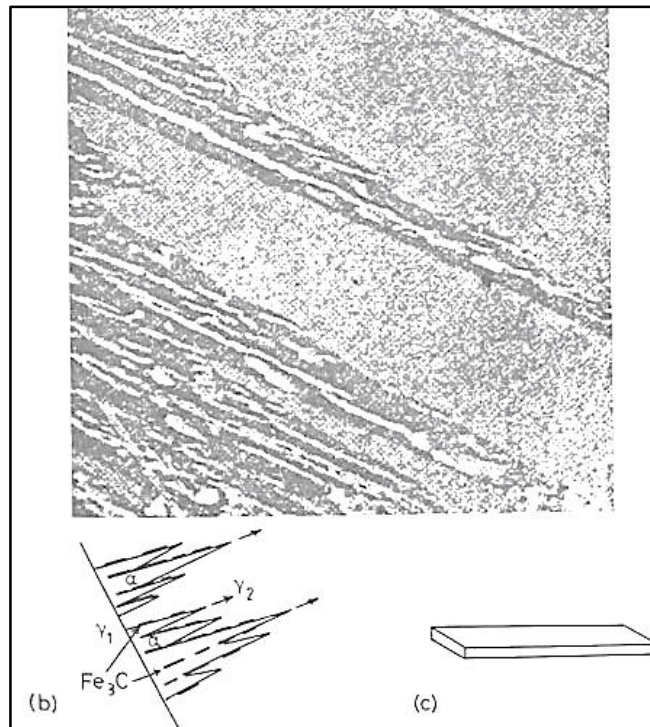


Figura 2.10. Bainita superior en aceros medio carbono (13000 X, Metals Society). (b) esquema del mecanismo de crecimiento. Placas de cementita que nuclea en austenita enriquecida de carbono. (c) ilustración morfológica de un listón (23).

- **Martensita**

La martensita se forma a partir de una rápida transformación adifusional, provocada por un rápido enfriamiento a partir de una alta temperatura, donde el

carbono es retenido en solución, este último origina un estado de saturación, que como consecuencia, deforma la red cúbica centrada en el cuerpo (BCC, por sus siglas en inglés), lo que da lugar a una estructura tetragonal. Por calentamiento a baja temperatura (50 °C-250 °C), la red tetragonal inestable de la martensita se transforma en red cúbica idéntica a la del hierro alfa, precipitándose el carbono en forma de pequeñísimas partículas. Para diferenciar ambos tipos de martensita, se llama martensita alfa a la de red tetragonal obtenida en el temple y martensita beta, a la de red cúbica, obtenida calentando a baja temperatura la martensita alfa.

La martensita nuclea en el interior de los granos, propagándose hacia los límites en dos direcciones opuestas. Su crecimiento se detiene en límites de grano o en otras agujas que se interponen en su trayectoria, originando un arreglo con una alta densidad de dislocaciones; así, pueden distinguirse agujas en la primera, segunda o tercera generación. La intersección de agujas adyacentes suele tener ángulos muy agudos, produciéndose así las formas de punta de flecha.

Sus propiedades físicas varían con la composición de carbono, su contenido es generalmente desde pequeñas trazas hasta 1 % y algunas veces en aceros hipereutectoides aún suele ser más elevado, aumentando su dureza resistencia y fragilidad con el contenido de carbono, hasta un máximo para C=0.90 % aproximadamente. Después de los carburos y la cementita es el constituyente más duro en los aceros, teniendo resistencia de 170 a 250 Kg/mm², una dureza de 50 a 68 Rockwell-C y elongación de 2.5 a 0.5 % (23).

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

3.1. Aceros de baja aleación y alta resistencia.

El metal base utilizado en la fabricación de los cilindros de suspensión es de baja aleación, el cual como describe la literatura, tiene entre sus ventajas alta resistencia mecánica y a la corrosión con porcentajes bajos de carbono mejorando la soldabilidad de este. En comparación con los aceros estructurales de medio carbono los aceros HSLA alcanzan las mismas propiedades mecánicas o mejores con menor densidad. Estas propiedades son proporcionadas por los elementos aleantes como el Nb, V y Ti, que forman carburos, nitruros y carbonitruros.

3.2. Parámetros de soldadura del proceso GMAW en uniones de grandes espesores

Como se mencionó en la parte introductoria del trabajo, es necesario comparar el proceso de soldadura actual (FCAW) con que se fabrican el cilindro de suspensión. Cabe mencionar que este proceso presenta grandes tasas de depósito, requiere menos limpieza en la preparación de la unión pero genera una fuerte cantidad de humos que reducen el desempeño del soldador aunado a la escoria que se forma entre cordones.

Por ello se buscó en la literatura lo referente a parámetros adecuados del proceso de soldadura GMAW aplicado en grandes espesores, obteniendo así parámetros promedios para aplicarlos en las probetas que representen la unión del componente. El proceso GMAW tiene la ventaja de soldar todos los metales comerciales, aumentando la productividad al no generar escoria y con tasas de depósito altas; en contraste se requiere una mayor limpieza en la preparación de la unión y el alto calor irradiado influyen en el desempeño del soldador.

3.3. Metalurgia en uniones de acero HSLA de grandes espesores.

Los diversos ciclos térmicos presentes en una unión de múltiples pases generan una compleja ZAC donde se pueden presentar zonas de ablandamiento excesivo, crecimiento de grano, formación de fases frágiles e inclusiones no metálicas. Esto puede ser controlado manipulando las velocidades de enfriamiento que a su vez depende de la entrada de calor, espesor del metal base y las temperaturas de precalentamiento.

La microestructura final de la unión soldada depende de la interacción del ciclo térmico y la composición química de la soldadura que está en función

de la composición química del metal base, del gas de protección y de metal de aporte. La ZAC es la zona que presenta en la mayoría de los casos las propiedades mecánicas menos eficientes de la unión soldada. Esta área es el metal base que fue modificada microestructuralmente por los ciclos térmicos de la soldadura. Se distinguen cuatro regiones en la ZAC, las cuales están definidas por la temperatura de recalentamiento a las que están sujetas durante la soldadura.

De estas regiones la denominada “región de grano grueso”, (adyacente a la línea de fusión), es la que en las diferentes investigaciones analizadas presentó menor tenacidad, en dicha región se puede presentar colonias de ferrita acicular rodeada de ferrita alotriomórfica. Mientras que en la zona de grano fino según la literatura se pueden encontrar mezclas de ferrita mas constituyentes de M-A.

Anteriormente se han realizado investigaciones en relación a las microestructuras obtenidas en uniones de acero HSLA con grandes espesores. Los trabajos de investigación que se tomaron en cuenta para esta monografía demuestran que la microestructura presente en el metal base es ferrítico-perlítico.

Las cantidades de las diferentes fases dependen de los elementos de aleación; de esta forma la microestructura esperada en el metal de soldadura en un acero al C-Mn consisten en diferentes cantidades de ferrita acicular, ferrita alotriomórfica y ferrita Widmanstätten. En este acero elementos como el Mn y Si incrementan la cantidad de ferrita acicular, mientras que el Mo y Cr promueven la formación de bainita. Las inclusiones actúan como puntos de nucleación de la ferrita acicular o como sitios de inicio del proceso de fractura por clivaje.

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDIO

4.1. Metodología

El presente trabajo es el resultado de un análisis bibliográfico acerca de las propiedades mecánicas y metalúrgicas de los aceros de baja aleación, procesos de soldaduras involucrados y metalurgia en uniones de grandes espesores.

Con base en lo anterior se elaboraron los cupones de soldadura que idealizaron la unión soldada real y se sometieron a un análisis microestructural y de propiedades mecánicas, las cuales se llevaron a cabo en las instalaciones de COMIMSA y de la Universidad Politécnica de Catalunya.

La metodología utilizada se esquematiza en la figura 4.1.

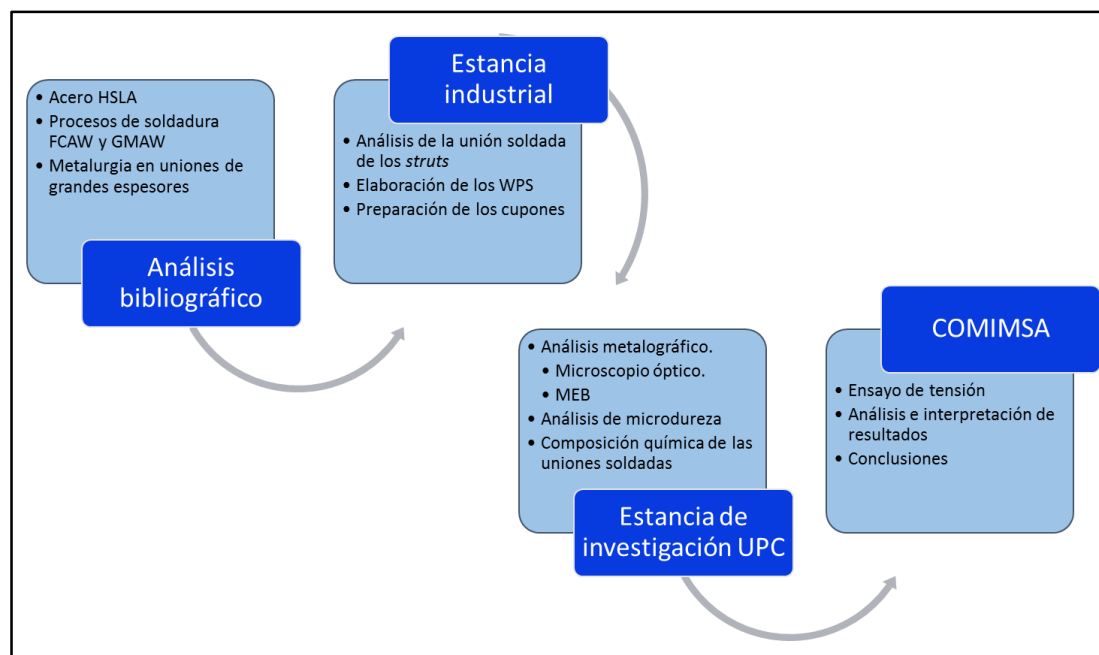


Figura 4.1. Metodología empleada en el análisis comparativo de los procesos FCAW y GMAW en aceros HSLA en uniones de grandes espesores.

El cilindro de suspensión se compone de dos placas laterales y una serie de costillas de refuerzo. Todo el componente se fabrica con acero de baja aleación. El acero comercial comparativo se refiere a un ASTM A572 grado 60, cuya resistencia última a la tensión es de 520 Mpa. En la figura 4.2 se muestra la sección transversal de la unión real del componente.

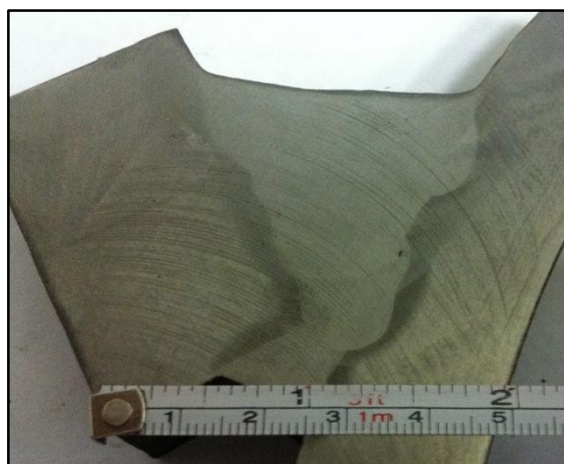


Figura 4.2. Sección transversal de la unión soldada de la placa y el cilindro de suspensión.

Los cupones de soldadura se elaboraron con placas de 50 mm de espesor con dimensiones de 7 x 15 pulgadas. La configuración de la unión se ejemplifica en las figuras 4.3 y 4.4. Cabe mencionar que la soldadura se realizó en dos posiciones, horizontal para la soldadura de raíz y plana para los demás cordones. La temperatura entre cordones se controló evitando se superaran los 200° C para evitar problemas de distorsión en los cupones. La temperatura mínima de precalentamiento y temperatura entre cordones se determinó de acuerdo al anexo I del código AWS D1.1-2010. El tiempo de arco fue de 28.06 min para el proceso FCAW y 33.30 min para el proceso GMAW.

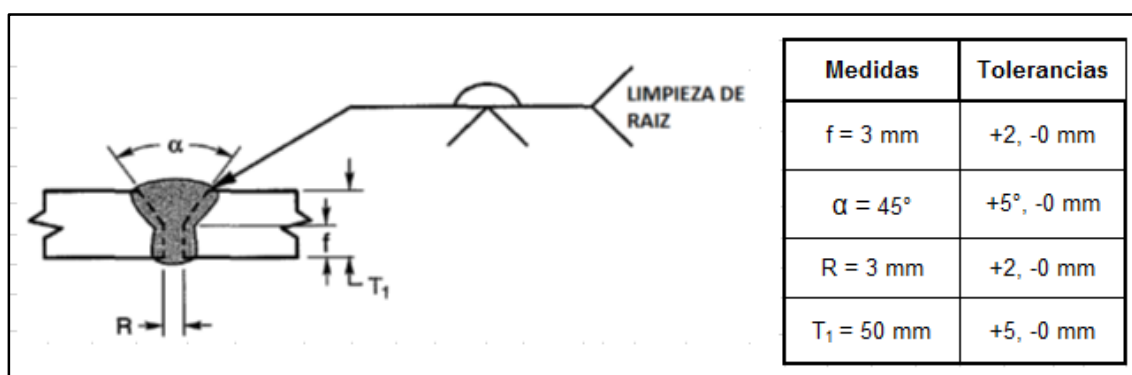


Figura 4.3. Configuración de la unión soldada propuesta.

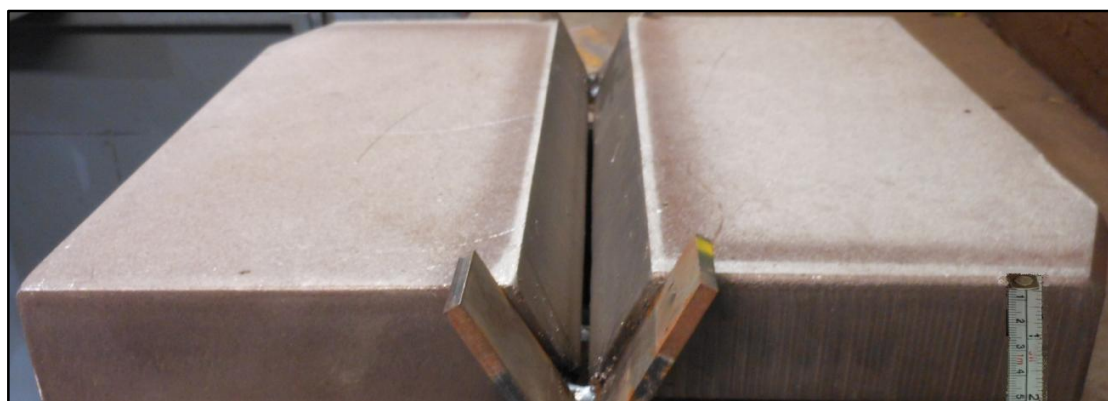


Figura 4.4. Cupón de soldadura. Esta misma configuración se usó tanto el proceso FCAW como en el GMAW.

Los parámetros de soldadura empleado en ambos procesos se muestran en las tablas 4.1 y 4.2. Los WPS para ambos procesos de muestran en el apéndice A.

Tabla 4.1. Parámetros de soldadura empleados en la elaboración del cupón de soldadura por el proceso FCAW.

No. Pases	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Volts	Tempo de arco (min)	Vel. de Avance (mm/min)	Calor de entrada (KJ/mm)
		Clase	Diam. (mm)	Tipo y Polaridad	Amps o velocidad de alimentación alambre				
1	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	4.6 m/min	30.00	2.00	190.50	4.3
2	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.25	304.80	3.8
3	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.53	249.02	4.6
4	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.55	245.81	4.7
5	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.67	228.14	5.1
6	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.78	488.46	2.4
7	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.72	529.17	2.2
8	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.40	272.14	4.2
9	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.70	544.29	2.1
10	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.80	476.25	2.4
11	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.37	278.10	4.2
12	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.80	476.25	2.4
13	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.72	529.17	2.2
14	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.38	276.09	4.2
15	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.38	276.09	4.2
16	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.75	508.00	2.3
17	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.68	560.29	2.1
18	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.77	494.81	2.3
19	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.67	568.66	2.0
20	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.10	346.36	3.3
21	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.83	459.04	2.5
22	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.72	529.17	2.2
23	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.93	409.68	2.8
24	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.43	266.43	4.3
25	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	2.13	178.87	6.5

Tabla 4.2. Parámetros de soldadura empleados en la elaboración del cupón de soldadura por el proceso GMAW.

No. Pases	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Volts	Tempo de arco (min)	Vel. de Avance (mm/min)	Calor de entrada (KJ/mm)
		Clase	Diam. (mm)	Tipo y Polaridad	Amps o velocidad de alimentación alambre				
1	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	8.3 m/min	27.00	2.00	190.50	2.13
2	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.40	272.14	2.42
3	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.77	215.25	3.05
4	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	2.00	190.50	3.45
5	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	2.48	153.63	4.28
6	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	2.93	130.03	5.05
7	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.28	297.66	2.21
8	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.50	254.00	2.59
9	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.50	254.00	2.59
10	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.75	217.71	3.02
11	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.82	209.34	3.14
12	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.77	215.25	3.05
13	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.00	381.00	1.73
14	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.38	276.09	2.38
15	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.38	276.09	2.38
16	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.35	282.22	2.33
17	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.32	288.64	2.28
18	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.75	217.71	3.02
19	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.45	262.76	2.50
20	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.47	259.18	2.54

La sección transversal de las uniones terminadas se muestra en la figura 4.5. Para el análisis microestructural la unión se seccionó en ocho partes con el fin de cubrir todas las zonas de la unión (MB, MS y ZAC). En la imagen 4.5 se ilustra el seccionamiento de las probetas.

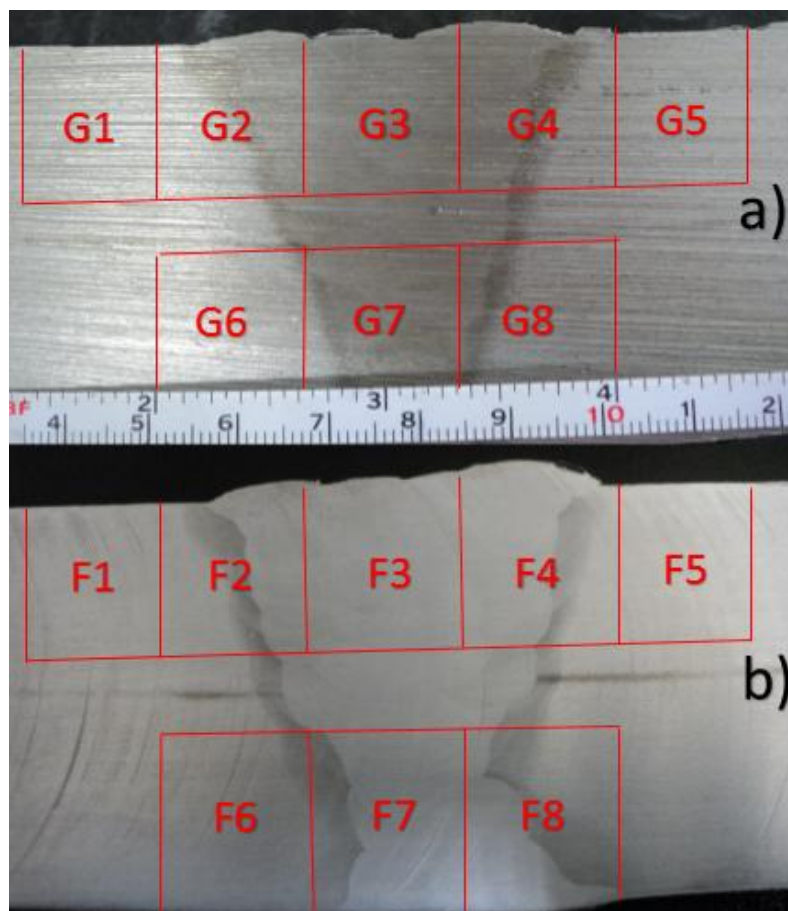


Figura 4.5. Sección transversal de las uniones terminadas, seccionamiento e identificación de las probetas. a) Proceso GMAW, b) Proceso FCAW.

4.2. Materiales

Los materiales utilizados en la elaboración de los cupones de soldadura y el ataque químico que se empleó para el análisis metalográfico se describen a continuación.

El ataque químico empleado para revelar la microestructura de las uniones soldadas fue nital al 2 % (100 ml etanol, 2 ml ácido nítrico). El metal base se refiere a un ASTM A 572, cuya composición química se muestra en la tabla 4.3. El metal de aporte para el proceso de soldadura FCAW tiene una clasificación E70T-5C-JH4 electrodo que está bajo los requerimientos de la especificación AWS A5.20. La clasificación del metal de aporte para el proceso GMAW es ER70S-3, quien satisface los requerimientos de la especificación AWS A5.18. La composición química de estos electrodos según el proveedor se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.3. Composición química del metal base (espectrometría de chispa), % e. p.

Material	C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr
	0.18	1.33	0.097	0.045	0.029	0.019
MB	P	S	Al	Ti	Nb	V
	0.017	0.004	0.038	0.0117	0.0015	0.001

Tabla 4.4. Composición química de los metales de aporte según el proveedor. Por una parte se describe la composición química especificada en la norma y la composición como metal depositado, % e. p.

Clasificación	C	Mn	Si	S	P	Difusión H (ml/100 gr MS)
ER70S-3 requerimiento	0.006-0.15	0.90-1.40	0.45-0.75	0.035	0.025	----
ER70S-3 depósito	0.07-0.10	1.15-1.27	0.52-0.59	0.002- 0.008	0.005- 0.013	---
E70T-5C-JH4 requerimiento	0.12	1.75	0.90	0.03	0.03	4
E70T-5C-JH4 depósito	0.06-0.08	1.51-1.66	0.44-0.53	0.01	0.01	2-4

4.3. Ensayos

Con base en el análisis químico del metal base se obtuvo la temperatura mínima de precalentamiento y entre cordones de acuerdo al anexo I del código de soldadura estructural D1.1-2010. Para ello se calculó tanto el carbono equivalente (CE) como el parámetro de composición (P_{cm}) como se indican en las ecuaciones 1 y 2.

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} = 0.41 \quad (1)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B = 0.25 \quad (2)$$

Con estos valores se obtiene que la temperatura mínima entre cordones y de precalentamiento es de 40° C (100° F).

- **Análisis químico**

Es de interés conocer la composición química del metal de soldadura, por lo tanto se llevó a cabo el análisis por espectrometría de chispa en el área de metalurgia de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). El análisis constó de cinco repeticiones por probeta, los resultados se muestran en la tabla 4.5.

- **Metalografía**

El fin de este análisis es obtener mediante imágenes las diferentes microestructuras presentes en la soldadura, ZAC y metal base. Las microestructuras fueron evaluadas con microscopio óptico Olympus GX51 y con el microscopio electrónico de barrido, JSM-64000, en las instalaciones de la UPC. Como dato adicional se tomaron imágenes del metal de soldadura en el

estereoscopio con el fin medir la distancia de la ZAC y el espesor del metal de soldadura recristalizado por los cordones subsecuentes.

- **Microdureza**

El ensayo fue realizado en una máquina de indentaciones de microdureza Vickers Akashi MVK – HO. Considerando el espesor de 50 mm de las uniones, las indentaciones fueron tomadas en la parte superior, intermedio e inferior de la soldadura, haciendo tres repeticiones en cada zona de interés, tal como se ilustra en la figura 4.6. Esta prueba fue realizada como ayuda a la evaluación microestructural de las dos uniones de soldadura.

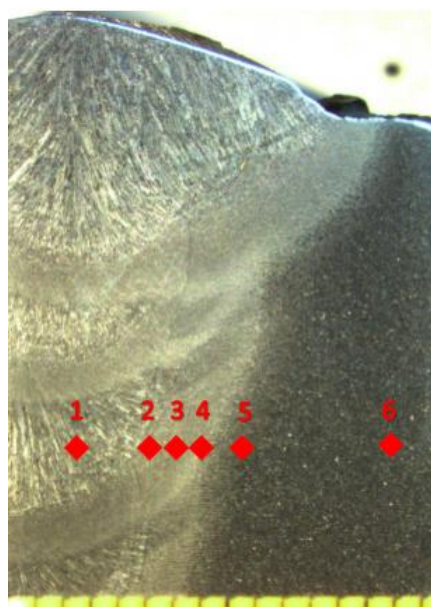


Figura 4.6. Zonas indentadas en la unión soldada. 1.- MS, 2.- ZAC GG, 3.- ZAC GR, 4.- ZAC intercrítica, 5.- ZAC subcrítica, 6.- MB.

- **Tensión**

El ensayo de tensión se realizó en una máquina de tensión Tinius Olsen con capacidad de 100 toneladas, en las instalaciones de COMIMSA. La probeta se elaboró de acuerdo a lo establecido en el código de soldadura para maquinaria pesada AWS D14.3.

4.4. Resultados

• Análisis químico

En la tabla 4.5 se muestran los resultados del análisis químico por espectrometría de chispa de las uniones soldadas, en ambas se compara con la composición del metal base.

Tabla 4.5. Composición química del metal de soldadura depositado con ambos procesos; % e. p.

Material	C	Mn	Si	Cu	Ni	Cr	P	S	Al	Ti	Nb	V
MB	0.18	1.33	0.097	0.045	0.029	0.019	0.017	0.004	0.038	0.0117	0.0015	0.001
FCAW	0.07	1.44	0.363	0.035	0.029	0.023	0.013	0.010	0.014	0.0112	0.0026	0.004
GMAW	0.12	1.20	0.424	0.119	0.008	0.010	0.009	0.010	0.017	0.0019	0.0017	0.001

Se puede apreciar una disminución en el contenido de carbono en el metal de soldadura de la unión con el proceso FCAW respecto a la composición química del metal de aporte. Mientras que la composición química del metal de soldadura de la unión elaborada con GMAW no se aprecia cambios con respecto a la composición química del metal de aporte ER70S-3.

• Metalografía

Se identificaron cinco zonas de interés para el análisis comparativo de los procesos de soldadura, la figura 4.7 ilustra estas zonas.

Las regiones de la ZAC fueron definidas en función de la temperatura que alcanzaron durante la soldadura. Estas temperaturas van desde una temperatura subcrítica (debajo de la línea A_{C1} , en el diagrama Fe-C), hasta una temperatura supercrítica (arriba de la línea A_{C3} , en el diagrama Fe-C).

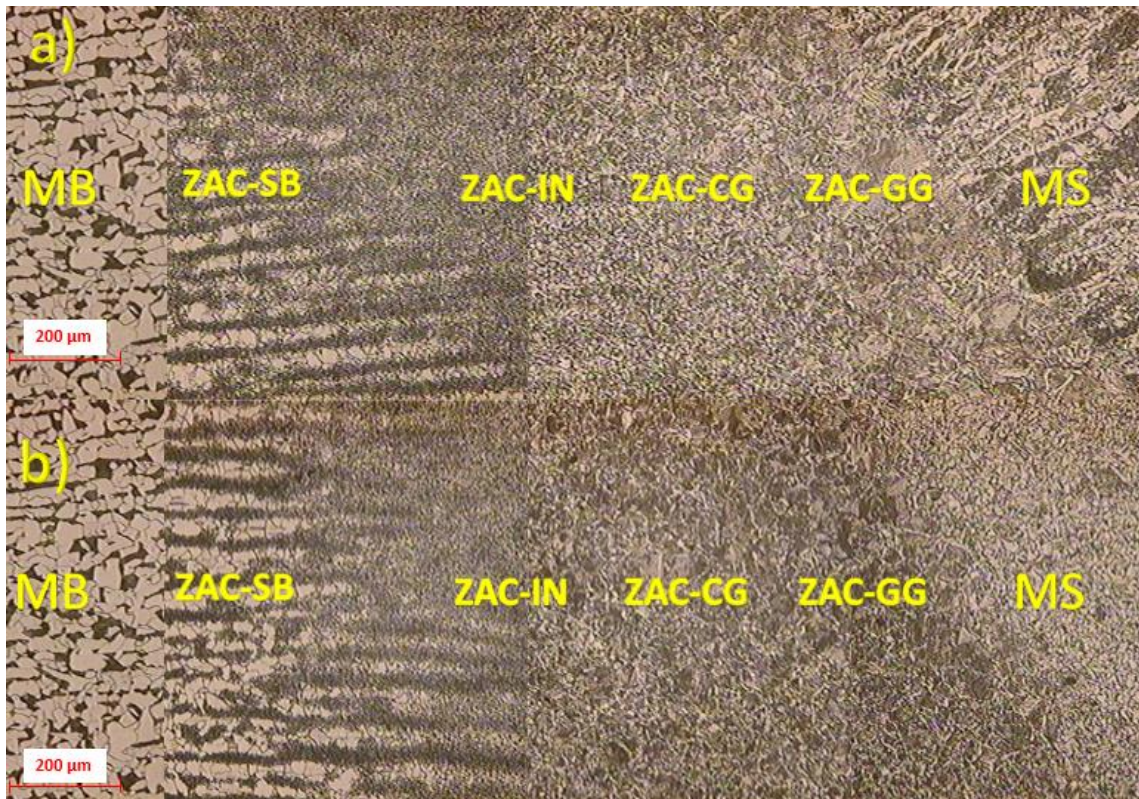


Figura 4.7. Regiones de interés en la unión soldada a) proceso FCAW, 3.5 KJ/mm, b) proceso GMAW, 2.9 KJ/mm. Se puede apreciar las cuatro regiones de la ZAC, así como la morfología de la microestructura del MB y el MS.

En el análisis de imagen que se efectuó se pudieron distinguir cuatro regiones en la ZAC, la región que fue calentada a una temperatura subcrítica, $< A_{c1}$, (ZAC-SB); la que se generó por una temperatura de calentamiento intercrítica, entre A_{c1} y A_{c3} , (ZAC-IN); la región de grano refinado o crecimiento de grano que alcanzó una temperatura $> A_{c3}$ pero $< 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, (ZAC-CG); y por ultimo tenemos la región de grano grueso, la cual alcanza temperaturas supercríticas, $> 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pero $< 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, (ZAC-GG).

En las imágenes 4.8 y 4.9 se aprecian la localización de las regiones de la ZAC en la sección transversal de las soldaduras.

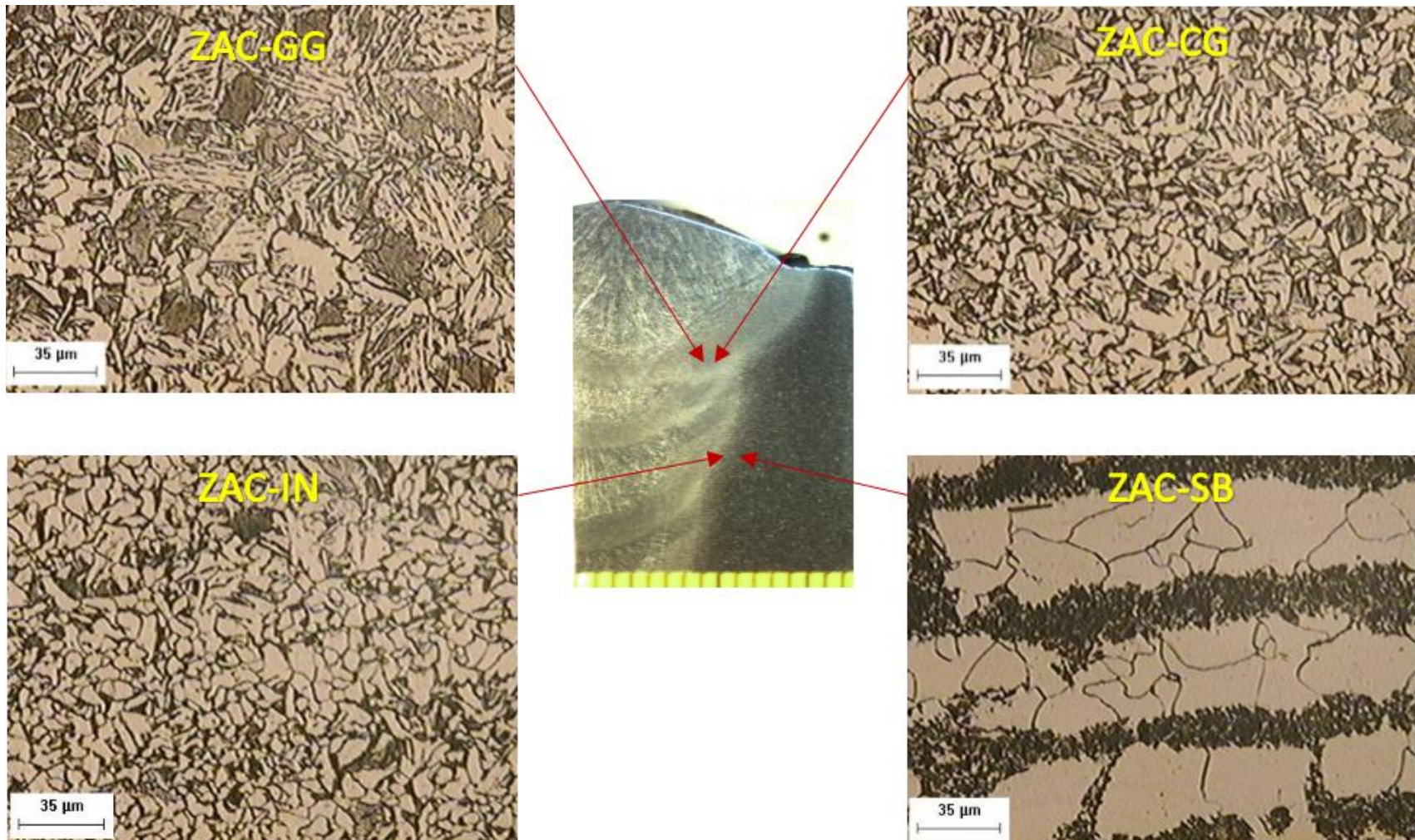


Figura 4.8. Regiones en la ZAC. Proceso de soldadura FCAW, H.I. = 3.5 KJ/mm.

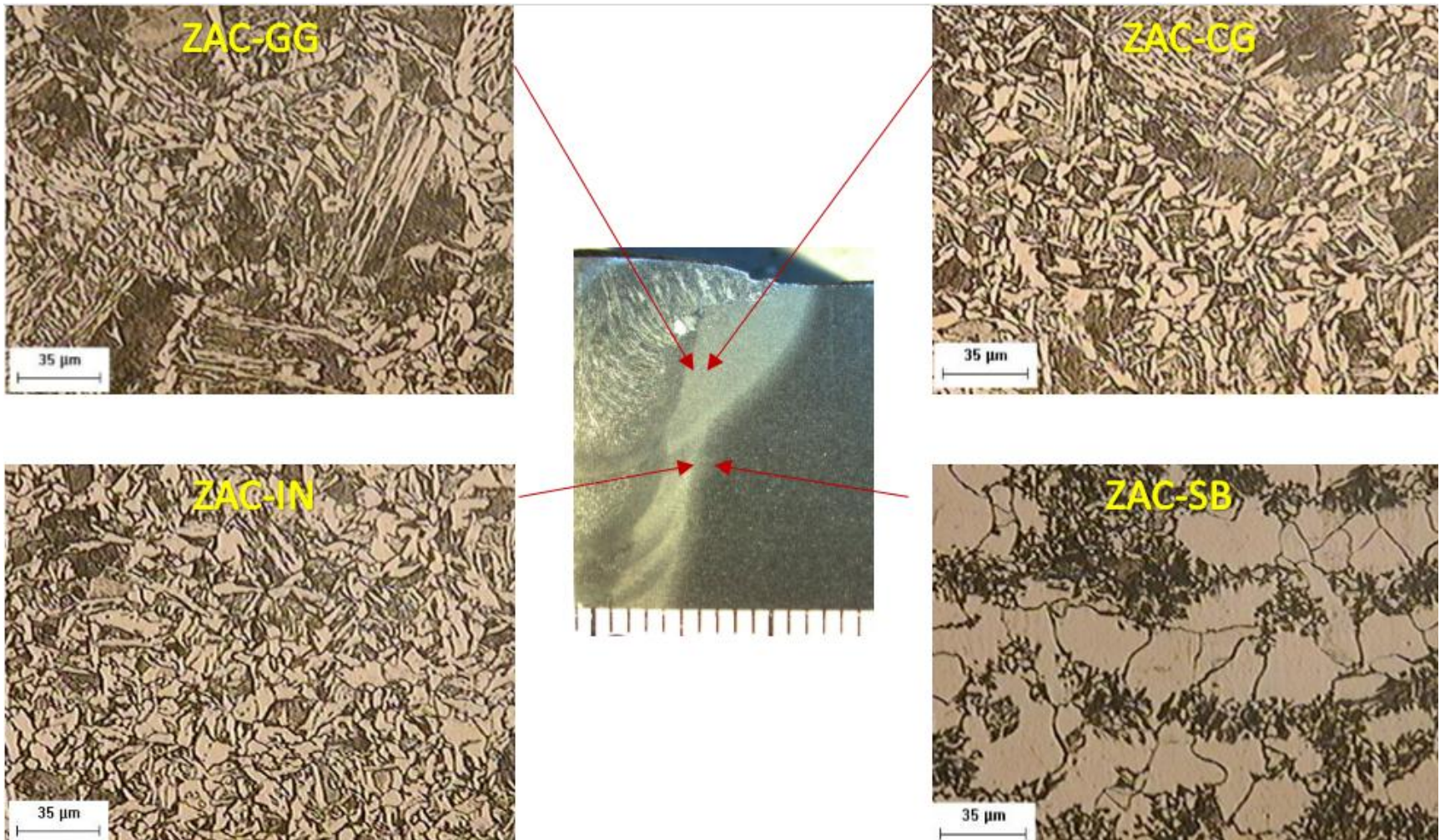


Figura 4.9. Regiones en la ZAC. Proceso de soldadura GMAW, H.I. = 2.9 KJ/mm.

En las figuras 4.10-4.15 se muestran las imágenes a diferentes magnificaciones de las microestructuras encontradas en las diferentes zonas.

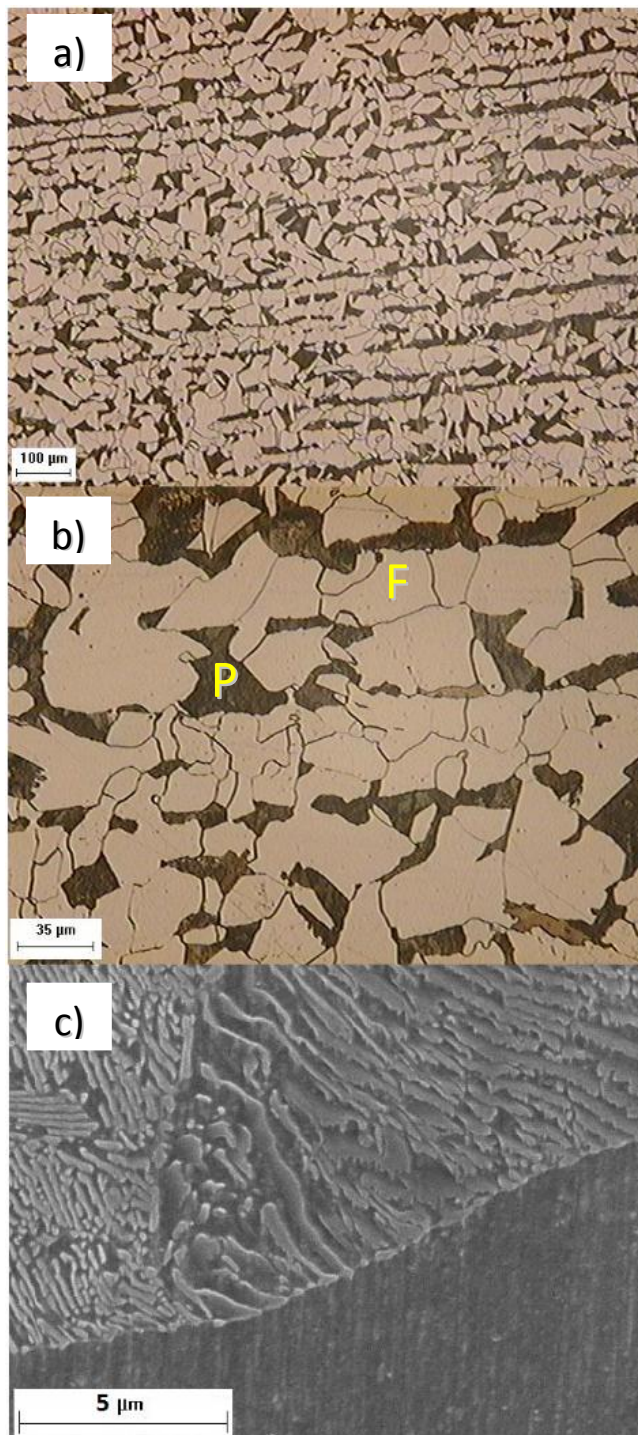


Figura 4.10. Microestructura del metal base ASTM A572. a-b) Micrografías con microscopio óptico, 50 y 200 X c) Micrografía con MEB, 5000 X.

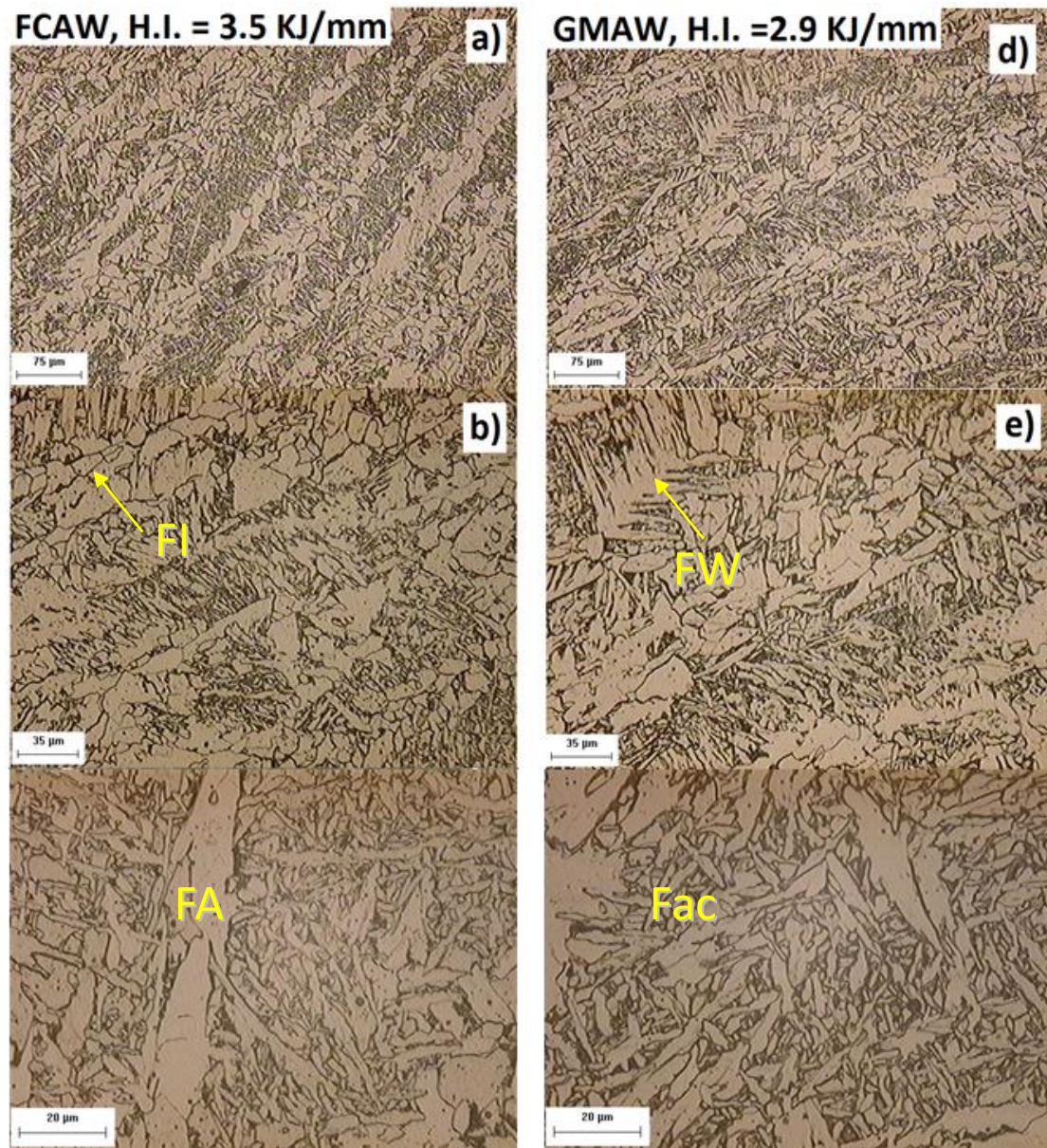


Figura 4.11. Micrografías a diferentes magnificaciones del metal de soldadura. a-c) Proceso FCAW, d-e) Proceso GMAW. a-b, d-e) Micrografías ópticas, 100, 200 y 500 X. Ferrita idiomórfica (FI), ferrita Widmanstätten (FW), ferrita acicular (Fac), ferrita alotriomórfica (FA).

La microestructura en el metal base queda definido como ferrítico perlítico, esto gracias a su bajo contenido de carbono (<0.70 %). Por otra parte se tiene una microestructura de ferrita Widmanstätten, favorecida por lento enfriamiento, y algunas regiones de ferrita acicular la cuales crecen a partir de inclusiones. Esta última provee resistencia a la propagación de grietas.

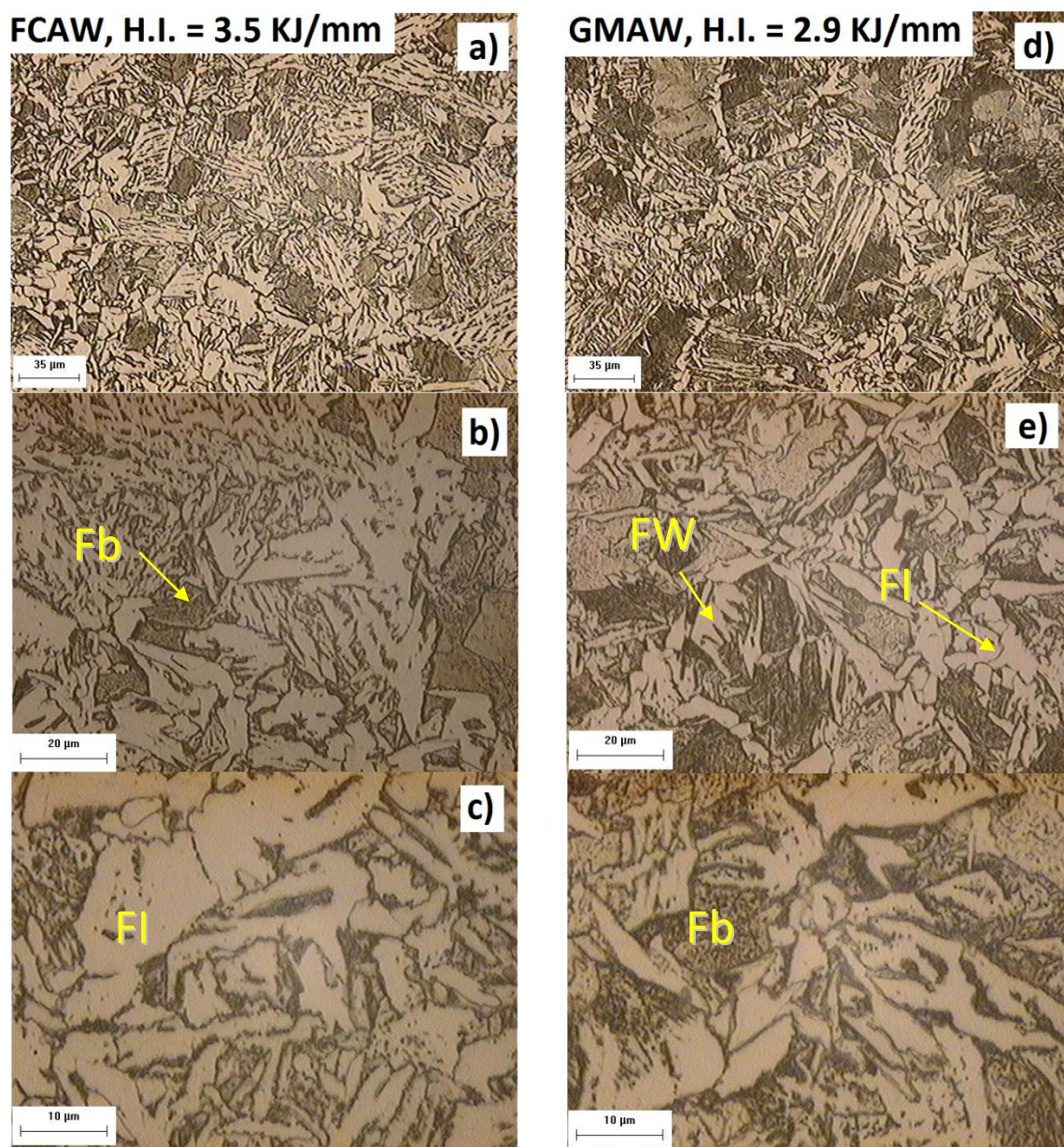


Figura 4.12. Micrografías a diferentes magnificaciones (200, 500 y 1000 X) de la región de grano grueso de la ZAC. a-c) Proceso FCAW, d-e) Proceso GMAW. Ferrita bainítica (Fb), ferrita Widmanstätten (FW), ferrita idiomórfica (FI).

A estas magnificaciones se puede apreciar que la región de grano grueso está formada por ferrita Widmanstätten y en las zonas oscuras muy probablemente se tendrá ferrita bainítica o en su defecto alguna clase de bainita. Comparando las dos soldaduras no existen cambios importantes en la morfología de las microestructuras.

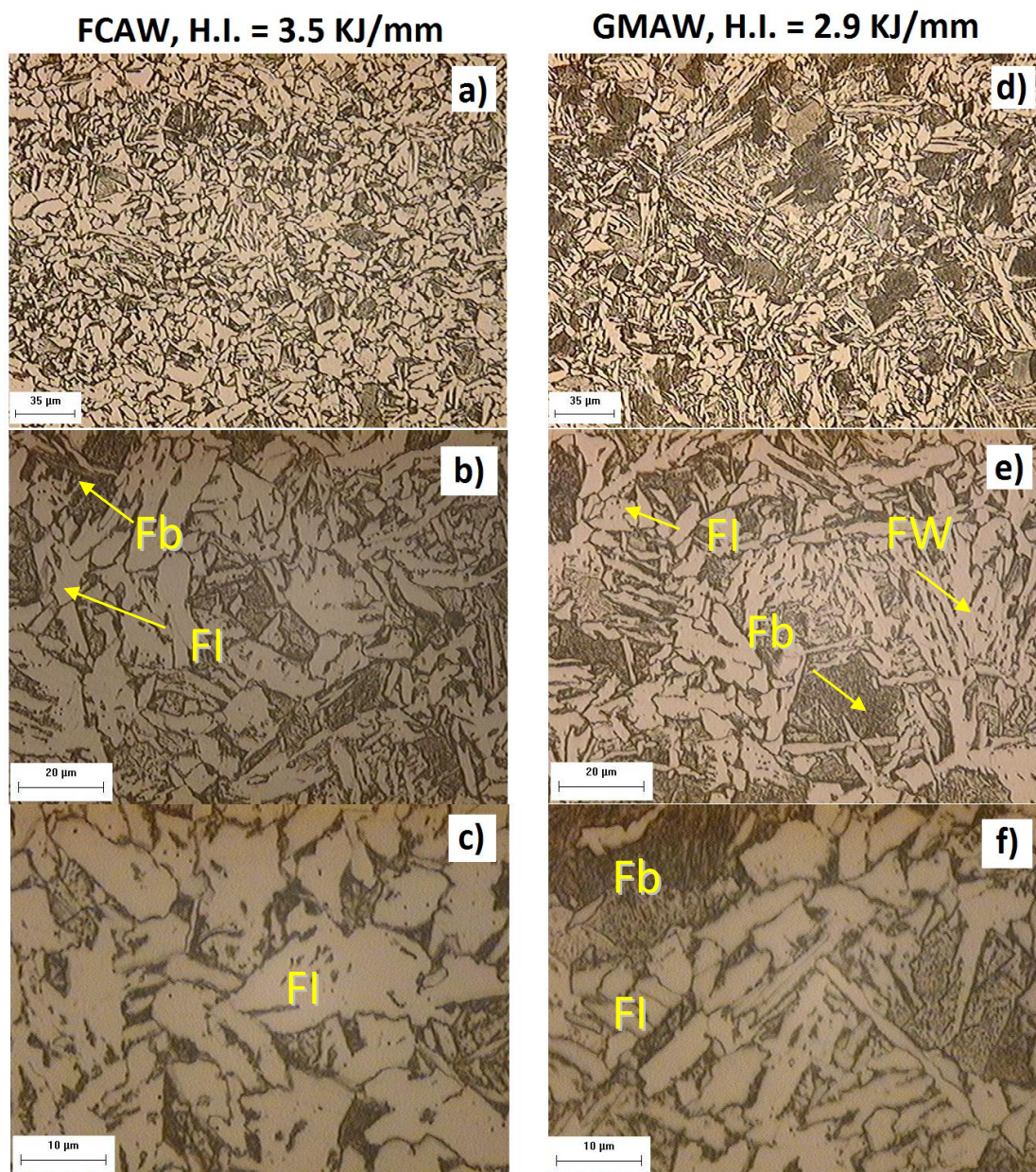


Figura 4.13. Micrografías a diferentes magnificaciones (200, 500 y 1000 X) de la región de crecimiento de grano de la ZAC. a-c) Proceso FCAW, d-e) Proceso GMAW. Ferrita bainítica (Fb), ferrita Widmanstätten (FW), ferrita idiomórfica (FI).

Al igual que en la zona de grano grueso en la región de grano fino o crecimiento de grano se tienen zonas de ferrita Widmanstätten y algunas zonas de ferrita bainítica. La diferencia en ambos procesos de soldadura radica en el tamaño de grano. Se aprecia granos más refinados con el proceso FCAW por la mayor entrada de calor que en el proceso GMAW.

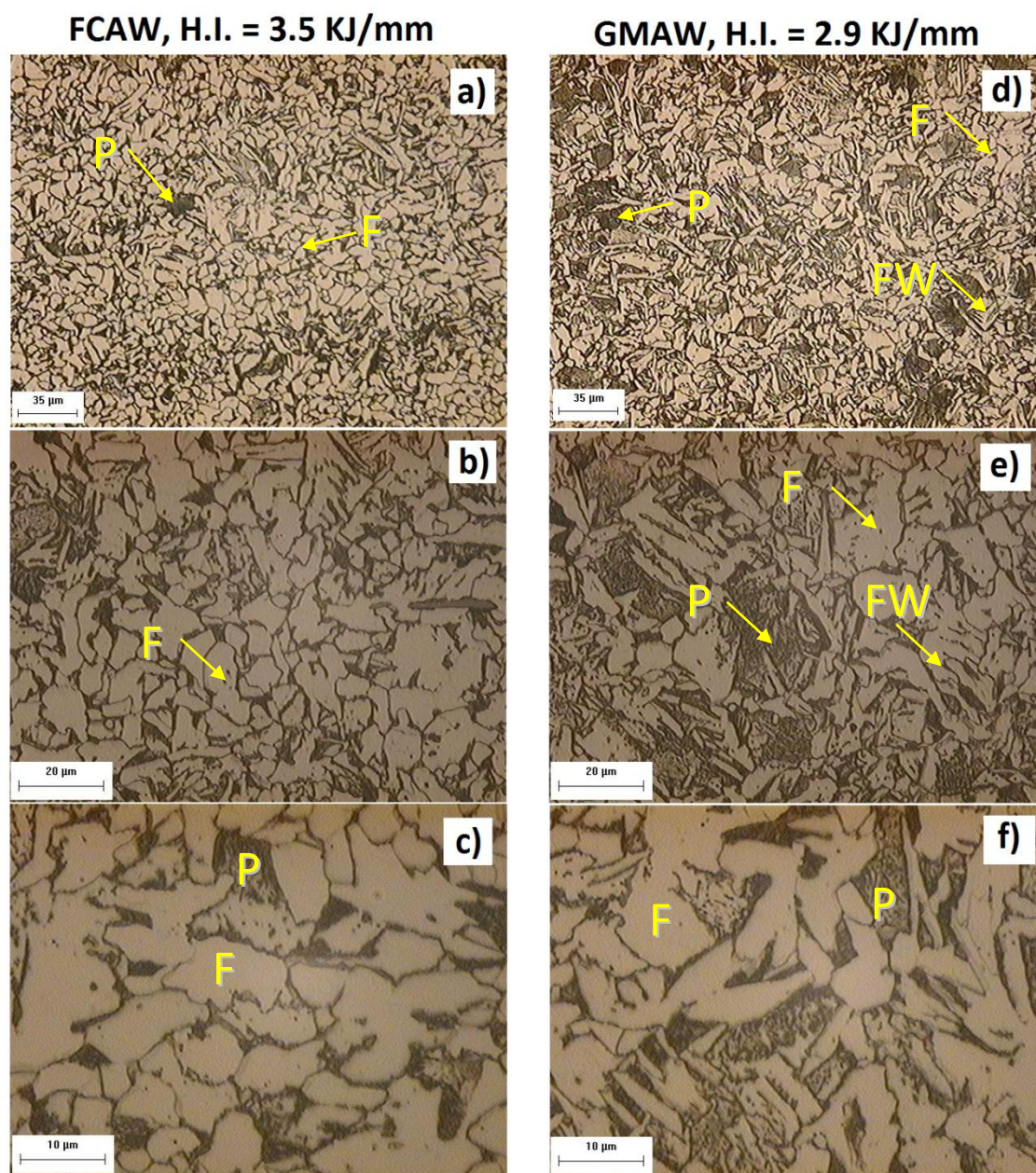


Figura 4.14. Micrografías a diferentes magnificaciones (200, 500 y 1000 X) de la región de la ZAC que fue calentada a una temperatura intercrítica. a-c) Proceso FCAW, d-e) Proceso GMAW. Ferrita (F), perlita (P), ferrita Widmanstätten (FW).

La diferencia es similar a la de la región anterior, en las micrografías se aprecian granos más refinados con el proceso FCAW por la mayor entrada de calor que en el proceso GMAW. Se observan granos equiaxiales de ferrita con granos refinados en comparación con el metal base, esto por la temperatura intercrítica a la que fue calentada durante el proceso de soldadura.

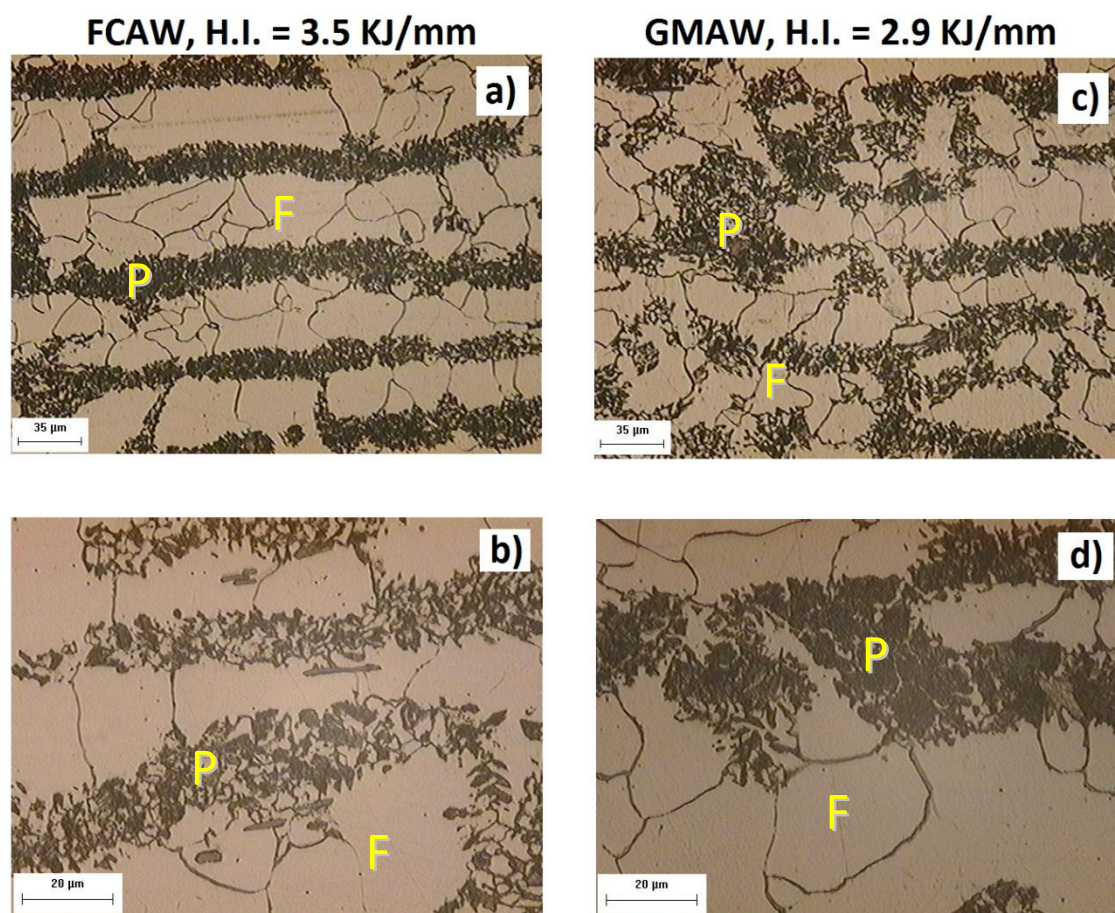


Figura 4.15. Micrografías a diferentes magnificaciones (200 y 500 X) de la región de la ZAC que fue calentada a una temperatura subcrítica. a-b) Proceso FCAW, c-d) Proceso GMAW. Ferrita (F), perlita (P).

En la región de la ZAC que fue calentada a una temperatura subcrítica ($<A_{c1}$), se observa que se conserva la microestructura de ferrita y perlita del metal base, la diferencia radica en que la entrada de calor activó los mecanismos de difusión que llevan a la segregación de la cementita como se visualiza en las micrografías.

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran imágenes del estereoscopio donde se midió el ancho de la ZAC en ambas uniones, así como el espesor del metal de soldadura austenizado por el recalentamiento de los cordones posteriores. Cabe mencionar que la ductilidad del metal de soldadura depende de la profundidad de esta región.

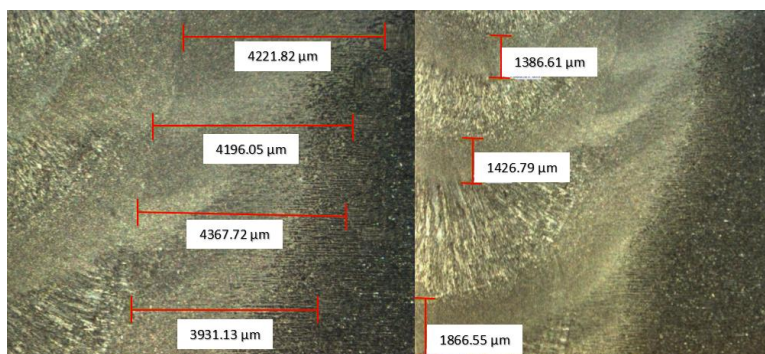


Figura 4.16. Unión soldada por el proceso FCAW, H.I. = 3.5 KJ/mm. Medición del ancho de la ZAC y de la profundidad del metal de soldadura recristalizado.

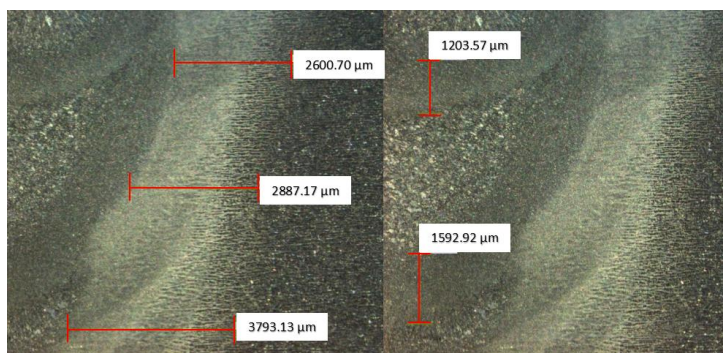


Figura 4.17. Unión soldada por el proceso GMAW, H.I. = 2.9 KJ/mm. Medición del ancho de la ZAC y de la profundidad del metal de soldadura recristalizado.

El promedio de la longitud de la ZAC con el proceso FCAW fue de 4180 μm y con el proceso GMAW, 3094 μm . Respecto a la profundidad del metal de soldadura recristalizado entre cordones, se tiene un promedio de 1560 μm para el proceso FCAW y 1398 μm para el proceso GMAW. Realmente no existe una gran diferencia en estos valores de un proceso a otro, pero es evidente que son ligeramente mayores con el proceso que mayor aporte de calor suministra en la unión.

- **Microdureza**

Las diferentes regiones de la ZAC pueden tener diferentes grados de dureza, dependiendo de la composición química del material base y la entrada de calor en la soldadura entre otros factores. Las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 muestran los perfiles de dureza obtenidos a diferentes espesores de la unión soldada, analizando desde la zona de metal de soldadura hasta el metal base.

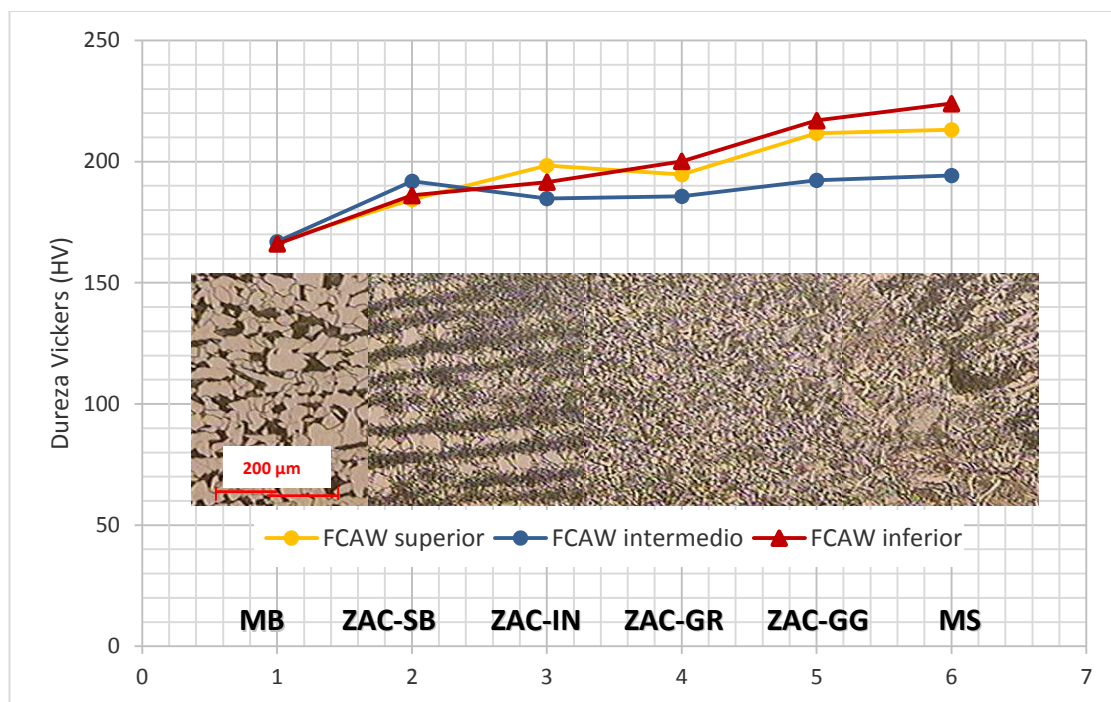


Figura 4.18. Variación de la microdureza Vickers en las diferentes zonas y a diferentes profundidades de la unión soldada por el proceso FCAW.

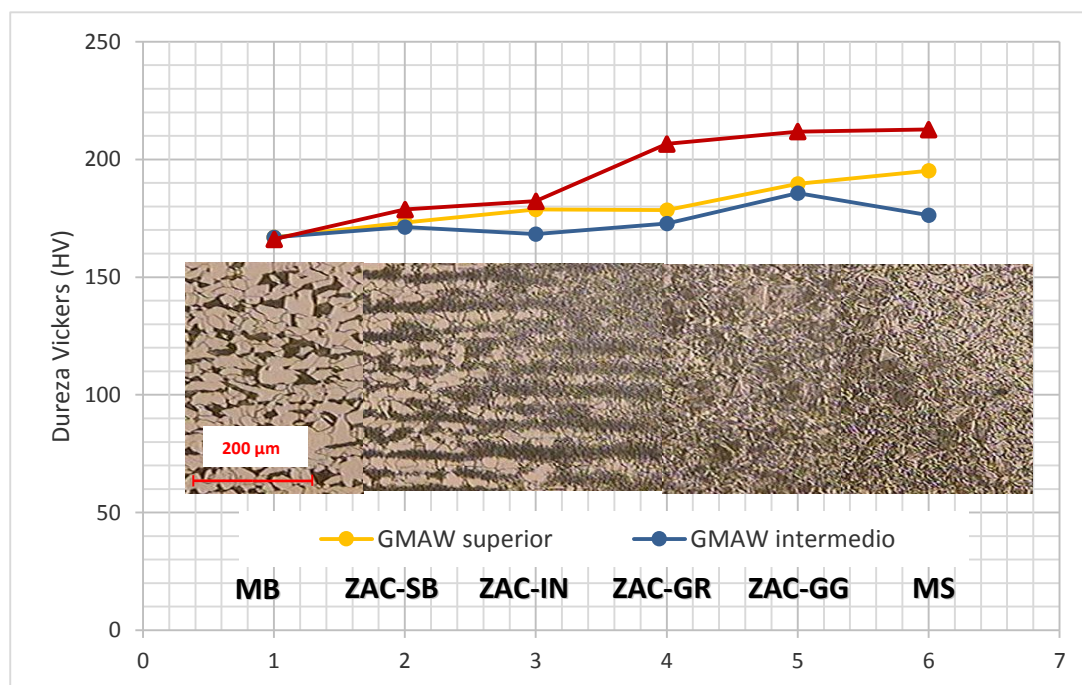


Figura 4.19. Variación de la microdureza Vickers en las diferentes zonas y a diferentes profundidades de la unión soldada por el proceso GMAW.

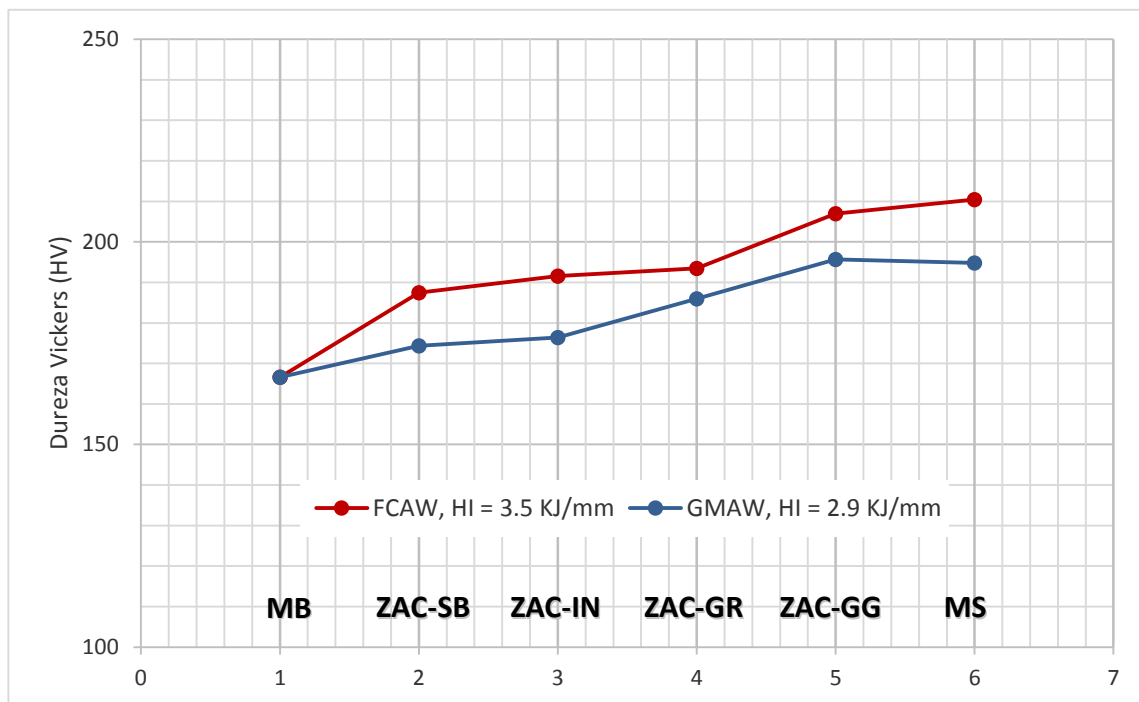


Figura 4.20. Variación de la microdureza Vickers en las diferentes zonas de las uniones soldadas. La gráfica representa el promedio de las indentaciones en cada zona.

Se puede visualizar que la distribución de dureza es uniforme y decreciente desde el metal de soldadura al metal base. La zona de mayor dureza se encuentra en la parte inferior de la sección transversal de la unión, seguido por la parte superior, las menores durezas se obtuvieron en la parte intermedia de la unión por estar sujeta a velocidades de enfriamiento menores.

La máxima dureza oscila en 210 HV, siendo la unión elaborada con el proceso FCAW que presentó las mayores durezas, lo anterior por la mayor entrada de calor. La región de la ZAC que presentó mayor dureza fue la de grano grueso.

Haciendo referencia al metal de soldadura recristalizado existe una notable diferencia en términos de dureza con el metal de soldadura. En el proceso FCAW se obtuvo una dureza promedio del metal de soldadura

recristalizado de 191 HV, mientras que con el proceso GMAW se obtuvo 166 HV.

- **Tensión**

De acuerdo a los requerimientos del código AWS D14.3 se ensayaron dos probetas por unión, la figura 4.21 se muestran las probetas ensayadas y su zona de fractura. Las probetas del proceso FCAW, se identificaron como F1 y F2, mientras que para el proceso GMAW, se identificaron como G1 y G2. En la tabla 4.6 del resumen del análisis comparativo se presentan los valores de esfuerzos máximo promedio de cada proceso. En el apéndice B se incluyeron las gráficas fuerza-deformación de los 4 ensayos de tensión.

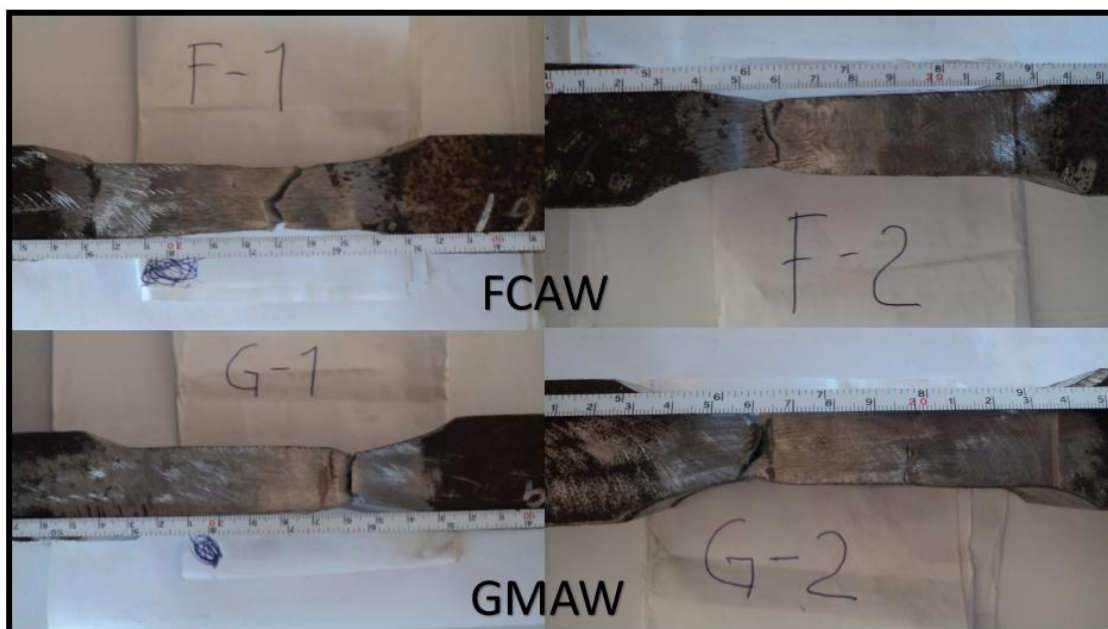


Figura 4.21. Probetas del ensayo de tensión. Se ilustra la zona de fractura.

Tabla 4.6. Resumen del análisis comparativo de los procesos GMAW y FCAW.

FCAW				GMAW					
Composición química en la zona de fusión									
C	Mn	Si	Cu	C	Mn	Si	Cu		
0.07	1.44	0.36	0.03	0.12	1.20	0.42	0.12		
Microestructuras									
MS		ZAC		MS		ZAC			
FI, FA, Fac y FW		FW, FI, Fb y P		FI, FA, Fac y FW		FW, FI, Fb y P			
Microdureza (HV)									
MS	ZAC				MS	ZAC			
	GG	GR	IN	SUB		GG	GR	IN	SB
210	207	193	192	187	195	196	186	176	172
Resistencia última a la tensión (MPa)									
Zona de fractura		Esfuerzo máximo (MPa)		Zona de fractura		Esfuerzo máximo (MPa)			
ZAC		520		Metal base		527			
Longitud de la ZAC (µm)									
4180				3094					
Profundidad del metal de soldadura recristalizado (µm)									
1560				1398					

FI: Ferrita idiomórfica
 FA: Ferrita alotriomórfica
 Fca: Ferrita acicular
 FW: Ferrita Widmanstätten
 Fb: Ferrita bainítica
 P: Perlita
 MS: Metal de soldadura
 ZAC: Zona afectada por el calor
 GG: Grano grueso
 GR: Grano refinado
 IN: Región intercrítica
 SUB: Región subcrítica

CONCLUSIONES

- De acuerdo al análisis químico efectuado en las uniones se determina que tanto el metal base como el metal de soldadura son aceros de baja aleación al C-Mn. La adición de Mn promueve la nucleación de ferrita acicular a expensas de la ferrita alotriomórfica en la zona de fusión.
- La entrada de calor fue mayor con el proceso FCAW debido a los mayores valores de corriente y voltaje utilizados, pues con este proceso se utilizó un diámetro de electrodo de 2.4 mm y con el proceso GMAW un diámetro de 1.3 mm.
- Se identificaron cuatro regiones en la ZAC, en las cuales se observaron zonas de ferrita Widmanstätten, ferrita acicular y ferrita bainítica.
- La longitud de la ZAC fue ligeramente mayor en la unión con el proceso FCAW con 4180 μm , contra 3094 μm en el proceso GMAW. De igual forma el espesor del metal de soldadura recristalizado fue mayor en el proceso FCAW.
- Los perfiles de durezas para ambos procesos presentaron el mismo comportamiento, es decir, decreciente desde el metal de soldadura hasta el metal base. Los anterior está directamente relacionado con la velocidad

de enfriamiento, la cual es mayor en la interfase entre el metal se soldadura y el metal base por lo que aquí se presentan la región de grano grueso con microestructuras de ferrita Widmanstätten y ferrita bainítica.

- Las mayores durezas se observaron en la parte inferior de la sección transversal de la unión (soldadura de raíz), siendo la unión elaborada con el proceso FCAW quien presentó valores mayores. Lo anterior por un enfriamiento más rápido generado por el contacto de esta zona con la intemperie.
- La mayor dureza fue de 210 HV en la zona de fusión por las fases presentes de ferrita Widmanstätten y ferrita acicular.
- Las probetas del proceso GMAW fracturaron en el metal base, mientras que las probetas del proceso FCAW fallaron en la ZAC, en la región de grano grueso debido a la mayor fragilidad que se obtuvo en esta zona; lo anterior confirma la mayor resistencia de la soldadura en ambos procesos.
- La mayor resistencia a la tensión se obtuvo con el proceso GMAW con un esfuerzo máximo promedio de 527 MPa en comparación con los 520 MPa del proceso FCAW.
- La diferencia en microestructuras, microdurezas y de resistencia a la tensión no fueron relevantes en ambas uniones, lo que hace factible llevar a cabo la unión soldada con el proceso GMAW con los parámetros propuestos.

BIBLIOGRAFÍA

1. **American Society for Metal.** *Properties and Selection: Irons, Steel and High-Performance Alloys.* Ohio : ASM handbook committee, 1990. págs. 211, 233, 397, 657, 682. Vol. 1.
2. **Illescas Fernández, Silva.** *Estudio del efecto de los elementos microaleantes en un acero HSLA.* Cataluña, España : Universidad de Catalunya, 2007. págs. 13-17, 20-27.
3. **Antiquera, Julio.** *Aceros de alta resistencia.* Colombia : s.n., 2008. págs. 14, 16-17.
4. **Groover, Mikell P.** *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas.* 1ra. D.F : Pearson. Prentice Hall, 1997. págs. 124-126.
5. **Angarita C, Moewis P, Sáenz L.** *Evaluación del comportamiento mecánico de un acero microaleado X-60 laminado en frío y sometido a un tratamiento térmico de recocido.* Valencia, Venezuela : Universidad de Carabobo, 2003. págs. 28-29. Vol. 10. 1316-6832.
6. **Vázquez Meza, Salvador.** *Soldabilidad de los aceros HSLA termogalvanizados para aplicaciones automotrices.* San Nicolás de los Garzas : UANL, 2004. págs. 3-8.
7. **Martínez Nieto, José Alberto.** *Soldabilidad de aceros HSLA termogalvanizados.* San Nicolás de los Garza : UANL, 2003. pág. 2.
8. **Callister, William D.** *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.* Madrid : Reverté, 2007. pág. 366. Vol. 1.
9. **Solá, Pere Molera.** *Soldadura Industrial: clases y aplicaciones.* Barcelona : Marcombo, 1992. págs. 9-10.
10. **American Society for Metals.** *Welding Brazing and Soldering.* Ohio : ASM handbook committee, 1990. págs. 206-210, 242, 1088-1089. Vol. 6.
11. **The steels specialist. Phione limited.** . <http://www.spanish.phione.co.uk>.
12. **AWS.** *Welding Inspection Technology.* Miami : American Welding Society, 2008. págs. 3-4.

13. —. *Welding Handbook*. Novena. Miami : American Welding Society, 2004. págs. 148-156, 171-175, 178-197. Vol. 2.
14. **Horwitz, Henry**. *Soldadura. Aplicaciones y práctica*. México, DF : Alfaomega, 1997. pág. 108.
15. **Jeffus, Larry**. *Soldadura. Principios y aplicaciones*. 5ta. Madrid : Paraninfo S. A., 2004. pág. 219.
16. **Hernández Riesco, Germán**. *Manual del soldador*. Madrid : CESOL, 2006. págs. 306-309. 9788493431617.
17. **S. Mukhopadhyay, T. K. Pal**. *Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires*. Calcuta : Welding Technology Centre. Universidad de Jadavpur, 2006. DOI 10.1007/s00170-005-2520-7.
18. **R. Simoneau, D. Thibault, J. L. Fihey**. *A comparisson of residual stress in hammer-peened, multipass steels welds - A514 (S690Q) and S41500*. Montreal : Welding in the world, 2009. Vol. 53. IIW-1942-08.
19. **R. González, J. C. Suárez, F. J. Vicario, A. Muñoz**. *Procesos metalúrgicos de aceros microaleados de alta resistencia 450 EMZ tipo II en I zona afectada térmicamente debido al efecto multipasada en soldadura por arco sumergido*. Madrid : Revista metalúrgica, 2006. 0034-8570.
20. **M. Zalazar, H. J. Quesada, E. P. Asta**. *Microestructuras producidas en la soldadura de unión de aceros para tubería de gran diámetro*. Madrid : Consejo superior de investigaciones científicas, 1998.
21. **Keshav Prasad, D. K. Dwivedi**. *Some investigations on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints*. Rookee : Indian Institute of Technology Rookee., 2006. 475-483.
22. **W. W. Bose-Filho, A. L. M. Carvalho, M. Strangwood**. *Effect of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds*. s.l. : EESC-USP, Brasil; Univerisdad de Birmingham , 2006. 1044-5803.
23. **Pérez Medina, Gladys Yerania** . *Soldabilidad y mecansmos de transformaciones de fase en uniones de aceros avanzados de alta resistencia Martensíticos y TRIP por los procesos láser y FSW*. Monterrey : Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, 2012.
24. **AWS**. *AWS D1.1/D1.1M:2010 Structural Welding Code*. 22. Miami : AWS, 2010. págs. 321-325.
25. —. *AWS D14.3/D14.3M:2005 Specification for welding earthmoving, construction, agricultural equipment*. 5. Miami : AWS, 2005.
26. —. *AWS A5.18/A5.18M:2001 Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding*. Miami : AWS, 2001.

27. —. *AWS A5.20 Specification for carbon steel electrodes for flux cored arc welding*. Miami : AWS, 1995.
28. **Lincoln, electric**. *Welding consumables catalog*. Ohio : Lincoln Electric, 2012.
29. **ASTM**. *ASTM E384 - 11 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*. Philadelphia : ASTM, 2011.
30. —. *ASTM E8 / E8M - 11 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Philadelphia : ASTM, 2011.

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Límites y rangos de composición para aceros HSLA (1).</i>	9
<i>Tabla 2.2. Características mecánicas de material laminado en caliente de aceros HSLA (8).</i>	11
<i>Tabla 2.3. Aplicaciones de aceros HSLA descritos en las especificaciones ASTM (1).</i>	14
<i>Tabla 2.4. Composición química de un acero A 572 (11).</i>	20
<i>Tabla 2.5. Propiedades mecánicas de un acero A 572 (11).</i>	20
<i>Tabla 2.6. Velocidades de depósito con soldadura GMAW (15).</i>	23
<i>Tabla 2.7. Parámetros de operación de los tipos de transferencias (16).</i>	24
<i>Tabla 2.8. Características de las mezclas de gases empleadas en el proceso GMAW (13).</i>	25
<i>Tabla 2.9. Variables del proceso de soldadura GMAW (13).</i>	26
<i>Tabla 2.10. Discontinuidades, causas y acciones correctivas (13).</i>	27
<i>Tabla 2.11. Características del metal de soldadura (17).</i>	29
<i>Tabla 2.12. Parámetros de soldadura empleados en las investigaciones y la propuesta para el caso de estudio.</i>	30
<i>Tabla 2.13. Elementos comunes en el núcleo de los electrodos del proceso FCAW (13).</i>	33
<i>Tabla 2.14. Variables del proceso de soldadura FCAW (13).</i>	34
<i>Tabla 2.15. Problemas y defectos comunes en el proceso FCAW (13).</i>	35
<i>Tabla 4.1. Parámetros de soldadura empleados en la elaboración del cupón de soldadura por el proceso FCAW.</i>	54
<i>Tabla 4.2. Parámetros de soldadura empleados en la elaboración del cupón de soldadura por el proceso GMAW.</i>	54
<i>Tabla 4.3. Composición química del metal base (espectrometría de chispa), % e. p.</i>	56
<i>Tabla 4.4. Composición química de los metales de aporte según el proveedor. Por una parte se describe la composición química especificada en la norma y la composición como metal depositado, % e. p.</i>	56
<i>Tabla 4.5. Composición química del metal de soldadura depositado con ambos procesos; % e. p.</i>	59
<i>Tabla 4.6. Resumen del análisis comparativo de los procesos GMAW y FCAW.</i>	73

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Proceso de soldadura por arco GMAW (15).</i>	21
<i>Figura 2.2. a) Proceso FCAW autoprotegido, b) proceso FCAW con gas de protección externo (13).</i>	31
<i>Figura 2.3. a) Posición de las subregiones en relación al metal base y el metal de soldadura. b) Gráfico de los ciclos térmicos en relación a las líneas AC1 y AC3. c) Microestructuras de las diferentes zonas. El término FL se refiere a la línea de fusión (10).</i>	37
<i>Figura 2.4. Región primaria (P) y reaustenizada en el metal de soldadura de las uniones de multipasadas (10).</i>	38
<i>Figura 2.5. Efecto del tamaño del electrodo sobre la cantidad de metal de soldadura recristalizado en soldadura de múltiples pases. a) sección transversal como función del diámetro del electrodo; las áreas blancas representan el metal de soldadura recristalizado, b) representación gráfica (10).</i>	40
<i>Figura 2.6. Ferrita de Segunda Fase (FS). Ferrita Widmanstätten (WF) (23).</i>	43
<i>Figura 2.7. Ferrita acicular (23).</i>	43
<i>Figura 2.8. Crecimiento de la bainita.</i>	45
<i>Figura 2.9. Esquema de trayectoria de transición de bainita superior e inferior (23).</i>	45
<i>Figura 2.10. Bainita superior en aceros medio carbono (13000 X, Metals Society). (b) esquema del mecanismo de crecimiento. Placas de cementita que nuclea en austenita enriquecida de carbono. (c) ilustración morfológica de un listón (23).</i>	46
<i>Figura 4.1. Metodología empleada en el análisis comparativo de los procesos FCAW y GMAW en aceros HSLA en uniones de grandes espesores.</i>	52
<i>Figura 4.2. Sección transversal de la unión soldada de la placa y el cilindro de suspensión.</i>	52
<i>Figura 4.3. Configuración de la unión soldada propuesta.</i>	53
<i>Figura 4.4. Cupón de soldadura. Esta misma configuración se usó tanto el proceso FCAW como en el GMAW.</i>	53
<i>Figura 4.5. Sección transversal de las uniones terminadas, seccionamiento e identificación de las probetas. a) Proceso GMAW, b) Proceso FCAW.</i>	55
<i>Figura 4.6. Zonas indentadas en la unión soldada. 1.- MS, 2.- ZAC GG, 3.- ZAC GR, 4.- ZAC intercrítica, 5.- ZAC subcrítica, 6.- MB.</i>	58

<i>Figura 4.7. Regiones de interés en la unión soldada a) proceso FCAW, 3.5 KJ/mm, b) proceso GMAW, 2.9 KJ/mm. Se puede apreciar las cuatro regiones de la ZAC, así como la morfología de la microestructura del MB y el MS.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.8. Regiones en la ZAC. Proceso de soldadura FCAW, H.I. = 3.5 KJ/mm.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.9. Regiones en la ZAC. Proceso de soldadura GMAW, H.I. = 2.9 KJ/mm.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.10. Microestructura del metal base ASTM A572. a-b) Micrografías con microscopio óptico, 50 y 200 X c) Micrografía con MEB, 5000 X.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.11. Micrografías a diferentes magnificaciones del metal de soldadura. a-c) Proceso FCAW, d-e) Proceso GMAW. a-b, d-e) Micrografías ópticas, 100, 200 y 500 X. Ferrita idiomórfica (FI), ferrita Widmanstätten (FW), ferrita acicular (Fac), ferrita alotriomórfica (FA).</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.12. Micrografías a diferentes magnificaciones (200, 500 y 1000 X) de la región de grano grueso de la ZAC. a-c) Proceso FCAW, d-e) Proceso GMAW. Ferrita bainítica (Fb), ferrita Widmanstätten (FW), ferrita idiomórfica (FI).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.13. Micrografías a diferentes magnificaciones (200, 500 y 1000 X) de la región de crecimiento de grano de la ZAC. a-c) Proceso FCAW, d-e) Proceso GMAW. Ferrita bainítica (Fb), ferrita Widmanstätten (FW), ferrita idiomórfica (FI).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.14. Micrografías a diferentes magnificaciones (200, 500 y 1000 X) de la región de la ZAC que fue calentada a una temperatura intercrítica. a-c) Proceso FCAW, d-e) Proceso GMAW. Ferrita (F), perlita (P), ferrita Widmanstätten (FW).</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.15. Micrografías a diferentes magnificaciones (200 y 500 X) de la región de la ZAC que fue calentada a una temperatura subcrítica. a-b) Proceso FCAW, c-d) Proceso GMAW. Ferrita (F), perlita (P).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.16. Unión soldada por el proceso FCAW, H.I. = 3.5 KJ/mm. Medición del ancho de la ZAC y de la profundidad del metal de soldadura recristalizado.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.17. Unión soldada por el proceso GMAW, H.I. = 2.9 KJ/mm. Medición del ancho de la ZAC y de la profundidad del metal de soldadura recristalizado.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.18. Variación de la microdureza Vickers en las diferentes zonas y a diferentes profundidades de la unión soldada por el proceso FCAW.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.19. Variación de la microdureza Vickers en las diferentes zonas y a diferentes profundidades de la unión soldada por el proceso GMAW.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.20. Variación de la microdureza Vickers en las diferentes zonas de las uniones soldadas. La gráfica representa el promedio de las indentaciones en cada zona.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.21. Probetas del ensayo de tensión. Se ilustra la zona de fractura.</i>	<i>72</i>

APÉNDICE A

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) AWS D1.1:2010 (Structural Welding Code)
ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D1.1:2010 (Structural Welding Code)

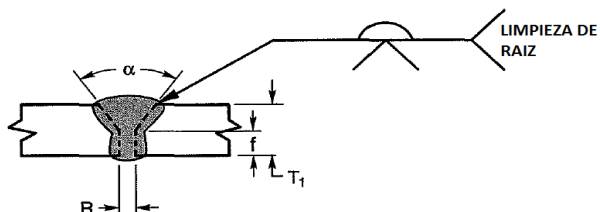
Welding Procedure Specification Especificación de Procedimiento de soldadura	Rev. _____	Date Fecha 12-ago-13
Supporting PQR Soportando PQR _____	Welding Process/ Proceso de soldadura GMAW	Type/ Tipo Semiautomática

JOINT DESIGN / DISEÑO DE JUNTA Type / Tipo Unión a tope con soldadura de ranura en V <input type="checkbox"/> Single / Sencilla <input checked="" type="checkbox"/> Double / Doble <input type="checkbox"/> Backing / Respaldo Yes / Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Backing Material / Material de Respaldo N/A Root Opening / Abertura de la raíz 3 mm Root Face Dimension / Dimensión de la cara de raíz 3 mm Groove Angle / Ángulo de la ranura 45° Radious/ Radio N/A Back Gouging / Saneado de raíz Yes / Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Method/ Método Arco aire	POSITION/ POSICIÓN Groove/ Ranura 1G y 2G Fillet / Filete N/A Vertical Progression / Progresion Vertical Up/ Ascendente <input type="checkbox"/> Down / descendente <input type="checkbox"/>
FILLER METALS / MATERIAL DE APORTE AWS Specification/ Especificación A 5.18 AWS Classification/ Clas. AWS ER70S-3 A.No. N/A F. No. 6 Consumable insert/ Inserto Consumible N/A Diam. De electrodo o alambre / diameter of the electrode 1.3 mm	

SHIELDING / PROTECCIÓN Gas: Argón - CO ₂ Composition/ Composición 90 - 10 % Flow Rate/ Velocidad de flujo 50 ± 5 CFH Gas Cup Size/ Tamaño de boquilla 3/4" Flux/ Fundente N/A Electrode- Flux (Class)/ Clase de fundente N/A Gas de protección/Protection Gas : N/A	BASE METAL / METAL BASE Material Spec, type or grade/ Especificación del material/ tipo o grado ASTM A 572 G50 Group No / Grupo No. 1 to/ a Group No / Grupo No. 1 Thickness Range/ Rangos de Espesor Groove / Ranura 3 mm - ilimitado Fillet / Filete ilimitado Diameter (pipe)/ Diámetro (Tubería) ilimitado para soldaduras PJP
PREHEAT / PRECALENTAMIENTO Preheat Temp / Temp de precalentamiento: Min 65 °C / 150 F Temp de Interpaso, Min 65 °C / 150 F 200 °C / 390 F Max	

TECHNIQUE / TECNICA Stringer or Weave / Recta u oscilante Recta Multi-pass or single / Pasos multiples o sencillo pasos múltiples Number of electrode/ Número de Electrodo 1 Electrode Spacing / Espacio en electrodos N/A Contact Tube to work distance/ Distancia entre boquilla y pieza 20 mm Peening/ Martillado N/A Initial and Interpass cleaning/ Limpieza inicial y entre pasos Cincel y carda Others/ otros N/A	ELECTRICAL CHARACTERISTICS/ CARACTERISTICAS ELECTRICAS Transfer Mode (GMAW) / Modo de transferencia (GMAW) Short Circuit/ Corto Circuito <input type="checkbox"/> Globular <input type="checkbox"/> Spray <input checked="" type="checkbox"/> Current / Corriente AC <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/> Pulsed/ Pulsada <input type="checkbox"/> Tungsten Electrode/ Electrodo de Tungsteno (GTAW) N/A Size/ Tamaño N/A Type/ Tipo N/A
---	---

POSTWELD HEAT TREATMENT / TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA Temp N/A Time / Tiempo N/A	Preheat / Precalentamiento Nota: Cuando el Material Base esta a una temperatura por de bajo de 0°C el material debera ser precalentado a una temperatura minima de 20°C y debera mantenerse como temperatura minima durante la soldadura
--	--



Medidas	Tolerancias
f = 3 mm	+2, -0 mm
α = 45°	+5°, -0 mm
R = 3 mm	+2, -0 mm
T ₁ = 50 mm	+5, -0 mm

Nota: Todas las superficies del bisel deberan encontrarse libres de oxido, grasa, suciedad humedad u otra discontinuidad que pueda originar posterior defecto

Pass or weld Layer (s) / Pases	Process/ Proceso	Filler Metals / Aporte		Current / Corriente		Volts	Tempo de arco (min)	Travel Speed/ Vel. de Avance (mm/min)
		Class/ Clase	Diam. (mm)	Type and polarity/ Tipo y Polaridad	Amps or wire feed speed / Amps o velocidad de alimentación alambre			
1	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	8.3 m/min	27.00	2.00	190.50
2	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.40	272.14
3	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.77	215.25
4	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	2.00	190.50
5	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	2.48	153.63
6	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	2.93	130.03
7	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.28	297.66
8	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.50	254.00
9	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.50	254.00
10	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.75	217.71
11	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.82	209.34
12	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.77	215.25
13	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.00	381.00
14	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.38	276.09
15	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.38	276.09
16	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.35	282.22
17	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.32	288.64
18	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.75	217.71
19	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.45	262.76
20	GMAW	ER70S-3	1.3	CDEP	10.0 m/min	31.30	1.47	259.18

Prepared by / Preparado por: Alejandro Bernal

Date / Fecha : 22/05/2013

Approved by / Aprobado por: Ingeniero Lázaro Magaña Martínez

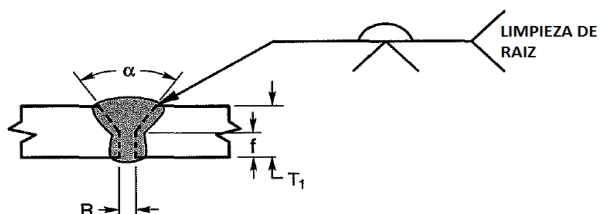
Authorized by / Autorizado por: Ingeniero Macario Pérez Sosa

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS) AWS D1.1:2010 (Structural Welding Code)

ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA AWS D1.1:2010 (Structural Welding Code)

Welding Procedure Specification Especificación de Procedimiento de soldadura		Rev. _____	Date Fecha 12-ago-13
Supporting PQR Soportando PQR _____	Welding Process/ Proceso de soldadura	FCAW	Type/ Tipo Semiautomática

JOINT DESIGN / DISEÑO DE JUNTA Type / Tipo Unión a tope con soldadura de ranura en V <input type="checkbox"/> Single / Sencilla <input checked="" type="checkbox"/> Double / Doble <input type="checkbox"/> Backing / Respaldo Yes / Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Backing Material / Material de Respaldo N/A Root Opening / Abertura de la raíz 3 mm Root Face Dimension / Dimensión de la cara de raíz 3 mm Groove Angle / Ángulo de la ranura 45 ° Radious/ Radio N/A Back Gouging / Saneado de raíz Yes / Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Method/ Método Arco aire		POSITION/ POSICIÓN Groove/ Ranura 1G y 2G Fillet / Filete N/A Vertical Progression / Progresion Vertical Up/ Ascendente <input type="checkbox"/> Down / descendente <input type="checkbox"/>
SHIELDING / PROTECCIÓN Gas: CO ₂ Composition/ Composición 100% Flow Rate/ Velocidad de flujo 45 ± 5 CFH Gas Cup Size/ Tamaño de boquilla 3/4" Flux/ Fundente N/A Electrode- Flux (Class)/ Clase de fundente N/A Gas de proteccion/ProtectionGas : N/A		FILLER METALS / MATERIAL DE APORTE AWS Specification/ Especificación A 5.20 AWS Classification/ Clas. AWS E70T-5C-JH4 A.No. N/A F. No. 6 Consumable insert/ Inserto Consumible N/A Diam. De electrodo o alambre / diameter of the electrode 2.4 mm
PREHEAT / PRECALENTAMIENTO Preheat Temp / Temp de precalentamiento: Min 65 °C / 150 F Temp de Interpaso, Min 65 °C / 150 F 200 °C / 390 F Max		BASE METAL / METAL BASE Material Spec, type or grade/ Especificación del material/ tipo o grado ASTM A 572 G50 Group No / Grupo No. 1 to/ a Group No / Grupo No. 1 Thickness Range/ Rangos de Espesor Groove / Ranura 3 mm - ilimitado Fillet / Filete ilimitado Diameter (pipe)/ Diámetro (Tubería) ilimitado para soldaduras PJP
TECHNIQUE / TECNICA Stringer or Weave / Recta u oscilante Recta Multi-pass or single /Pasos múltiples o sencillo pasos múltiples Number of electrode/ Número de Electrodo 1 Electrode Spacing / Espacio en electrodos N/A Contact Tube to work distance/ Distancia entre boquilla y pieza 20 mm Peening/ Martillado N/A Initial and Interpass cleaning/ Limpieza inicial y entre pasos Cincel y carda Others/ otros N/A		ELECTRICAL CHARACTERISTICS/ CARACTERISTICAS ELECTRICAS Transfer Mode (GMAW) / Modo de transferencia (GMAW) Short Circuit/ Corto Circuito <input type="checkbox"/> Globular <input type="checkbox"/> Spray / Rocío <input type="checkbox"/> Current / Corriente AC <input type="checkbox"/> DCEP <input checked="" type="checkbox"/> DCEN <input type="checkbox"/> Pulsed/ Pulsada <input type="checkbox"/> Tungsten Electrode/ Electrodo de Tungsteno (GTAW) N/A Size/ Tamaño N/A Type/ Tipo N/A
POSTWELD HEAT TREATMENT / TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA Temp N/A Time / Tiempo N/A	Preheat / Precalentamiento Nota: Cuando el Material Base esta a una temperatura por de bajo de 0°C el material debera ser precalentado a una temperatura minima de 20°C y debera mantenerse como temperatura minima durante la soldadura	



Medidas	Tolerancias
f = 3 mm	+2, -0 mm
$\alpha = 45^\circ$	+5°, -0 mm
R = 3 mm	+2, -0 mm
T ₁ = 50 mm	+5, -0 mm

Nota: Todas las superficies del bisel deberan encontrarse libres de oxido, grasa, suciedad humedad u otra discontinuidad que pueda originar posterior defecto

Pass or weld Layer (s) / Pasos	Process/ Proceso	Filler Metals / Aporte		Current / Corriente		Volts	Tempo de arco (min)	Travel Speed/ Vel. de Avance (mm/min)
		Class/ Clase	Diam. (mm)	Type and polarity/ Tipo y Polaridad	Amps or wire feed speed / Amps o velocidad de alimentación alambre			
1	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	4.6 m/min	30.00	2.00	190.50
2	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.25	304.80
3	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.53	249.02
4	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.55	245.81
5	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.67	228.14
6	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.78	488.46
7	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.72	529.17
8	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.40	272.14
9	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.70	544.29
10	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.80	476.25
11	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.37	278.10
12	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.80	476.25
13	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.72	529.17
14	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.38	276.09
15	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.38	276.09
16	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.75	508.00
17	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.68	560.29
18	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.77	494.81
19	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.67	568.66
20	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.10	346.36
21	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.83	459.04
22	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.72	529.17
23	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	0.93	409.68
24	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	1.43	266.43
25	FCAW	E70T-5C-JH4	2.4	CDEP	6.3 m/min	35.00	2.13	178.87

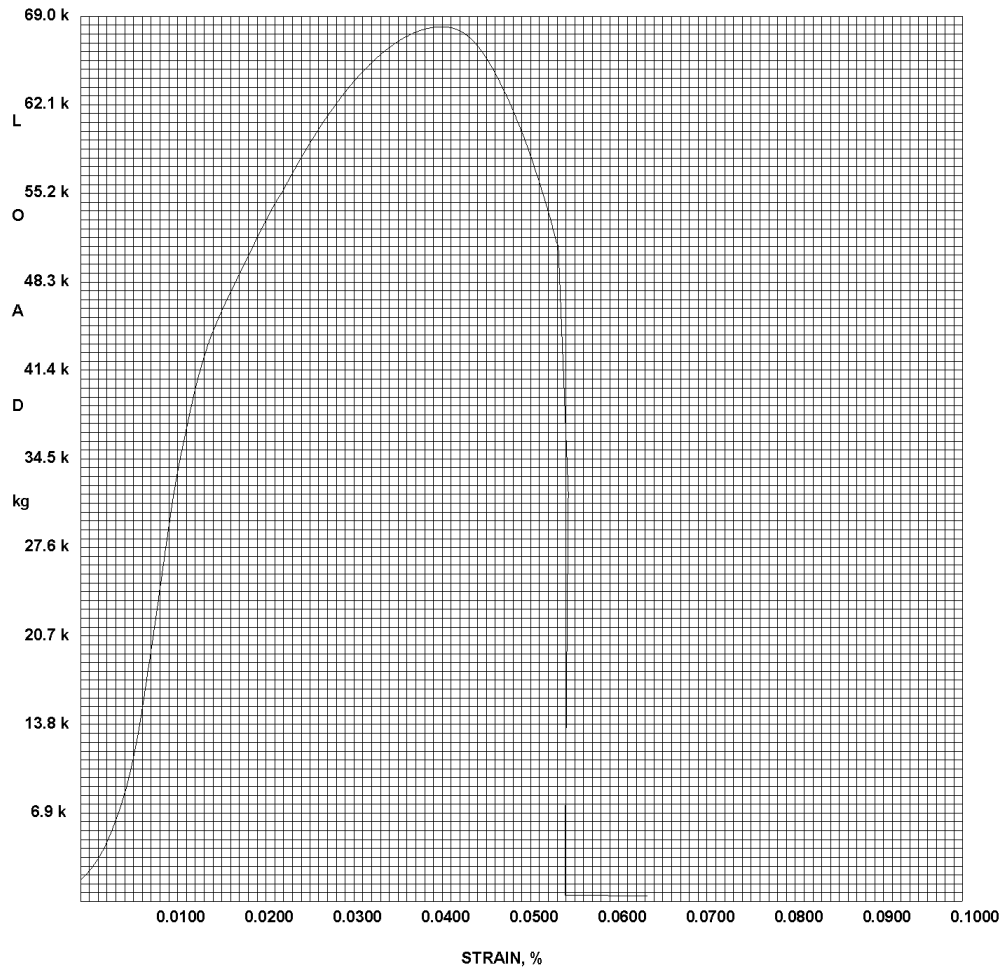
Prepared by / Preparado por: Armando Raúl Martínez

Date / Fecha : 22/05/2013

Approved by / Aprobado por: Ingeniero Lázaro Magaña Martínez

Authorized by / Autorizado por: Ingeniero Macario Pérez Sosa

APÉNDICE B



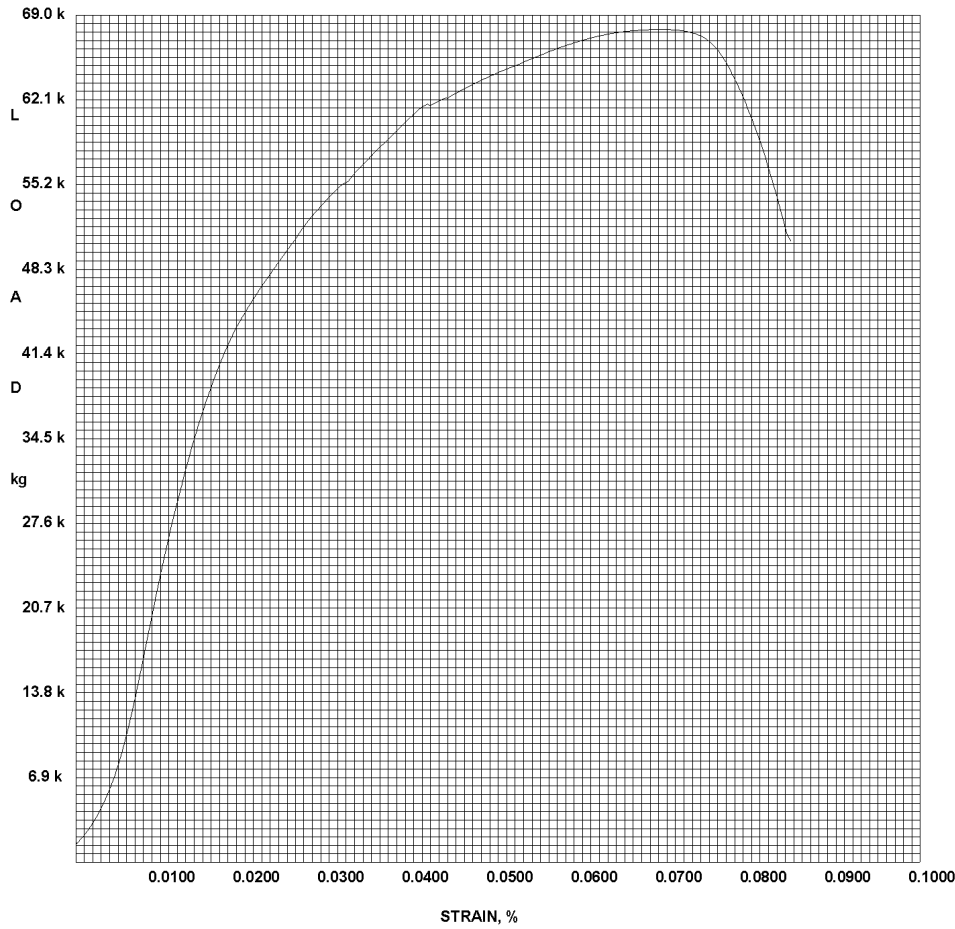
Corporación Mexicana de Investigación en
Materiales S.A. de C.V.
Subgerencia de Laboratorios
Laboratorio de Pruebas Mecánicas

ENSAYO DE TENSIÓN EN SOLDADURA

CLIENTE	POSGRADO
MATERIAL	ACERO/SOLDADURA
EQUIPO UTILIZADO	Tinius Olsen 100 Ton
IDENTIFICACION	ASTM G1

REGISTRO	13PM0459
Nº DE PROBETA	T1
NORMA UTILIZADA	ASTM-E8/E8M-11
CODIGO/EST.	AWS D 14.3
SOLDADURA	
PM-IFT/13-	211

Espesor, mm:	49.52
Ancho, mm:	25.54
Area, mm ² :	2452.23
Carga Máx, kg:	68200



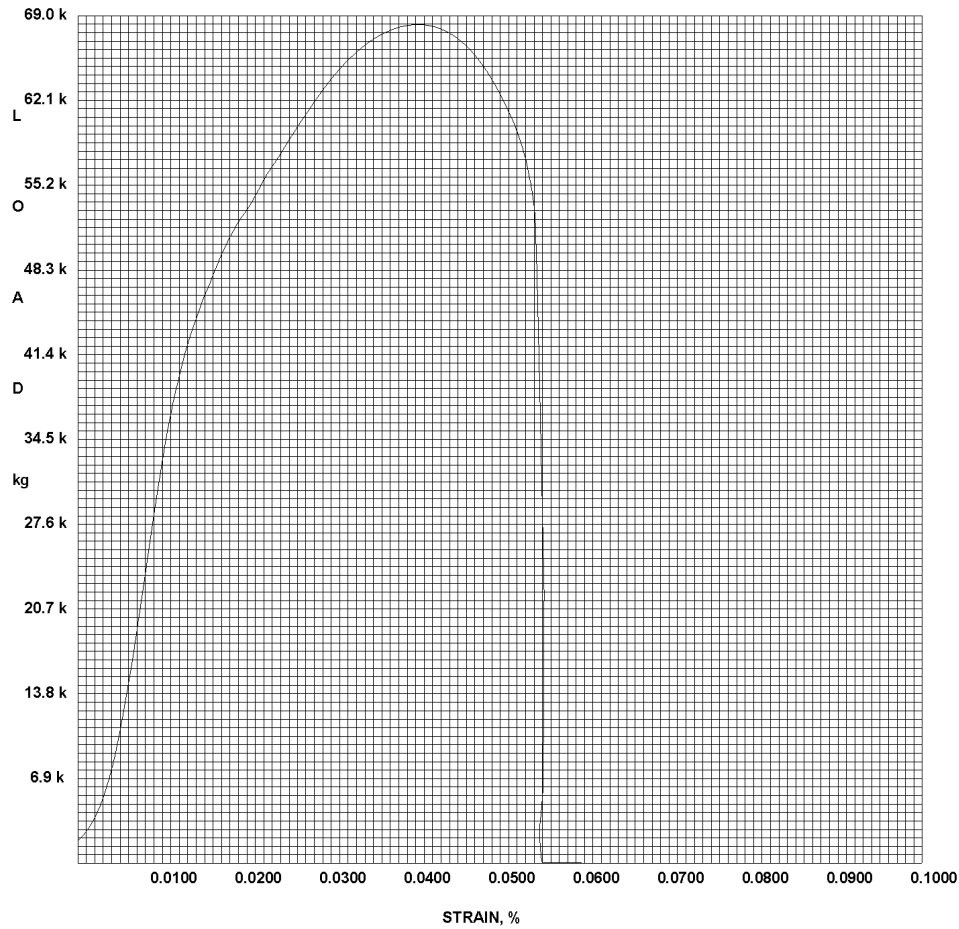
Corporación Mexicana de Investigación en
Materiales S.A. de C.V.
Subgerencia de Laboratorios
Laboratorio de Pruebas Mecánicas

ENSAYO DE TENSIÓN EN SOLDADURA

CLIENTE	POSGRADO
MATERIAL	ACERO/SOLDADURA
EQUIPO UTILIZADO	Tinius Olsen 100 Ton
IDENTIFICACION	ASTM G2

REGISTRO	13PM0460
Nº DE PROBETA	T1
NORMA UTILIZADA	ASTM-E8/E8M-11
CODIGO/EST.	AWS D 14.3
SOLDADURA	
PM-IFT/13-	211

Espesor, mm:	49.64
Ancho, mm:	25.49
Area, mm²:	1265.32
Carga Máx, kg:	67800



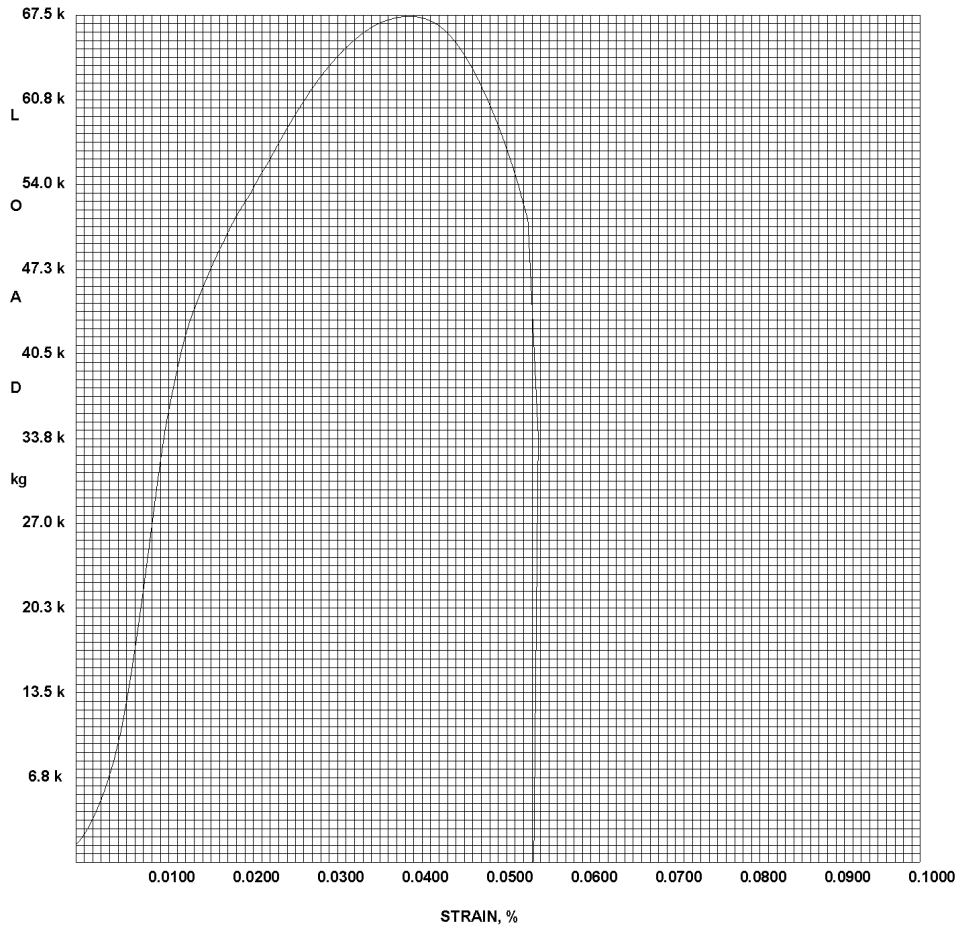
Corporación Mexicana de Investigación en
Materiales S.A. de C.V.
Subgerencia de Laboratorios
Laboratorio de Pruebas Mecánicas

ENSAYO DE TENSIÓN EN SOLDADURA

CLIENTE	POSGRADO
MATERIAL	ACERO/SOLDADURA
EQUIPO UTILIZADO	Tinius Olsen 100 Ton
IDENTIFICACION	ASTM F1

REGISTRO	13PM0461
Nº DE PROBETA	T1
NORMA UTILIZADA	ASTM-E8/E8M-11
CODIGO/EST.	AWS D 14.3
SOLDADURA	
PM-IFT/13-	211

Espesor, mm:	50.67
Ancho, mm:	25.43
Area, mm ² :	1288.54
Carga Máx, kg:	68300



**Corporación Mexicana de Investigación en
Materiales S.A. de C.V.
Subgerencia de Laboratorios
Laboratorio de Pruebas Mecánicas**

ENSAYO DE TENSIÓN EN SOLDADURA

CLIENTE	POSGRADO
MATERIAL	ACERO/SOLDADURA
EQUIPO UTILIZADO	Tinius Olsen 100 Ton
IDENTIFICACION	ASTM F2

REGISTRO	13PM0462
Nº DE PROBETA	T1
NORMA UTILIZADA	ASTM-E8/E8M-11
CODIGO/EST.	AWS D 14.3
SOLDADURA	
PM-IFT/13-	211

Espesor, mm:	49.50
Ancho, mm:	25.66
Area, mm²:	1270.17
Carga Máx, kg:	67400