

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA

Tesis en opción al título de ingeniero mecánico

Efecto térmico de la soldadura por arco sumergido en un acero bajo aleado

Autor: *Wilber Batista Sánchez*

Tutor: Dr. C. Tomás Fernández Columbié

Moa - 2015

“Año 57 de la Revolución”



Declaración de Autoridad

Yo: Wilber Batista Sánchez

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Wilber Batista Sánchez

Dr. C. Tomás Fernández Columbié



Pensamiento



"No se puede dirigir si no se sabe analizar,
y no se puede analizar
si no hay datos verídicos
si no hay todo un sistema de recolección de datos confiables,
y no hay un sistema de recolección de datos
si no hay una preparación de un sistema
con hombres habituados a recoger el dato y transformarlo.
De manera que esta es una tarea esencial".

Che



Agradecimientos



AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Diploma es el resultado de años de estudio, esfuerzo y ayuda de muchas personas, a todos ellos, el eterno agradecimiento.

A mis padres, hermano y mi novia por su apoyo y ayuda incondicional en el transcurso de estos cinco años.

A mi tutor, Tomás Fernández Columbié, que sin su ayuda el trabajo no estaría a la altura de lo deseado.

A todos los compañeros y amigos con los cuales he compartido experiencias y alegrías, las que quedarán en mi memoria por toda la vida.

A todos Muchas Gracias.



TABLA DE CONTENIDOS	Pág
Introducción	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1. Introducción	5
1.2. Proceso de soldadura bajo arco sumergido	5
1.3. Características de los materiales para soldar	7
1.4. Resistencia mecánica en estructuras soldadas	8
1.5. Zona afectada por el calor	9
1.5.1. Soldabilidad de los aceros	11
1.6. Transformaciones físicas-químicas que ocurren en la zona fundida	11
1.6.1. Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)	12
1.6.2. Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB)	12
1.7. Problemas asociados a la soldadura de los aceros	16
1.7.1 Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura	17
1.8. Agrietamiento en uniones soldadas	18
1.8.1. Grietas en calientes	19
1.9. Tensiones residuales y distorsión	20
1.10. Conclusiones del capítulo 1	22
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	23
2.2. Composición química del material base	23
2.3. Caracterización del área afectada en la línea de tubería	23
2.4. Elaboración de la soldadura	24
2.4.1. Material de aporte para la soldadura	25
2.4.2. Clasificación del fundente	26
2.5. Parámetro de la soldadura	27
2.5.1. Determinación del voltaje del arco eléctrico	27
2.5.2. Cálculo del calor aportado	27
2.5.3. Cálculo de la energía lineal del proceso de soldadura	28
2.5.4. Cantidad de electrodos	28
2.6. Máquina para soldar	28



2.7. Preparación metalográfica de la probeta	30
2.7.1. Desbaste y pulido	31
2.7.2. Limpieza y lavado de las superficies a investigar	31
2.7.3. Ataque químico	31
2.8. Ensayo de microscopía óptica	32
2.8.1 Ensayo de dureza	33
2.9. Conclusiones del capítulo 2	34

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción	35
3.2. Análisis de la composición química	35
3.3. Análisis del carbono equivalente	36
3.4. Análisis de los regímenes de soldadura	36
3.4.1. Análisis de la penetración y el área de soldadura	38
3.5. Análisis microestructural por el método de examen microscópico	39
3.5.1. Análisis de las micrografías del cordón de soldadura	39
3.5.2. Análisis de la microestructura de la raíz del cordón	40
3.5.3. Análisis en la interfase del cordón	41
3.5.4. Análisis de la zona de influencia térmica	42
3.5.5. Análisis microestructural en la dirección longitudinal del cordón	43
3.6. Análisis del ensayo de dureza	43
3.7. Valoración económica	44
3.8. Impacto ambiental	46
3.9. Conclusiones del capítulo 3	48

CONCLUSIONES GENERALES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA



INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos a los que las estructuras de tuberías para el transporte de fluido están sometidos, acompañados por la agresividad del medio ambiente, son elementos a considerar para establecer los posibles defectos que pueden inducir a una rotura catastrófica de sus elementos estructurales, que se encuentran fundamentalmente localizados en la zona afectada por el calor (ZAC), región que abarca varios milímetros desde la línea de fusión de la soldadura (L.F.).

Los cambios microestructurales que en esta región se producen, son debidos a la energía calorífica aportada por la soldadura y cuyo ciclo térmico genera productos de transformación, que dependen fundamentalmente de la temperatura alcanzada, velocidad de enfriamiento y composición química del metal base.

Estos productos de transformación, fragilizan la zona, reduciendo sus propiedades mecánicas, sobre todo cuando la estructura es sometida a cargas cíclicas, que facilitan la propagación de una grieta, iniciada, sobre todo en aquellas regiones de la ZAC, que son más proclives a la formación y propagación de estas microgrietas, cuya elevada velocidad de propagación colapsa la estructura por grande que sea esta en unos instantes.

La soldadura de aceros, empleada por décadas en la fabricación de edificios, puentes, recipientes a presión y diversos equipos, también se emplea en la fabricación de tubería de gran diámetro para la conducción de petróleo y sus derivados. El riesgo de fallas catastróficas en soldaduras es alto y las pérdidas económicas y humanas pueden ser muy importantes.

La insistencia por parte de organismos e institutos de conocer con mayor certeza las microestructuras en soldadura y su zona de influencia térmica. Por otro lado, las compañías fabricantes de tubos con costura, están también interesadas en conocer más a fondo sus procesos de soldadura, con el fin de controlar la estructura metalúrgica de las uniones y las propiedades mecánicas de las mismas.

Las plantas industriales no pueden controlar sus procesos de fabricación en algunos casos por lo tanto, el obtener una calidad óptima en sus productos, se vuelve una tarea por demás difícil, que día con día enfrentan los responsables de producción. La



investigación y desarrollo aplicados en planta puede resolver gran parte de este problema, siempre y cuando exista coherencia en el planteamiento de los proyectos a realizar, esto es que los análisis se enfoquen a problemas específicos, no sin antes llevar a cabo estudios preliminares que permitan el conocimiento básico mínimo del proceso de fabricación y su comportamiento.

La influencia de la soldadura de resistencia eléctrica en la microestructura producida por el proceso de arco sumergido ya que la zona de soldadura es una región crítica por presentar heterogeneidad microestructural con microconstituyentes que muchas veces no son recomendables bajo las condiciones de operación, además de la contribución de los esfuerzos residuales generados por el proceso de soldadura.

En dicha zona es más fácil que se generen problemas de fragilización o agrietamiento, que muchas veces se combinan con agentes corrosivos, favoreciendo diversos mecanismos de daño.

La importancia del conocimiento de la estructura metalúrgica en la región de soldadura y zona afectada por el calor, independientemente que dicho conocimiento ayuda a la empresa a conocer el comportamiento de su producto y realizar, de manera más precisa, ajustes en los parámetros que determinan la microestructura y por lo tanto las propiedades mecánicas de dichos componentes.

La **situación problemática** de la investigación la constituye:

La influencia de la soldadura de resistencia eléctrica en la microestructura producida por el proceso de arco sumergido, en la zona de soldadura es una región crítica por presentar heterogeneidad microestructural con microconstituyente que muchas veces no son recomendable bajo las condiciones de operación, además de la contribución de los esfuerzos residuales generados por el proceso de soldadura. En dicha zona es más fácil que se generen problemas de fragilización o agrietamiento, que muchas veces se combinan con agentes corrosivos, favoreciendo diversos mecanismos de daño.

Por lo anteriormente expuesto se hace importante el conocimiento de la estructura metalúrgica en la región de soldadura y la zona afectada por el calor, independientemente que dicho conocimiento ayuda a la realizar, de manera más precisa, ajustes en los parámetros que determinan la microestructura y por lo tanto las



propiedades mecánicas de dichos componentes.

El **problema** a investigar lo constituye: la no caracterización de la zona fundida y de la zona de influencia térmica por el proceso de soldadura bajo arco sumergido del acero de baja aleación al manganeso empleado como material de las tuberías con costura en el transporte de crudo cubano.

Como **objeto de la investigación** se establece: estructura interna de la zona fundida y el metal base en acero bajo aleado al manganeso sometido a proceso de soldadura bajo arco sumergido (SAW).

El **campo de acción** es: determinación del comportamiento microestructural en un acero de baja aleación al manganeso en correspondencia con los regímenes de soldaduras y el ciclo térmico empleado en la soldadura bajo arco sumergido.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**: en la soldadura bajo arco sumergido (SAW) para aceros de baja aleación al manganeso, la aplicación del ciclo térmico de soldadura, donde el calentamiento y tiempo de enfriamiento juegan un papel importante, puede aparecer la formación de ferrita Widmanstätten, la ferrita poligonal con ferrita muy fina, favorables para mitigar el agrietamiento en el proceso de unión.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo**: determinar la relación microestructura - propiedades en la zona fundida y en la zona de influencia térmica de un acero bajo aleado al manganeso unido mediante el proceso de soldadura bajo arco sumergido.

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Caracterizar el comportamiento del cordón en la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica (ZIT) de la unión soldada por proceso de soldadura bajo arco sumergido en un acero bajo aleado al manganeso.
2. Realizar el análisis microestructural y análisis de microdureza para la caracterización de la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica del cordón obtenido por proceso de soldadura bajo arco sumergido.
3. Establecer a partir de las regularidades obtenidas como: comportamiento



microestructural y dureza, el efecto del agrietamiento en el acero de baja aleación unido por proceso de soldadura bajo arco sumergido.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Análisis de los efectos de las variables empleadas para determinar el comportamiento en el cordón de soldadura del acero bajo aleado al manganeso.
3. Ejecución experimental para la determinación de la composición en la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica (ZIT) del cordón de soldadura.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del comportamiento de la microestructura obtenida en el cordón de soldadura.
5. Planteamiento de las ventajas económicas de la aplicación de la metodología propuesta.

Capítulo 1

Marco teórico de la investigación

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Cuando un componente en servicio se vuelve inoperable y deja de funcionar adecuadamente, se dice que ha fallado. Las fallas pueden originarse desde las etapas de diseño, manufactura, puesta en marcha, operación y mantenimiento. La palabra falla es un término general que se utiliza para designar que un componente, equipo ó máquina ha fallado en servicio.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar un análisis de la bibliografía existente relacionada con el proceso de soldadura bajo arco sumergido en aleación del tipo API 5L, empleada en líneas de tuberías.

1.2. Proceso de soldadura bajo arco sumergido

Los antecedentes históricos del desarrollo de electrodos macizos revestidos para la soldadura manual (SMAW) datan de hace algo más de un siglo, mientras que los fundentes para la soldadura automática por arco sumergido (SAW) surgen en la palestra internacional, en su forma acabada, alrededor del período de transición de las décadas los treinta y cuarenta del siglo XX, motivados por la necesidad de incrementar la productividad, la eficiencia y la calidad del proceso de soldadura manual, alcanzando una amplia aplicación en múltiples ramas de la industria antes y durante la Segunda Guerra Mundial y especialmente en aquellas relacionadas con la producción de armamentos.

A partir de estos hechos puede deducirse que los conocimientos tecnológicos, metalúrgicos y las limitaciones de los electrodos macizos revestidos indujeron al desarrollo de los fundentes, que fundamentalmente se basan en el desmembramiento de las partes constitutivas de los electrodos revestidos, de las cuales conformándolas y asociándolas de y con otra forma como sistema tecnológico-metalúrgico surgió el proceso SAW con sus múltiples tipos de fundentes y variantes.

Este es un proceso (figura 1.1) en el cual el calor necesario para la soldadura se suministra mediante un arco (o arcos) que se lleva a cabo entre una barra de metal consumible o electrodo y la pieza de trabajo (Harvey *et al.*, 2008). El arco se cubre

mediante una cama de fundente que protege al metal líquido y al metal base que está cerca de la junta, funcionando como una capa protectora.

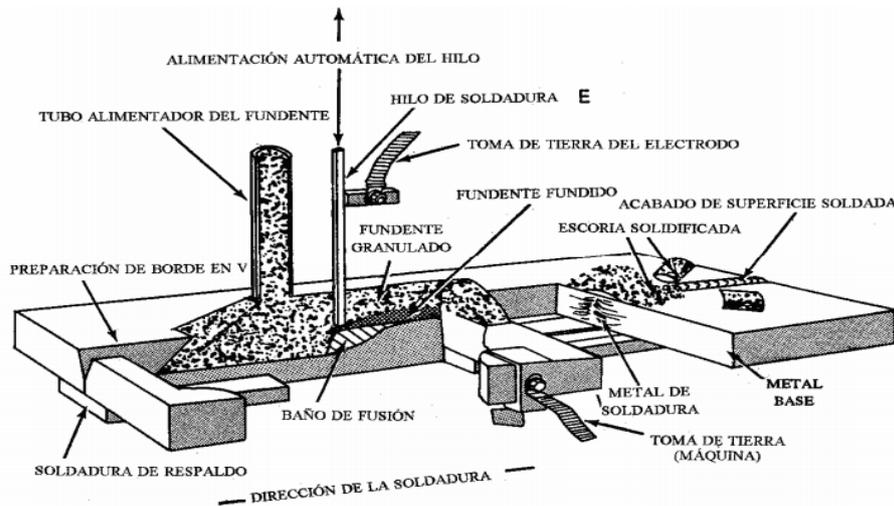


Figura 1.1. Proceso de soldadura bajo arco sumergido (SAW):

En el proceso SAW la corriente fluye a través del arco y la pileta de soldadura, la cual consiste de metal y fundente líquidos. Generalmente el fundente en su estado líquido es altamente conductor, aun cuando en su estado sólido no conduzca la electricidad.

Además de actuar como una cubierta protectora, el fundente puede aportar elementos desoxidantes y escorificadores que reaccionan químicamente con elementos del metal de soldadura. Los fundentes para SAW pueden también contener aleantes que modifiquen la composición química original del acero.

La extensión de los cambios en la microestructura del metal base depende de cuatro factores: la temperatura pico o máxima a la cual se calienta el metal; el tiempo que el metal se mantiene a esa temperatura; la composición química del metal base y la velocidad de enfriamiento. La microestructura del metal de soldadura es columnar debido a que los granos comienzan a formarse en un borde sólido y crecen en una sola dirección.

En aceros al carbono templables la zona del metal base inmediatamente adyacente a la soldadura puede ser de grano basto (Nolan *et al.*, 2005) porque se alcanzan temperaturas en el intervalo de 1 200 a 1 550 °C en tanto la porción de metal que alcanza las temperaturas comprendidas entre 900 a 1 200 °C sufre una refinación del



tamaño de grano. Aunque esta zona no ha sobrepasado la temperatura de transformación, ni la temperatura ni el tiempo de permanencia son lo suficientemente altos como para generar un crecimiento del tamaño de grano.

La siguiente zona. 750 a 900 °C es un intervalo de temperatura donde el acero sufre un recocido y es considerablemente más suave que en las zonas cercanas a la unión, a partir de esta zona y hasta donde no se registra ningún cambio en el metal base, puede haber una zona de esferoidización de carburos de hierro debido al largo tiempo de permanencia a temperaturas cercanas a los 723 °C

1.3. Características de los materiales para soldadura

El conocimiento de las propiedades físicas y químicas de los materiales es de un interés relevante en los criterios de selección de los mismos para cada determinada aplicación. La importancia de la medición de la difusividad térmica es crucial en el uso de diversas aleaciones industriales, en particular en aquellos materiales que son sometidos a condiciones extremas de seguridad (Paris, 1982).

En particular, en los procesos de diseño y fabricación de ductos, las características y propiedades de los materiales elegidos impactarán, en buena medida, sobre las normas y especificaciones a tener en cuenta en la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de transporte de fluidos a través de ellos.

En los últimos años, el estudio de la correlación entre propiedades mecánicas y térmicas ha sido de particular interés para las industrias de aceros y metales en general, y existen reportes recientes de estudios de correlación entre la dureza y la difusividad térmica de diversos tipos de aceros (Fournier *et al.*, 2001 y Walther *et al.*, 2001).

Para prevenir el deterioro de materiales particularmente metálicos, de equipos y herramientas sometidos en su funcionamiento a proceso de desgaste, a exigencias cada vez más estrictas y ambientes agresivos en su desempeño así como para prolongar su vida útil, se han venido implementando procesos de recubrimiento superficial, los cuales brindan alta dureza, baja fricción, resistencia al desgaste, así como buena resistencia a altas temperaturas y sobre todo una excelente resistencia a la corrosión (Ortega *et al.*, 2005 y Harvey *et al.*, 2008).

1.4. Resistencia mecánica en estructuras soldadas

En los últimos años han sido documentados diversos casos de fractura en ductos de transporte de hidrocarburos, los cuales han ocurrido principalmente en soldaduras longitudinales tipo SAW de tubos de acero API 5L. Muchas de estas fallas se han presentado durante la operación de dichas líneas, con la consecuente suspensión del servicio. Desafortunadamente, en la actualidad no se cuenta con suficiente información que permita predecir la vida en fatiga de las uniones soldadas de tubos API 5L con costura por soldadura de arco sumergido conocido por sus siglas en inglés SAW (Sumergid Arc Welding) y tomar así las medidas preventivas para este tipo de fallas de manera oportuna (Ju *et al.*, 2002 y Ishikawa *et al.*, 2006).

En años recientes se ha evaluado la resistencia mecánica de las estructuras soldadas en la zona afectada por el calor (ZAC). En donde la junta soldada en aceros muestra un gradiente de microestructura en la línea de fusión. Ju *et al.* (2002); realizaron estudio enfocado con la correlación entre el cambio de la microestructura y las características de fractura en la ZAC tanto en la costura y la circunferencia soldadas para tuberías de acero API 5L, los autores obtuvieron valores de energía de impacto en la zona circunferencial soldada de la ZAC, obteniendo valores muy bajos en la línea de fusión, pero esta se incrementa cuando se aleja de la línea de fusión. En la zona longitudinal soldada de la ZAC no fue posible encontrar valores de energía de impacto Charpy.

Por otro lado (Ishikawa *et al.*, 2006), han realizado estudios para evaluar la tenacidad a la fractura de la zona afectada por el calor (ZAC) en la costura soldada por el proceso de soldadura por arco metálico protegido (Shielded Metal Arc Welding) para tuberías de alta resistencia a bajas temperaturas (- 10 y - 30° C), concluyen que en la costura soldada de la ZAC se tienen valores muy bajos de tenacidades debido a la anisotropía que presenta esta zona.

Así mismo Gianetto *et al.* (2006), han estudiado la microestructura y las propiedades mecánicas en uniones soldadas circunferenciales por el proceso de gas por arco metálico GMAW (Gas Metal Arc Welding) para aceros tubería de diferentes grados, obteniéndose diferentes microestructuras de este tipo de soldadura.

Nolan *et al.* (2005), ha estudiado la microestructura y las propiedades mecánicas en uniones soldadas circunferenciales por el proceso de gas arco metálico por sus siglas en inglés GMAW (Gas Metal Arc Welding) para aceros tubería de diferentes grados.

Cisilino *et al.* (2000), obtienen en los campos de temperatura en un tubo de acero API 5L, el cual transportaba gas natural y fue soldado por proceso de soldadura manual con electrodo revestido (SMAW). El modelo de elementos finitos empleado es tridimensional (3D). El criterio límite establecido para seleccionar el régimen adecuado fue: la temperatura en la superficie interna del tubo no puede exceder 982 °C. En este artículo no fue considerada la posibilidad de ocurrencia de agrietamiento en frío y este aspecto representa una limitación de la solución obtenida.

Bang (2002) desarrolló un modelo axisimétrico, bidimensional (2D), de elementos finitos para simular la soldadura de un refuerzo metálico circunferencial a un tubo de acero API 5L. En los modelos desarrollados fueron considerados dos criterios límites: 982 °C como temperatura máxima en la superficie interna del tubo y 350 HV como la dureza máxima en la zona afectada por el calor (ZAC) para hidrocarburos no amargos y 250 HV como dureza límite para hidrocarburos amargos. En este artículo fue considerada, también, la termodependencia de las propiedades físicas y mecánicas del acero.

Oddy y Mcdill (1999) reconocen como una necesidad operacional la necesidad de soldar bifurcaciones en las tuberías de gas, con estas totalmente presurizadas. También en este artículo se mencionó la necesidad de establecer un calor de entrada de la soldadura lo suficientemente bajo para evitar perforaciones en el tubo pero no tanto que pueda ocurrir agrietamiento en frío. Fue mencionada la dificultad de encontrar datos que muestren las propiedades de los aceros de tuberías en función de la temperatura.

1.5. Zona afectada por el calor

La mecánica de fractura tiene como objeto el estudio del comportamiento de una estructura en la que hay presente grietas, así como la valoración y elaboración de normas y conductas para evitar la propagación de dichas grietas, que causarían una repentina y catastrófica rotura de la estructura (Watanabe, 1962).

Una parte importante del proceso de soldadura lo constituye el estudio de la zona afectada térmicamente en el material base, que es la ZAC (zona de material adyacente

al baño fundido que sufrió alguna modificación en su microestructura). El estudio de esta zona crítica es importante desde dos puntos de vista, fundamentalmente.

Una, desde el punto de vista de un análisis detallado de su metalurgia, ya que esta zona está sometida a un duro ciclo térmico, donde el calentamiento y tiempo de enfriamiento juegan un papel importante, dado la influencia que tienen sobre el tamaño de grano de la microestructura.

Pero también influye el proceso de soldadura, ya que el aporte térmico variará sensiblemente en función de los parámetros de tensión, intensidad y velocidad de soldeo del procedimiento de soldadura por lo que, en cierta forma, el consumible puede tener alguna incidencia.

Por supuesto, que la composición química y el tipo de acero juegan el papel más importante del estudio de la metalurgia de la ZAC, ya que el proceso elegido para la fabricación y los componentes que intervienen son relevantes para el estudio de la tenacidad a la fractura en la zona afectada térmicamente.

Las zonas intercríticas y subcríticas de la ZAC pueden tener diferentes grados de fragilidad, dependiendo de la composición química del material base y el calor aportado en la soldadura, entre otros factores.

Cuando se utiliza una soldadura multipasada, como normalmente ocurre en grandes espesores, la ZAC, varía en la dirección paralela a la línea de fusión y en la dirección perpendicular a ella, teniendo una gran influencia la temperatura entre pasadas las secuencias de los cordones, así como el calor aportado por la soldadura (heat input).

También ocurren tensiones residuales y encogimiento a lo largo de la gota de soldadura. Dado que las regiones exteriores de las partes base han permanecido relativamente frías y sin cambios de dimensión, mientras que la gota de soldadura se ha solidificado a temperaturas muy altas y después se ha contraído, las tensiones residuales permanecen en forma longitudinal en la gota de soldadura. Es probable que el resultado neto de estas tensiones residuales, en forma transversal y longitudinal, produzca una deformación en el ensamble soldado.

1.5.1. Soldabilidad de los aceros

La American Welding Society define la soldabilidad como la capacidad de un metal a ser soldado, bajo las condiciones impuestas por el diseño y la fabricación de la estructura, para que desempeñe satisfactoriamente el servicio para el cual ha sido proyectado. La soldabilidad del acero está determinada por las transformaciones de fase que ocurren debido a los drásticos ciclos de calentamiento y enfriamiento que tienen lugar durante la soldadura. Debido al rápido enfriamiento y al valor de su carbono equivalente, se puede producir un endurecimiento total del acero que puede originar la fragilidad del acero y la posible fisuración del mismo.

En contraste, si la velocidad de enfriamiento es lenta se puede producir mayor ductilidad y estructuras metalúrgicas de menor fragilidad en la zona afectada por el calor del metal base. Las propiedades más importantes para la soldabilidad son la ductilidad, la resistencia, la dureza. Estas propiedades son afectadas por factores como la composición química, el tamaño de grano y el espesor de las piezas.

1.6. Transformaciones físico-químicas que ocurren en la zona de la unión soldada

Las variaciones en la composición química de la zona fundida pueden tener una influencia favorable o desfavorable sobre las propiedades de la unión.

Plantean (Mathar, 1934, James y Buck, 1980), que las pérdidas por oxidación de los elementos útiles como el carbono en los aceros, el silicio en las fundiciones, modifican las características mecánicas. Así mismo, la fijación de un tanto por ciento exagerado de carbono, de fósforo o de azufre, así como la absorción de oxígeno y nitrógeno, producen una pérdida en las cualidades de la unión. Por el contrario, el aporte voluntario por micrometalurgia de ciertos elementos especiales conduce a una mejora de las características mecánicas o químicas.

La pérdida de elementos por oxidación (Stout y Doty, 1971) son fenómenos bien conocidos por los metalúrgicos; en soldadura, se complican por la presencia de una atmósfera que rodea al metal fundido y cuya naturaleza depende del tipo de protección del arco y del baño fundido (tipo de gases de protección, fundentes o de la composición del revestimiento del electrodo). En el caso de los aceros, sabemos que estas pérdidas

son en general consecuencia de la reducción del óxido de hierro por los elementos componentes del acero.

1.6.1. Modificaciones estructurales de la zona fundida (ZF)

Las modificaciones estructurales pueden unirse en dos grupos (Rodríguez, 1983 y Bailey, 1995) las que afectan el grano del metal, a su arquitectura interna. El estudio de esta estructura determina la forma, el tamaño y la orientación de los granos en la zona fundida y también en el metal de base hasta una cierta distancia. Las que intervienen en el cambio de estado físico - químico de los constituyentes del metal. Estas modificaciones, para un acero de composición química dada, son función directa del ciclo térmico impuesto por la fusión, que determina el poder de templado en soldadura. El tamaño, la forma y la orientación del grano de solidificación, van a depender entonces de la temperatura a la que se ha llevado el metal, del tiempo que se hayan mantenido a esta temperatura y de la velocidad de enfriamiento al atravesar las líneas de transformación.

En soldadura eléctrica por arco, se procede en general con depósitos sucesivos de metal fundido de volumen muy pequeño con solidificación casi instantánea; como consecuencia, la estructura del metal fundido es más fina, alineada y acicular. Si la operación lleva varias pasadas, la influencia térmica de las pasadas producirá un refinamiento de grano en las estructuras (Ramírez, 1980).

1.6.2. Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB)

El crecimiento de los granos en el metal base, está ligado invariablemente al ciclo térmico de la soldadura, temperatura y velocidad de enfriamiento. En la soldadura por arco, la zona de crecimiento de los granos está más localizada y sus dimensiones pasan por un máximo, en una zona muy próxima a los bordes, disminuyendo bruscamente en las capas próximas al bisel. Este aspecto de la curva se debe al normalizado que provoca en el metal base las sucesivas pasadas del depósito por arco. Estos cambios de estructura generalmente están ligados a cambios en las propiedades del metal en esta zona debido al tratamiento térmico a que está sometida esta zona.

Según sea la potencia térmica aplicada en la zona fundida, así variará la zona influencia térmica (ZIT) en el metal base (figura 1.2), el cual será sometido a modificaciones

alotrópicas dando origen a toda una serie de estructuras que pueden ir desde el semi-temple del tipo bainítico, hasta el hipertemple totalmente austenítico. Estas modificaciones variaran en dependencia de las diferentes regiones de la zona térmicamente afectada donde se encuentre (Barreiro, 1966).

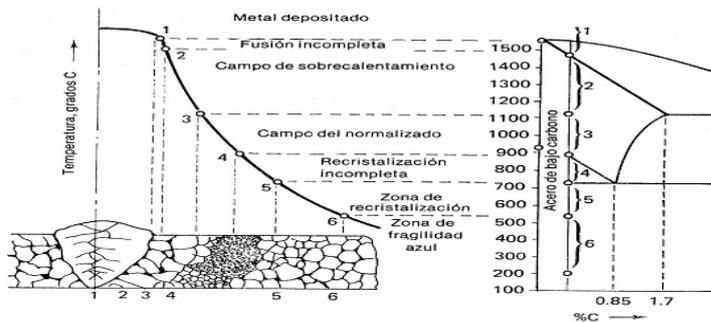


Figura 1.2. Zonas que se presentan en la ZIT durante la soldadura de los aceros al carbono y de baja aleación, según el diagrama Fe – C. Fuente: Zuñiga (1983).

- En la **zona fusión incompleta**, la temperatura alcanzada es la de fusión con velocidades de enfriamiento del orden de 350 a 400 °C/min, es la región de máximo temple; se caracteriza porque en ella ocurren la mayoría de los procesos difusivos de la soldadura, sin embargo el problema se complica por la superposición de una transformación química, en particular por la pérdida de elementos útiles: carbono, manganeso y silicio. Por esta razón, esta zona, a veces, se templea menos que otras zonas próximas del metal de base.
- En la **zona de recalentamiento** del metal base, que se produce a algunos milímetros del borde de la soldadura, se alcanza una temperatura muy elevada (entre 1100 y 1500 °C) y la velocidad de enfriamiento también es relativamente grande: 240 a 300 °C/min. Necesariamente tiene que haber crecimiento de los granos y una transformación estructural de importancia con un temple cuya naturaleza depende del tipo de acero. En esta región no existen transformaciones de tipo químico y por tanto, únicamente interviene el ciclo térmico de soldadura sobre la constitución de la estructura final.
- En la **zona de recocido** es calentada ligeramente por debajo de los 900 °C, el metal tiende hacia una estructura normalizada con afinamiento del grano, pero esta

transformación no puede ser total a causa de la velocidad de enfriamiento que aún es grande 170 a 200 °C/ min.

d) En la zona de **primera transformación** que se extiende entre los puntos de transformación Ac_1 , y Ac_2 , (720 a 900 °C), las modificaciones pueden adoptar distintos aspectos; en particular puede haber globulación del agregado laminar con tendencia a la coalescencia sin modificación sensible del grano de ferrita. Esta última zona de transformación puede extenderse en dependencia del espesor del metal soldado.

e) Zona de metal base no afectado: en esta zona el ciclo térmico que genera el proceso, no afecta la estructura del metal originalmente empleada.

Si el metal base hubiese sido modificado preliminarmente por algún tratamiento térmico (temple, revenido) o mecánico (laminado en frío), las transformaciones de la zona de recalentamiento o de la zona de recocido, prácticamente quedan como se ha dicho anteriormente, pero la zona de la primera transformación y una parte del metal de base no afectado, son asiento de nuevas transformaciones difíciles de prever.

A partir de las modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (Rodríguez, 1983), establece una clasificación de las diferentes zonas del cordón de soldadura, para poder determinar los cambios en la estructura en la zona de Influencia Térmica (ZIT).

Zona de fusión incompleta: Constituye la zona de transición entre el metal de la costura o zona fundida y el metal base no fundido. Es una zona estrecha del metal base que se calienta a temperaturas por debajo de la línea de líquidos y por encima de la línea de sólidos, o sea, a temperaturas que solo sobrepasan un poco la temperatura de fusión por lo que el metal se encuentra en estado bifásico sólido - líquido.

El estado bifásico que se alcanza permite que ocurran procesos difusivos de algunos elementos entre las fases líquidas y sólidas de la zona de fusión incompleta, lo que provoca que esta zona se diferencie en cuanto a composición química tanto de la zona de la costura, como del metal base. El ancho de esta zona depende del carácter de la fuente de calor y de la composición química del metal y varía desde 0,1 – 0,4 mm. Las

propiedades de esta zona en ocasiones ejercen una influencia decisiva en la resistencia de la unión.

Zona de sobrecalentamiento: Zona limitada a los puntos cuyas temperaturas máximas se limitan entre aproximadamente los 1100°C (temperatura de crecimiento intensivo el grano austenítico) y la línea de sólidos. En esta zona el metal durante el calentamiento de soldadura sufre la transformación alotrópica de hierro δ a γ y producto de que el metal se calienta a temperaturas bastante por encima de A_{c3} ocurre un sobrecalentamiento y crecimiento del grano austenítico.

Luego del enfriamiento la estructura final de esta zona depende de la composición del metal y el ciclo térmico de soldadura, de forma que en algunos casos durante la soldadura SMAW con un sobrecalentamiento significativo del acero y un contenido de carbono elevado se forma una estructura de grano grueso, que no influye significativamente en la resistencia del metal, pero que si disminuye significativamente su plasticidad.

En estos casos la resistencia al impacto puede caer en un 25 % y más. El ancho de esta zona oscila entre 1 y 3 mm. Por lo anterior se considera una de las zonas que más afectación pueden sufrir en la ZAC y donde ocurren la mayoría de las fallas en servicio.

Zona de normalizado: Está constituida por el metal calentado algo por encima de A_{c3} hasta la temperatura de aproximadamente 1100 °C. En esta zona se obtiene una estructura de grano fino muy favorable desde el punto de vista de propiedades mecánicas, siendo en algunos casos incluso superiores a las del metal base no afectado. El ancho de la zona varía de 1,2 a 4mm.

Zona de recristalización incompleta: Se presenta en la zona calentado a temperaturas entre A_{c1} y A_{c3} , que en losa de aceros de bajo carbono van de 725 a 850 °C. El metal en esta zona alcanza solo una recristalización parcial.

Zona de Recristalización: Durante la soldadura de los aceros que han sufrido deformaciones plásticas previas, en la zona que se calienta en el intervalo de 450 a 700 °C, de partes de granos surgen y crecen nuevos granos equiaxiales. Si el metal no ha sido previamente deformado plásticamente la recristalización no ocurre.

Zona Frágil Azul: En esta zona se presenta una coloración azul de la superficie del metal, luego del enfriamiento. Se caracteriza porque durante la soldadura de aceros de bajo carbono con contenidos de más de 0,005 % de O₂, 0,005 % de N₂ y 0,0005 % de H₂ ocurre una brusca caída de la resistencia al impacto. Esta es causada probablemente por el envejecimiento del metal, durante el cual la solución sólida sobresaturada segrega los componentes en exceso, en este caso nitrógeno o carbono, los que en forma de nitruros y carburos muy dispersos se agrupan alrededor de las zonas defectuosas de la red cristalina aumentando la resistencia del metal, pero disminuyendo su plasticidad.

Estas dos últimas zonas hay autores que las denominan **zonas de revenido**.

Metal base no afectado: En los aceros al carbono por debajo de la temperatura Ac1 no ocurren transformaciones importantes que afecten de forma importante las propiedades mecánicas, por lo que por debajo de esta temperatura se considera metal base no afectado térmicamente. Algunos autores extienden la ZAC por debajo de esta temperatura porque determinados aceros son susceptibles de sufrir modificaciones.

El ancho obtenido en la ZIT y sus diferentes subzonas, dentro de la soldadura por fusión, se diferencia grandemente en el proceso de soldadura a llama (OFW) respecto a los diferentes procesos de soldadura por arco eléctrico (SMAW, GMAW y SAW) ya que el primero es un proceso que utiliza una fuente de calor (llama) menos potente y concentrada que el arco, que avanza mucho más lentamente, con un baño más voluminoso, por lo que el calor introducido en la pieza por metro lineal es mucho mayor, obteniéndose una ZIT muy ancha.

1.7. Problemas asociados a la soldadura de los aceros

Plantean (Burgos, 1987 y Rodríguez, 1983), que para la unión de este tipo de aceros se han empleado tradicionalmente los procesos convencionales de soldadura por fusión; estos tipos de soldadura presentan diversos tipos de problemas característicos del proceso:

- a) Gran cantidad de calor generado por el arco.
- b) Necesidad de empleo de fundentes.
- c) Uso de electrodos de materiales reactivos.

d) Incompatibilidad (en ocasiones) de las propiedades mecánicas del metal de aporte y el metal base.

Los problemas anteriores según Seferian (1966) conducen a la aparición de diferentes tipos de defectos tales como:

- a) Elevadas distorsiones de los elementos soldados.
- b) Inclusión de escorias en la unión soldada.
- c) Excesivas salpicaduras durante el proceso.
- d) Excesiva porosidad.

Todo lo anterior conlleva a unas pobres propiedades mecánicas de la unión soldada. Para tratar de evitar estos problemas se han adoptado una serie de prácticas como los tratamientos térmicos pre-soldadura de las piezas, tratamientos térmicos post-soldadura, mecanizado previo de las superficies a soldar, utilización de materiales especiales de aporte a la soldadura.

Todos estos tratamientos logran atenuar los problemas relacionados anteriormente pero incrementan muy considerablemente la complejidad técnica y el costo de las operaciones de soldadura. Los tratamientos térmicos previos a la soldadura requieren el diseño de herramientas específicas para cada aplicación, bien sea el diseño de devanados (en el caso de calentamiento por inducción eléctrica) o de sopletes (si se trata de un calentamiento por llama) (Taylor, 1975).

1.7.1. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura

Según González (1978) y Rodríguez (1983) la soldabilidad de un material está dada por tres factores, de ellos el factor material es el que se refiere a la influencia de la composición química, método de fusión, existencia de impurezas, grado de desoxidación y las operaciones precedentes (laminado, forja y tratamiento térmico), también depende de la relación de las impurezas, elementos de aleación y el carbono.

El grado de soldabilidad representa una característica cualitativa o cuantitativa, la cual muestra cuanto varían las propiedades del metal al soldar bajo determinadas condiciones. Por ejemplo es posible establecer cuanto varían la resistencia, plasticidad, resiliencia y otras debido a la soldadura. Una de las características más sustanciales de la soldabilidad en aceros es la ausencia de grietas.

En los aceros al carbono sigue siendo el fundamental para la determinación de las propiedades mecánicas tecnológicas. Con su aumento, disminuye la soldabilidad, debido a que crece la templabilidad. El silicio al igual que el manganeso actúan con elementos desoxidante, en las uniones soldadas, la cantidad de este elemento debe limitarse por el aumento de la fragilidad. Por otro lado el cromo dificulta la soldadura porque acelera la oxidación del metal, forma uniones químicas con el carbono, aumenta la dureza del metal en las zonas de transición. El molibdeno aumenta la templabilidad del acero durante los procesos de soldadura, generalmente su contenido está limitado a pequeños valores y el níquel en contenidos de 3 a 5 %, afina el grano, aumenta la plasticidad y no empeora la soldabilidad.

1.8. Agrietamiento en uniones soldadas

La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación. Durante la soldadura se producen fundamentalmente dos tipos de agrietamiento: agrietamiento en frío y agrietamiento en caliente. Las grietas constituyen los defectos más peligrosos en las uniones soldadas y se pueden presentar defectos externos o internos.

Algunos autores (Masubuchi, 1980 y EL - Hebeary *et al.*, 2004), plantean que el fenómeno del agrietamiento en frío se conoce como agrietamiento retardado o agrietamiento por hidrógeno. Constituye un agrietamiento que se produce generalmente a temperaturas inferiores a los 930 °C inmediatamente después de culminada la soldadura, o luego de varias horas.

Constituyen por su morfología roturas frágiles de poca abertura y poco ramificadas que se producen en la Zona Afectada por el Calor o en el metal de la costura y se orientan transversal o paralelamente al eje de la misma. En general las grietas en frío pueden ser externas o internas por su ubicación. La grieta en frío más frecuente se produce en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la zona de sobrecalentamiento o de grano grueso.

Este tipo de agrietamiento en general es característico de la soldadura de los aceros de medio y alto carbono y algunos aceros de baja aleación. La fractura inducida por hidrógeno (FIH) es atribuible a tres factores principales: microestructura, hidrógeno y

esfuerzo, (Lancaster, 1999). Los factores causales que gobiernan la ocurrencia de la FIH, en las juntas de soldadura de aceros ferríticos son:

- Microestructura endurecida sensible a la fisuración, conteniendo productos de transformación martensíticos y bainíticos.
- concentración localizada suficientemente alta de hidrógeno en términos del contenido de hidrógeno difusible de la soldadura (Maroef *et al.*, 2002).
- Esfuerzo elevado causado por la alta restricción estructural que es determinado por la rigidez del ensamble, es decir, espesores y altura del refuerzo del cordón de la soldadura.

La sensibilidad o susceptibilidad a la fractura inducida por hidrógeno de soldaduras se da por una combinación de estos tres factores primarios (Pitrun, 2004). El mecanismo de nucleación y crecimiento de este tipo de grietas se explica por el efecto fragilizante que tiene el hidrógeno en el acero, por su alta tasa de difusión y por la existencia de zonas con esfuerzos triaxiales máximos en el frente de una entalla concentrador de esfuerzos.

La ubicación de estas grietas, es decir si se presentan en el metal de soldadura o en la zona afectada por el calor (ZAC), se explica a través de las diferencias que presenta el acero en estado austenítico (estructura cúbica cara centrada) y en estado ferrítico (cúbico de cuerpo centrado) en cuanto a la solubilidad y difusividad de hidrógeno atómico, para lo cual la templabilidad relativa entre el metal base y el metal fundido se convierten en los factores fundamentales para poder predecir su localización en uniones soldadas (Giraldo y Chávez, 2004).

1.8.1. Grietas en caliente

Las grietas en caliente se forman en la zona fundida, o en la ZAC muy cerca de la línea de fusión, y a altas temperaturas (durante el período de cristalización del metal entre la línea de líquidos y la de sólido, donde el metal se encuentra en estado bifásico o por debajo de la línea de sólidos) (Ashby, 1996).

Los aceros propensos a este tipo de agrietamiento son fundamentalmente los aceros rápidos o de libre maquinado, que presentan grandes contenidos de S y P, los que forman eutécticos de bajo punto de fusión (temperatura de fusión) que se acumulan

durante la cristalización en las fronteras de granos aún en estado líquido mientras los granos ya solidificaron y que bajo el efecto de las tensiones de tracción propias de la soldadura provocan la rotura del material (Park *et al.*, 2002).

Según la literatura consultada, Watanabe (1962) fue el primero en reportar grietas laminares en estructuras soldadas. Más tarde durante los años de la década de los sesenta aparecieron muchos trabajos al respecto, especialmente en Inglaterra, donde fue creado un Comité Nacional para atender este problema. Entre otros, se pueden destacar los trabajos de Nangel (1969); Meyer (1968); Wormington (1967).

Se pueden usar procedimientos de soldadura apropiados para reducir las fisuras y el agrietamiento. Un bajo amperaje resulta benéfico, también puede ser benéfico un ligero movimiento zigzagueante al soldar, con el fin de promover el crecimiento celular del grano. Se recomienda seguir los procedimientos adecuados al apagar el arco, a fin de evitar las grietas de cráter.

1.9. Tensiones residuales y distorsión

Las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta red interna, es necesaria la introducción de energía a la pieza.

Se denomina esfuerzos residuales o internos, al estado de esfuerzos existente en el volumen de un material en ausencia de una carga externa (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos, tal como un gradiente térmico (James, 1996; Masubuchi, 1980). En general, se distinguen tres clases de esfuerzos residuales de acuerdo con la distancia o rango sobre el cual pueden ser observados (James y Buck, 1980 y Alfonso, 2002).

El calentamiento y enfriamiento rápidos en regiones localizadas del trabajo durante la soldadura por fusión, especialmente la soldadura con arco eléctrico, producen expansiones y contracciones térmicas, que a su vez provocan tensiones residuales en la soldadura y distorsión del ensamble soldado.

En la soldadura por arco de metal protegido (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y



la superficie del metal base en la unión que se está soldando (Macherauch y Kloos, 1986).

A consecuencia de los procesos de fabricación de los materiales, de la mecanización de componentes, de las condiciones de servicio de estos últimos y el suministro de uniones soldada (James, 1996) se generan en los agregados policristalinos campos de tensiones residuales. Tales tensiones residuales pueden llegar a condicionar negativamente la vida en servicio de los dispositivos y estructuras. Microscópicamente, las tensiones residuales actúan alterando las distancias entre los planos atómicos de los cristales.

En el caso específico de procesos de soldadura, los esfuerzos residuales son a consecuencia de la interacción de procesos separados por la expansión impedida y contracción resultante de una distribución de temperatura no homogénea, b) efectos de enfriamiento rápido (temple) y, c) transformaciones de fase. Consecuentemente, el tipo y cantidad de esfuerzos residuales en la pila de soldadura y zona afectada térmicamente dependen de la temperatura de transformación determinada por el diagrama tiempo – temperatura - transformación del material (TTT) y la velocidad de enfriamiento.



1.10. Conclusiones del capítulo 1

- ❖ Los ductos empleados para la transportación de petróleo se fabrican generalmente de aceros aleados, con el objetivo de garantizar la durabilidad de los mismos, ya que están expuestos a condiciones severas de corrosión – erosión.
- ❖ La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación. Durante la soldadura se producen fundamentalmente dos tipos de agrietamiento: agrietamiento en frío y agrietamiento en caliente.
- ❖ Durante el proceso de soldadura el mismo se caracteriza por presentar diferentes transformaciones en la zona de la unión soldada las cuales están relacionadas con el metal base y con la zona fundida, y las mismas definen la calidad de la junta soldada.

Capítulo 2

Materiales y métodos

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

El empleo de la soldadura por fusión con fuentes de calor potentes, de alta concentración y elevado nivel energético conduce a una fusión intensa del metal base y del de aportación y con frecuencia a su sobrecalentamiento a temperaturas por encima de las de fusión. La presencia del metal líquido, calentado a temperaturas muy altas y con una determinada superficie de intercambio con el medio crea las condiciones para su interacción intensa con los elementos presentes en el medio circundante. Esta interacción en muchos casos resulta perjudicial y se manifiesta de forma negativa sobre las propiedades de la unión.

El objetivo del capítulo es establecer el procedimiento metodológico para la caracterización microestructural del cordón de la unión soldada en acero API 5L con proceso de soldadura SAW.

2.2. Composición química del material base

La tabla 2.1, extraída del Databook 1988 y editada por la American Society for Metals, muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System – UNS, de la American Society for Testing Materials – ASTM y la SAE, establece la composición química del acero API 5L.

Tabla 2.1. Composición química del acero API 5L

Grado	C %	Mn %	Si %	Cr %	Ni %	Cu %	S %	P %
*API 5L	0,03	1,2	0,20	0,02	0,01	0,01	0,004	0,025

*API 5L Especificación para tubería de línea

Como se observa en la tabla 2.1, se trata de un acero microaleado, los cuales poseen, en su forma más sencilla una microestructura ferrita/perlita y una composición parecida a la de los aceros de bajo carbono, pero normalmente contienen un mayor contenido de manganeso entre 1,4 y 1,7 %, con adiciones de microaleantes de aproximadamente de 0,1 % en total, niobio, titanio, vanadio, lo cual les da a los aceros microaleados propiedades mecánicas superiores a las de los aceros de bajo carbono.

2.3. Caracterización del área afectada en la línea de tubería

Los cambios de temperatura que ocurren durante el proceso de soldadura son rápidos, localizados y heterogéneos. Las diferentes partes de las juntas soldadas se calientan y

enfrian a temperaturas y velocidades diferentes y cada región se expande y contrae a su propia velocidad. Debido a esta falta de uniformidad en la expansión y contracción, se generan esfuerzos residuales en las juntas, estos esfuerzos pueden ser lo suficientemente severos para producir deformaciones y aún grietas en el metal de soldadura fundido y en la ZAC. La figura 2.1 muestra la zona afectada en la línea de tubería, así como agrietamiento en el cordón de soldadura.



Figura 2.1. Deterioro en el interior de la línea de petróleo. Fuente: Barzaga (2014).

Como se aprecia en la figura anterior en el interior del tubo existen zonas afectadas por efectos del desgaste y la corrosión, causada por los agentes característicos del petróleo. Se aprecia además una zona del cordón afectada por grieta. Esta grieta puede estar provocada por el efecto de la tensión, la misma es el resultado de los esfuerzos residuales durante el enfriamiento de estructuras rígidas, que pueden ocurrir en cualquier zona del cordón.

Estos defectos pueden empezar en el cordón y terminar en la zona afectada por el calor (ZAC). Generalmente, son transversales en la soldadura de un solo pase, y longitudinales en la soldadura de pases múltiples

2.4. Elaboración de la soldadura

Esta se realizó de manera automática sobre la sección de la tubería preparada para la soldadura (figura 2.2), se colocó la tenaza de soldadura en un ángulo aproximado a los 90° con respecto al metal base, con una distancia pieza - electrodo de 3 mm (aproximadamente el diámetro del electrodo), se determinó el tiempo y la distancia recorrida durante el proceso (distancia entre la marca inicial y la marca final), para obtener la velocidad de avance (V_s).

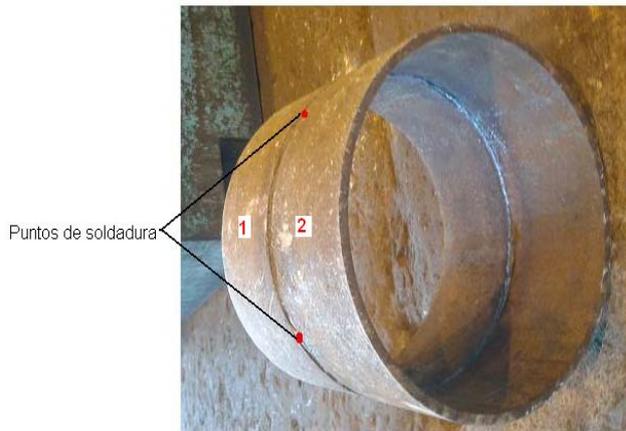


Figura 2.2. Preparación del área para la soldadura.

La preparación de la unión de soldadura en la tubería de diámetro 250 mm se realizó a tope con preparación de los bordes a 30° para efectuar soldadura multipasada en proceso de arco sumergido. La soldadura de múltiples pases es más propensa a las inclusiones de escoria que la soldadura de un solo pase. En los anexos 1 y 2 aparece la tecnología de soldadura.

El atrape de la escoria puede ocurrir cuando la misma se mezcla con el baño de fusión ó cuando la escoria presente en la superficie no es completamente removida, cubriéndose los pases sucesivos.

2.4.1. Material de aporte para la soldadura

El material de aporte empleado para la soldadura y sus características principales aparecen en la tabla 2.2. Se clasifica según la norma AWS: F 48 A0 – EL – 12.

Tabla 2.2. Composición química del material de aporte

C %	Mn %	Si %	P %	S %	Ni %	Mo %	Cr %
0,05	1,20	0,55	0,01	0,006	0,02	< 0,01	0,01

Alambre de bajo contenido de carbono, de manganeso y de silicio. Presenta excelente ductilidad y resistencia al agrietamiento. Usado con fundente INDURA 400 y 401. La delgada capa de cobre en su superficie mejora el contacto eléctrico entre el alambre y la boquilla, mejorando la estabilidad del arco y aumentando la vida de la boquilla.

En el sistema de soldadura por arco sumergido, se utiliza un alambre sólido recubierto por una capa de cobrizado para evitar su oxidación y mejorar el contacto eléctrico. Generalmente contiene elementos desoxidantes, que junto a los que aporta el

fundente, limpian las impurezas provenientes del metal base o de la atmósfera y aportan elementos de aleación seleccionados según sean las características químicas y mecánicas del cordón de soldadura que se desee.

Según la AWS, los alambres se clasifican por 2 letras y 2 números, que indican la composición química de éstos.

EX XX
Letras dígitos

1° letra, "E" Significa electrodo para la soldadura al arco

2° letra, "X": Significa el contenido máximo de manganeso

L - 0,60 % Mn máx (bajo contenido manganeso).

M - 1,25 % Mn máx (contenido mediano de manganeso)

H - 2,25% Mn máx (alto contenido de manganeso).

Los 2 dígitos: Indican los porcentajes medios de carbono. Los alambres se entregan en rollos de 25 kg aproximadamente y con diámetro interior de 300 mm.

En nuestro caso, el alambre empleado se corresponde con el tipo L, de bajo contenido manganeso.

2.4.2. Clasificación del fundente

En el proceso de soldadura se empleo el fundente aglomerado INDURA H-400. El fundente H-400 está diseñado para ser utilizado en uniones de una o varias pasadas. Su escoria es de fácil desprendimiento y deja cordones de excelente apariencia. Se recomienda para soldaduras de acero dulce y baja aleación, que requieran una resistencia a la tracción mínima de 420 a 490 MPa. El envase es en sacos de 40 kg.

Una cama de fundente de poco espesor puede producir porosidad por una inadecuada protección del metal fundido. Por otro lado, una cama muy gruesa desmejora el aspecto del cordón y puede conducir a derrames del metal fundido en soldaduras circunferenciales y producir dificultades para la remoción de la escoria en chaflanes profundos.

Para garantizar la soldabilidad de este tipo de acero su carbono equivalente (% CE) no debe ser mayor de 0,50; para ello utilizamos la ecuación 2.1 de Seferian (1967).

$$\%CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{6} \right) + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (2.1)$$

2.5. Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura definidos para cada probeta fueron: corriente de soldadura (I_s), tensión de arco (U_a) y velocidad de soldadura (V_s). El diámetro del electrodo fue de 3 mm.

La intensidad de la corriente de soldadura depende del diámetro del electrodo, el cual se selecciona atendiendo: al espesor del material base, al tipo de construcción soldada, además del tipo de revestimiento y la posición del cordón en el espacio que influyen en la magnitud de la intensidad y según Quintero *et al.* (2006), se seleccionó una intensidad de 600 Amp.

2.5.1. Determinación del voltaje del arco eléctrico

La tensión de arco no influye significativamente en el ancho del cordón; influye notablemente en el refuerzo (forma cóncava o convexa del mismo), teniéndose soldaduras planas (con tensiones altas) y abultadas (con tensiones bajas), pero siempre en el rango de tener un arco estable y según Rodríguez (1987) se seleccionó una tensión de 35 V.

2.5.2. Cálculo del calor aportado

Debido a las actuales exigencias de mejorar la productividad en la deposición de recargues fue necesario estudiar el efecto de parámetros de soldadura y su resistencia al desgaste. Para ello se seleccionaron dos grupos relacionados con el aporte térmico. El calor aportado se calculó en base a la ecuación 2.2

$$Q = \frac{U_a \cdot I_s}{V_s} \quad (2.2)$$

Donde:

Q - calor aportado; kJ/mm

U_a - tensión del arco; V

I_s - corriente de soldadura; A

V_s - velocidad de soldadura; mm/s

2.5.3. Cálculo de la energía lineal del proceso de soldadura

Cuando se deposita una pasada de soldadura sobre la superficie de una placa, el flujo de calor afecta cada punto produciendo tensiones en función de la distancia a la fuente de calor, Talero (2000) propone la siguiente ecuación:

$$E_L = 60 \cdot \eta \frac{U_a \cdot I_s}{v_s} \quad (2.3)$$

E_L - energía lineal; J/m

η - eficiencia de la fuente de calor; %

La eficiencia (η) del proceso de soldadura SMAW oscila entre 0,65 a 0,85 (Cary, 1998). A los efectos de los cálculos realizados, se asumió una eficiencia de 0,7.

2.5.4. Cantidad de electrodos

Es habitual que quien tiene que efectuar o presupuestar un trabajo de soldadura de unión de un recipiente, una estructura o una construcción en particular, se vea en el problema de calcular cuanto material de aporte (varillas, alambres, fundentes, electrodos) necesita y muchas veces también el costo total de dicho trabajo.

$$C_e = \frac{S \cdot L_c}{10^6} \delta (1,2) \quad (2.4)$$

Donde:

C_e – Cantidad de electrodos; kg

S – Área de la sección transversal de la pieza; mm²

L_c – Longitud a soldar; (mm)

10^6 – Factor de conversión.

δ - peso específico del material; kg/dm³

1,2 – Coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas por salpicaduras, calentamiento, aprovechamiento del electrodo.

La velocidad de soldadura escogida fue de 0,90 (m/min).

2.6. Máquina para soldar

La máquina soldadora (figura 2.3) es del tipo transformador, produce corriente alterna. La potencia es tomada directamente de una línea de fuerza eléctrica y transformada en

un voltaje requerido para soldar. El tamaño de la máquina soldadora por utilizar depende de la clase y cantidad de soldadura por hacer.



Figura 2.3. Fuente empleada para la soldadura.

En la tabla 2.3 aparecen las características de la máquina

Tabla 2.3. Características de la máquina empleada

Alimentación primaria	230V monofásica - 60/60 Hz	
Consumo primario de intensidad máxima	19A (TIG) - 29A (ARCO)	
Voltaje en vacío	82 V	
Gama de ajuste	5A a 150 A	
Factor de Marcha (a 40° C)	a 100%	100 A
	a 60%	120 A
	a 35%	150 A
Diámetro de electrodo máximo	4mm / 5/32pulg	
Índice de Protección	IP23	
Normas	EN 60974-1	
Dimensiones (L x a x A)	420 x 175 x 300 mm	
Peso	10 kg	

La regulación de los parámetros se realizó modificando la velocidad de soldadura, actuando para ello sobre la corriente y la tensión de arco. El equipo cuenta con dos displays digitales que indican instantáneamente los valores eficaces medidos. Se soldó con corriente directa electrodo positivo.

2.7. Preparación metalográfica de la probeta

El examen microscópico proporciona información sobre la constitución del metal o aleación, pudiéndose determinar características tales como la forma, el tamaño y la distribución del grano, inclusiones y microestructura metalográfica en general. La microestructura puede reflejar la historia completa del tratamiento mecánico que ha sufrido el metal. Las operaciones se resumen en el siguiente orden:

- Corte, desbaste, pulido, desengrasado, lavado y ataque químico.

Como las muestras eran de grandes dimensiones, para el proceso de pulido y desbaste, así como para la observación metalográfica se cortaron con longitud de 15 x 15 mm, se obtuvieron cortando las secciones de una lámina con una sierra de vaivén, la cual posee un sistema de refrigeración que permite realizar el corte sin alterar la microestructura del material de acuerdo con la norma ASTM E 3. En la figura 2.4 aparece la máquina empleada en esta operación.



Figura 2.4. Máquina empleada en el corte.

Las muestras obtenidas luego del corte aparecen en la figura 2.5. Estas muestras son la que se emplearon posteriormente para el análisis metalográfico y el ensaño de dureza



Figura 2.5. Muestras obtenidas luego del corte.

Se aprecia en las probetas, que las mismas han sido cortadas de forma transversal, así como seccionada en toda la longitud del cordón, se realizó de esta forma para poder realizar el análisis químico en la zona fundida y en la zona de influencia térmica luego de ejecutado el proceso de soldadura.

2.7.1. Desbaste y pulido

El pulido se hizo siguiendo las normas (ISO 9001) con los papeles abrasivos (tipo 100, 180 y 400), como se observa en la figura 2.6, se realizó variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. En el pulido fino se empleó pasta abrasiva (Pasta GOI), añadida sobre discos provistos de paños o motas.



Figura 2.6. Desbaste y pulido de las muestras.

Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Para obtener una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL. Con el objetivo de lograr el acabado final, se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

2.7.2. Limpieza y lavado de las superficies a investigar

Para eliminar los residuos de partículas, grasas y suciedades se lavó la superficie con agua. Una vez pulida las probetas se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

2.7.3. Ataque químico

Antes de atacar, la probeta se le realizó un desengrasado. En este caso, para atacar el material se empleó Nital al 2 %. En la tabla 2.4 aparece el modo de preparación del reactivo químico empleado.

Tabla 2.4. Reactivo químico empleado

Reactivo	Composición/uso
Acero API 5L	Mezcla de 2 mL de ácido nítrico (HNO ₃) y 100 mL de alcohol etanol de 3 a 5 seg.
Nital al 2%	

Preparado el reactivo, se vierte un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente, y se secó con alcohol (absoluto) y secada al aire.

2.8. Ensayo de microscopía óptica

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas. La figura 2.7 se corresponden con la estructura metalográfica del acero API 5L.

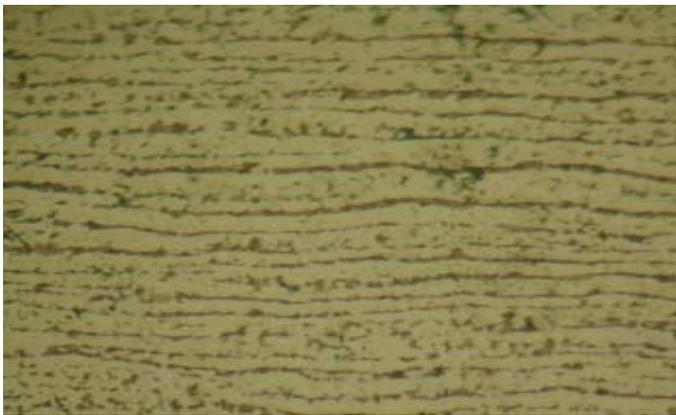


Figura 2.7. Microestructura del acero API 5L.

La figura 2.7 muestra la microestructura del acero API 5L, donde se observa una estructura de ferrita + perlita. Se observan los granos de ferrita (zonas blancas) y colonias de perlita (zonas oscuras), presentando una estructura bandeda, como resultado del proceso de conformado en caliente de este material.

2.8.1. Ensayo de dureza

Para la medición de la dureza se trabajó con la norma ASTM NORMA E18 – 89a y las mediciones fueron realizadas con un durómetro Rockwell, usando una carga de 100 kgf/mm² (10 MPa) en la escala Rockwell C para el material base y 310 kgf/mm² (31 MPa) en la escala Rockwell C para el material de aporte, con un indentador con punta de diamante.

La dureza realizada a las probetas fue realizada en dos formas:

a) Dureza longitudinal: luego de realizado el cordón se rectificó la parte superior del mismo, para obtener una superficie plana como lo exige la norma y poder realizar dureza Rockwell C a lo largo del cordón, para cada una de las probetas.

Se realizaron un total de 5 mediciones para cada caso posible por cordón con una separación entre lectura y lectura de un milímetro, además se promediaron dichos valores. Se realizó un barrido de dureza como se representa en la figura 2.8.

Barrido 1: Zona superior

Barrido 2: Zona central

Barrido 3: Zona inferior

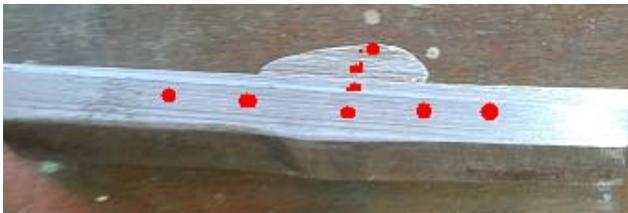


Figura 2.8. Esquema de las mediciones de dureza

La tabla 2.5 se especifican las pruebas de dureza Rockwell C realizadas de acuerdo a la norma ASTM E-18 para cada una de las zonas de estudio. Se reportan el promedio de cinco mediciones para cada zona de estudio.

Tabla 2.5. Zonas consideradas para la medición de dureza

Zona	Dureza HRB					Promedio HRB
MB	HRB1	HRB2	HRB3	HRB4	HRB5	HRBP
MD	HRB1	HRB2	HRB3	HRB4	HRB5	HRBP
ZAC	HRB1	HRB2	HRB3	HRB4	HRB5	HRBP

* MB – Metal Base, MD – Metal Depositado, ZAC – Zona Afectada por el Calor

2.9. Conclusiones del capítulo 2

- ❖ Quedaron fundamentadas las propiedades a investigar, definiendo los principales parámetros a medir de la unión soldada en acero empleado en línea de tubería de petróleo.
- ❖ La metodología de cálculo propuesta permite determinar el ciclo térmico de soldadura en función de las diferentes transformaciones de fase que ocurren en una unión soldada por el proceso de soldadura manual por arco eléctrico.
- ❖ Los procedimientos empleados en los diferentes equipos y máquinas están establecidos en las normas correspondientes.

Capítulo 3

Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

Las operaciones de soldadura al arco utilizan metales de aportación que dependen de muchos factores económicos que están relacionados con la cantidad de metal de aporte consumido al realizar una soldadura. Todo esfuerzo debe ser hecho para reducir la cantidad de metal de relleno requerido por cada junta soldada, conforme con los requerimientos de calidad. El análisis de las áreas de las juntas de soldar diseñadas, los procedimientos de soldadura y la preparación de las piezas a soldar pueden proveer oportunidades para minimizar costos.

El objetivo del capítulo es realizar el análisis de la metodología propuesta del proceso de soldadura SAW en la unión de tuberías de acero de baja aleación.

3.2. Análisis de la composición química

El análisis químico del material, donde se tuvo en cuenta además la zona fundida y la zona de influencia térmica, como se observa en las tabla 3.1; 3.2 y 3.3, se realizó empleando un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón, ubicado en el laboratorio del taller de fundición de la empresa Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", Moa.

Tabla 3.1. Composición química del material base

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Fe
0,18 %	0,77 %	0,25 %	0,05 %	0,09 %	0,17 %	98,27 %

Según la composición química obtenida en el espectrómetro, como consecuencia de tres chispazos, se puede observar que en relación a la composición química del material base, según establecido por las normas, existe diferencia significativa en algunos elementos, muestra de ello está dado en los elementos químicos: carbono y manganeso. Se consideran estos fundamentalmente, ya que el primero, aunque está en mayor cuantía proporciona más dureza en la soldadura y el segundo es formador de carburo de manganeso.

No obstante a lo anterior, por la composición química obtenida y representada en la tabla 3.1, se puede plantear que este material se clasifica en el grupo de buena soldabilidad.

La tabla 3.2 se corresponde con la composición química de la zona fundida del acero.

Tabla 3.2. Composición química zona fundida

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Fe
0,071 %	1,75 %	0,38 %	0,03 %	0,04 %	0,09 %	97,50 %

Y la tabla 3.3 la composición química de la zona de influencia térmica

Tabla 3.3. Composición química de la zona Influencia térmica

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Fe
0,095 %	0,83 %	0,25 %	0,04 %	0,06 %	0,10 %	98,50 %

Se aprecia en la composición química obtenida en ambas zonas, diferencia marcada en la obtención de los diferentes elementos, un manganeso de más porcentaje en la zona fundida, lo cual presumiblemente esté asociado a las características química del alambre empleado en la soldadura, donde presenta un contenido de 1,20 %, lo cual durante el proceso de licuación y solidificación se une con los demás elementos que lo integran.

3.3. Análisis del carbono equivalente

Para determinar el carbono equivalente se tuvo en cuenta cada uno de los elementos que intervienen en la ecuación, así como los obtenidos en el análisis de composición química efectuado al acero, en consideración con la ecuación 2.1 y remplazando los valores declarados se tiene que el [CE] es de 0,41 %

En los aceros al carbono y de baja aleación la propiedad de templabilidad determina, en muchos casos, la propiedad de soldabilidad según fue reportado por Fernández y Rodríguez (2007). El contenido de carbono obtenido afecta esta propiedad, de ahí que con el resultado del carbono equivalente de 0,41 %, aún se garantiza una unión soldada sin necesidad de aplicar temperatura de post calentamiento para mejorar la ductibilidad de la unión.

3.4. Análisis de los regímenes de soldadura

Los cálculos de los regímenes de soldadura para el proceso con material de aporte, donde se considera por la ecuación 2.2 el cálculo del calor aportado, se sustituyen los valores y se establece que este parámetro sustituyendo la $U_a = a$ 35 Volt, la intensidad de corriente de 600 Ampere para un alambre de 3,2 mm y una velocidad de soldadura de 9 mm/seg es de 2 333,3 J/mm

El calor (heat input) involucrado durante el proceso de soldadura afecta la extensión de la ZAC y las microestructuras generadas en esta y en el material de soldadura. Las condiciones térmicas en la soldadura y cerca de ella deben mantenerse bajo ciertos límites, para controlar la estructura metalúrgica, las propiedades mecánicas. Los esfuerzos residuales y las distorsiones que resultan de la operación de soldadura. Dentro de esto es importante mencionar la conexión entre la velocidad de solidificación del material que se aporta, la distribución de la temperatura máxima o pico en la ZAC y por último la velocidad de enfriamiento en la soldadura en la ZAC.

Para junta de pequeño espesor, como en nuestro caso, la penetración depende de la tensión de arco, la velocidad de avance y principalmente de la corriente, la penetración varía alrededor de un valor inestimable con la velocidad y la tensión; sin embargo, con la corriente, la variación es lineal. Las funciones principales de la tensión (voltaje) son estabilizar el arco y proporcionar un cordón liso, sin salpicaduras. Por otro lado se plantea que para electrodos de 3,2 mm, la tensión de arco no influye significativamente en el ancho del cordón; influye notablemente en el refuerzo.

El cálculo de la energía lineal del proceso de soldadura se determinó por la ecuación 2.3, sustituyendo los valores en el cálculo para ambos materiales de aporte y se obtuvo los siguientes resultados:

$$E_L = 60 \cdot \eta \frac{U_a \cdot I_s}{V_s}$$

$$E_L = 60 \cdot 0,7 \cdot 2\,333,3$$

$$E_L = 97\,998,6 \text{ J/m}$$

El valor de la energía lineal alcanzado en cada punto está relacionado con varios factores, como por ejemplo la distancia a que se encuentra la fuente, la velocidad de traslación e intensidad de la misma, donde para el caso correcto de la distancia, según la literatura consultada (Radhakrishnan, 2000) plantea que la temperatura lograda en un punto determinado guarda una relación inversa con la separación desde la línea de aplicación del calor.

Los efectos, más graves, en el material base serán en las zonas cercanas al cordón, debido a la disipación del calor. Esta zona alcanza temperaturas mayores a la de fusión del propio material y, por lo comentado anteriormente, la estructura del titanio varía

proporcionalmente a la zona afectada por el calor.

3.4.1. Análisis de la penetración y el área de soldadura

Luego de realizado el proceso de soldadura, se realizó una inspección visual a la unión soldada entre ambas tuberías, como lo muestra la figura 3.1, se determinó los posibles errores que pudieran haber quedado y que los mismos garantizaran la continuidad del cordón de soldadura.



Figura 3.1. Penetración del cordón y área de soldadura.

Se puede apreciar en la unión soldada, en el círculo rojo que al finalizar el cordón aparece un defecto llamado mordedura, este defecto consiste en una detención del electrodo al concluir la unión, aunque constituye un defecto el mismo no afecta la calidad de la unión soldada, además el fluido que circula por la misma no presenta una presión que pueda dañar o afectar la misma.

Las variables que mas afectan la geometría del cordón de soldadura son el amperaje, el voltaje y la velocidad de soldadura, dichas variables están también involucradas en el calculo del calor de entrada a la soldadura, pero muchas veces el valor de H_{net} no proporciona información de cómo es la geometría del cordón, dos factores que están estrechamente relacionados con ésta son la penetración y área de soldadura.

La penetración de una soldadura depositada en un surco o en la superficie del metal base generalmente se define como la distancia, bajo la superficie original, a la cual la fusión del metal culmina. La corriente es la variable más significativa en la penetración: la velocidad de soldadura y el voltaje son menos importantes.

En cálculos del aporte térmico y velocidades de enfriamiento, el contenido calórico del metal de soldadura fundido es importante y es proporcional al área de sección transversal del cordón, el cual representa la cantidad de material que ha sido calentado hasta el estado líquido.

3.5. Análisis microestructural por el método de examen microscópico

El examen microestructural de la ZAT del metal base de las juntas muestran distintas regiones que varían notablemente debido al ciclo térmico local experimentado durante la soldadura, lo cual queda expuesto en la figura 3.2, donde se consideró las observaciones del comportamiento microestructural de la unión soldada.



Figura 3.2. Zonas consideradas para el análisis microestructural de la unión soldada.

Para los puntos 1,2, 3 y 4 se consideraron las microestructuras de la zona de fusión (dirección vertical) y para los puntos 6,7,8,9 y 10 las microestructuras de la zona de influencia térmica (ZIT) y del metal base (MB). Como muestras de comparación se tuvo en cuenta la microestructura mostrada en el capítulo 2, epígrafe 2.7.

3.5.1. Análisis de las micrografías del cordón de soldadura

Se puede apreciar las variaciones microestructurales en la zona fundida, inducidas por el ciclo de soldadura. Se realizaron micrografías en las juntas soldadas, en las secciones atacadas, se observan, muy bien definidas las diferentes zonas existentes (metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura), así como el pase de raíz y los pases de relleno; también se observa buena geometría (uniformidad y simetría) del cordón.

Se realizó el análisis microestructural de la zona afectada y del metal base (figura 3.3 (a) y 3.3 (b)), se pudo determinar el tamaño aproximado de la zona afectada por el calor el cual arrojó un promedio de $4,3 \pm 0,4$ mm, siendo una zona pequeña tomando en cuenta el número de pases realizados.

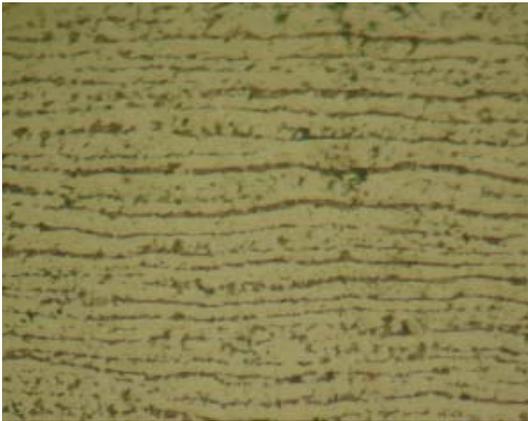


Figura 3.3 (a). Metal base



Figura 3.3 (b). Metal base

En cuanto al barrido realizado en el material base se observó una estructura en forma de banda ferrítico-perlítico. Hay que destacar que esta estructura va disminuyendo de grosor hasta desaparecer en la zona adyacente al cordón, esto se debe al calor generado en el proceso de soldadura. Estas bandas ferrítico-perlíticas son formadas por una mala práctica de laminación y su eliminación es conveniente, ya que en presencia de humedad produce atrapamiento de hidrógeno lo cual puede inducir a un daño.

Además esta estructura aumenta la tenacidad del material, es decir, que en el cordón se espera que esta estructura aparezca, pero hay que destacar que cuando se realizan más de un cordón, la estructura de los cordones internos cambia debido al calor generado por pase siguiente. Esto se demuestra con los resultados obtenidos, en los cuales se ve que la ferrita acicular se encuentra en mayor cantidad en la superficie del cordón, y en menos proporción en el interior de este.

3.5.2. Análisis de la microestructura de la raíz del cordón

Las figuras 3.4 (a) y 3.4 (b), muestran las microestructuras obtenidas de la raíz del cordón, el comportamiento de las mismas están asociadas al ciclo térmico introducido al material base, la utilización del tipo de alambre, así como del tipo de fundente. Existen otros parámetros que también afectan la geometría del cordón, como la altura de los electrodos, la separación entre ellos así como el ángulo en que se posicionen. Sin embargo, su influencia es menor, además de que dichas variables generalmente se mantienen constantes.



Figura 3.4 (a). Raíz del cordón.

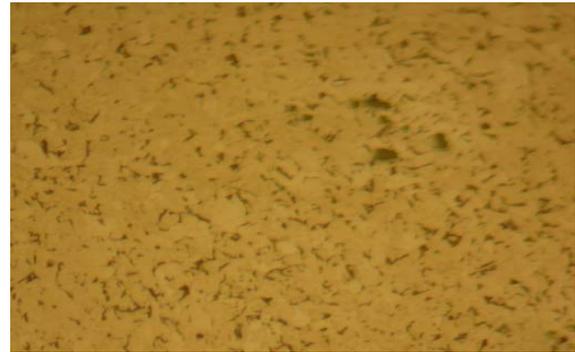


Figura 3.4 (b). Raíz del cordón.

Se puede observar que en la unión soldada la estructura del metal depositado presenta un fondo de granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida del metal base (parte clara) presenta granos finos, alineados y aciculares (estructura Widmanstätten). Se aprecia el efecto del tratamiento térmico que ejerce el pase de relleno sobre la raíz y entre pase; esto origina un reacomodo columnar típica de la solidificación del metal.

Los resultados de estos ensayos muestran una estructura de forma de ferrita acicular en la superficie del cordón, en la zona media se observa ferrita mas ferrita acicular en regiones preferenciales, en la parte inferior del cordón se encontró ferrita. La estructura ferrita acicular se forma a partir de un enfriamiento rápido.

3.5.3. Análisis en la interfase del cordón

La forma de los granos en la zona de fusión es controlada por la forma de la pileta líquida a través de la acción de un fenómeno conocido como crecimiento competitivo (se le llama así porque los nuevos granos columnares que están creciendo compiten entre si para crecer uno a expensas del otro según favorezca su orientación cristalográfica). Las figuras 3.5 (a) y 3.5 (b) se corresponden con la interfase.



Figura 3.5 (a) Interfase del cordón.

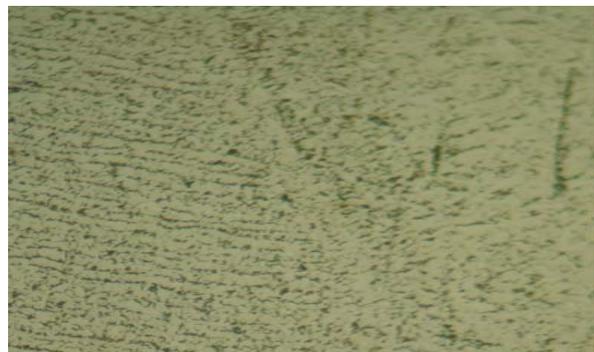


Figura 3.5 (a) Interfase del cordón.

Como se observa en ambas microestructuras, la dirección principal de crecimiento durante la solidificación de una soldadura por fusión es la misma que la dirección de extracción de calor, es aproximadamente perpendicular a la interfase sólido-líquida en todos los puntos de la pileta. Sin embargo, el crecimiento de cada grano individual tiende a dirigirse en forma paralela a una dirección cristalográfica en particular, llamada dirección de fácil crecimiento.

3.5.4. Análisis de la zona de influencia térmica

Los posibles defectos que pueden inducir a una rotura catastrófica de sus elementos estructurales, se encuentran fundamentalmente localizados en la zona afectada por el calor (ZAC), región que abarca varios milímetros desde la línea de fusión de la soldadura. Los cambios microestructurales que en esta región se producen, son debidos a la energía calorífica aportada por la soldadura y cuyo ciclo térmico genera productos de transformación, que dependen fundamentalmente de la temperatura alcanzada, velocidad de enfriamiento y composición química del material base. Las figuras 3.6 (a) y 3.6 (b), se corresponden con la ZAC en la unión soldada.

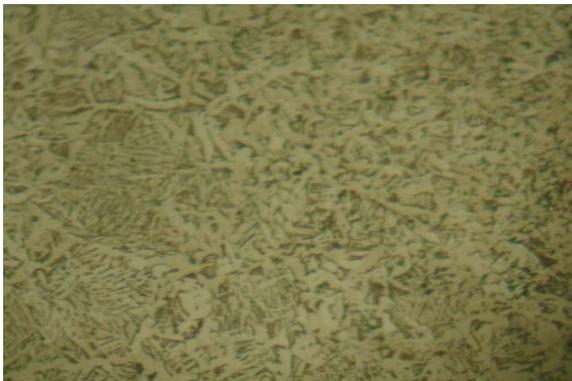


Figura 3.6 (a) ZIT

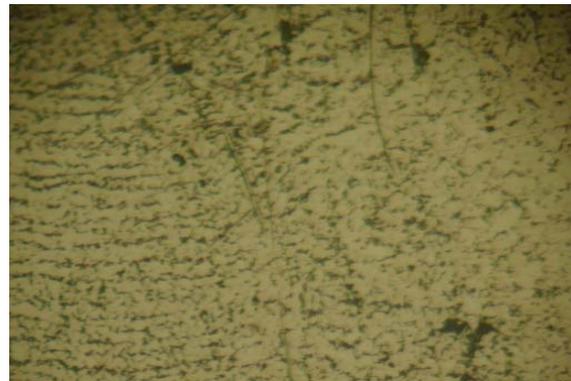


Figura 3.6 (b) ZIT

Esta zona está próxima a la línea de fusión y forma parte de la zona supercrítica de la ZAC, cuya temperatura está por encima de $1\ 100\text{ C}$; la microestructura del material base se destruye completamente y una nueva microestructura surge, dependiendo de la composición química. Los granos de ferrita de esta zona son mayores que los del material, lo que quiere decir, que la microestructura del material base cambia totalmente, granos grandes y bien delimitados, como corresponde a una zona que alcanzó plenamente el campo austenítico; se observan lajas de cementita, estrechas y delgadas, en direcciones preferentes.

3.5.5. Análisis microestructural en la dirección longitudinal del cordón

Las probetas que fueron cortadas en ángulo con respecto a la dirección del cordón. Fueron empleadas para realizar una medición del tamaño de grano columnar en la soldadura ya que el plano obtenido con dicho corte, corresponde a una dirección perpendicular al crecimiento de dichos granos. Las figuras 3.7 (a) y 3.7 (b) muestran estas imágenes.

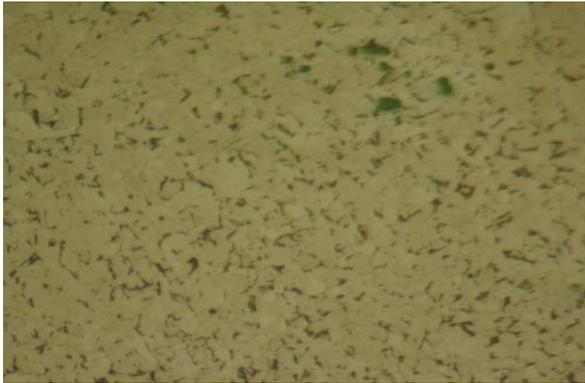


Figura 3.7 (a). Zona fundida

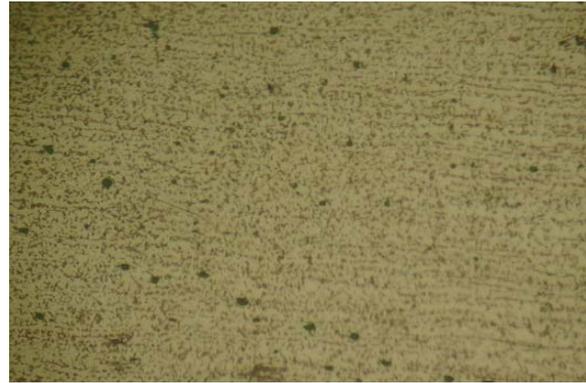


Figura 3.7 (b). Zona de Influencia térmica.

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón en la zona fundida y en zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. Se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten, pero refinada y austenita retenida

En la primera, se puede apreciar un tamaño de grano mayor que en la ZAT y la presencia de porciones pequeñas de ferrita. Esta estructura implica un valor de dureza ligeramente superior al que se mide para el metal base después del proceso de soldadura, por tener una buena penetración y fusión de la soldadura y presentarnos una superficie más uniforme.

3.6. Análisis del ensayo de dureza

El análisis de la dureza contra el desplazamiento del electrodo, donde se consideraron el barrido en la zona superior del cordón (pileta), el barrido en la zona central del cordón y el barrido en la zona inferior del cordón. En la tabla 3.4 se recoge el análisis de las pruebas de dureza Rockwell C realizadas en cada una de las zonas de estudio. Los ensayos de dureza se llevaron a cabo en el mismo plano de la observación metalográfica. Se realizaron tres barridos en la probeta, el primero hacia la superficie

exterior, el segundo en el centro y el tercero hacia la superficie interior del espesor del tubo.

Tabla 3.4. Durezas obtenidas en las zonas consideradas

Zona	Dureza HRB					Promedio HRB
MB	164	164	163	164	164	163,8
MD	208	206	208	208	208	207,6
ZAC	178	180	182	184	184	181,6

En el barrido de dureza se observa que el último cordón de relleno presenta una mayor dureza debido a la estructura formada, mayoritariamente constituida de ferrita acicular y estructura dendrítica. Los cordones anteriores a este presentan una menor dureza, ya que se ven afectados por el calor generado durante la ejecución de los pases posteriores.

La zona afectada por el calor cercano a la raíz del cordón, es la que presenta menor dureza, motivado a que la zona es afectada por el calor generado por el pase de raíz y los pases de relleno, creando una condición que simula a un recocido.

3.7. Valoración económica

El análisis de los costos empresariales es sumamente importante, principalmente desde el punto de vista práctico, puesto que su desconocimiento puede acarrear riesgos para la empresa. En los costos se considera los costos de producción, que son los que permiten obtener determinados bienes a partir de otros, mediante el empleo de un proceso de transformación.

- Costo de la materia prima y materiales que intervienen en el proceso productivo.
- Sueldos y cargas sociales del personal de producción.
- Depreciaciones del equipo productivo.
- Costo de los servicios públicos que intervienen en el proceso productivo.

A. Costos de energía:

$$CE = \frac{V \cdot I \cdot t \cdot E}{1000} \quad (3.1)$$

Donde:

CE – costo de la energía; kW/h

V – voltaje, V

I – corriente; Amp

t – tiempo; h

E – energía, kW

Sustituyendo en la ecuación 3.1, tenemos que el costo de la energía es:

$$CE = \frac{35 V \cdot 128 \text{ Amp} \cdot 0,66 h \cdot 1,9}{1000}$$

$$CE = 5,6 \text{ kW} / h$$

Es decir que el costo de la energía para realizar el depósito del cordón sobre la unión de la tubería en una vuelta de la misma sería de 5,6 kW/h

B. Costos de mano de obra:

$$CMO = MO \cdot H \quad (3.2)$$

Donde:

CMO – Costo mano de obra; \$

MO – Mano de obra; \$

H – horas trabajadas; h

$$CMO = 2,6 \cdot 0,66 h = 6,84 \text{ CUP}$$

C. Costo de soldadura

$$CS = V_s \cdot H \quad (3.3)$$

Donde:

V_s – Valor de la soldadura; \$

Sustituyendo en la ecuación 3.3 tenemos que el costo de soldadura es:

$$C_s = 6,84 \cdot 0,66 h = 4,5 \text{ CUP}$$

E. Costos de la materia prima

Electrodo F 48 A0 – EL – 12 de diámetro 3,2 mm: (precio 4,25 CUP).

F. Costos de tratamientos de las piezas = \$ 00,00

G. Costos indirectos (limpieza y preparación) = 10,00 CUP

H. Costos de inspección = 8,00 CUP

I. Otros costos: 6,53 CUP

Los conceptos F; G; H e I, son costos referenciales de la empresa.

J. Total de los costos

$$TC = A + B + C + D + E + F + G + H + I + J$$

$$TC = 5,6 + 6,84 + 4,5 + 00,00 + 10,00 + 8,00 + 6,53$$

$$TC = 41,71 \text{ CUP}$$

El costo total que se requiere para una unión de soldadura de la línea de tubería será de 41,71 CUP, lo cual incluye los cordones de raíz y de refuerzo.

3.8. Impacto ambiental

El desarrollo sostenible de la humanidad constituye una constante preocupación para la sociedad. En tal sentido, al precisar la cantidad de material, las operaciones tecnológicas y el valor de los consumibles, se logra minimizar la cantidad de recursos y destinar solamente aquellos que resultan indispensables para el proceso.

Esto contribuye al necesario aprovechamiento racional de los recursos materiales y humanos y al optimizar la tecnología, se disminuye la emisión de gases tóxicos al ambiente, los tiempos operacionales con la consiguiente exposición de los operarios a las altas temperaturas, radiaciones y los gases, así como el consumo de energía del equipamiento.

Las altas temperaturas de calentamiento durante los procesos de soldadura son potencialmente perjudiciales para el proceso y para el medio ambiente, ya que aceleran rápidamente los procesos de fusión del metal de aporte, metal base, revestimiento y fundentes, teniendo lugar durante este proceso la evaporación, salpicaduras, y oxidación de los materiales y elementos que participan en las reacciones químicas de la zona fundida.

Los trabajos de soldadura son bastante perjudiciales al hombre y al medio ambiente, debido a la incidencia de las radiaciones, gases y altas temperaturas generados por el proceso. Los efectos contaminantes derivados de los procesos de soldadura son mucho más agresivos a la salud cuando las piezas a soldar están recubiertas de sustancias como: aceites, pinturas y otras; que se evaporan durante el proceso e inciden en el hombre junto a los gases de la soldadura y los del local, si en el mismo se realiza cualquier otra actividad que emita sustancias al medio.

Las temperaturas extremas que pueden alcanzarse en los procesos de soldadura de acuerdo a las temperaturas de fusión de los metales, entre 260 °C (500 F) y más de 2760 °C (5 000 F), con:

1. La llama de gas puede alcanzar los 3 037 °C (5 500 F)
2. La llama del arco del plasma puede alcanzar 30 537 °C (55 000 F).

Factores contaminantes del puesto de trabajo del soldador:

1. Las radiaciones: luz visible, infrarrojas, ultravioletas, gammas y rayos X.
2. Sustancias químicas en las emisiones de gases y vapores en forma de humos, que son los representantes del riesgo oculto.
3. Elevadas temperaturas.

Las radiaciones visibles, ultravioletas e infrarrojos pueden surgir directamente de la fuente de soldadura o reflejarse en otras superficies. Las fuentes de estos tipos de rayos incluyen la llama del combustible, el arco de soldadura o corte, el rayo láser, el baño de soldadura fundido, el fundente fundido, la escoria fundida, los metales blanco y rojo calientes.

Además las radiaciones infrarrojas y ultravioletas pueden causar cambios químicos en la atmósfera circundante produciendo gases muy tóxicos como: ozono y dióxido de nitrógeno presentes en el aire. Los rayos X y gammas se producen por el equipo que se utiliza para las pruebas no destructivas de la soldadura. Los rayos X también se producen por el haz de electrones.

Los vapores y gases en forma de humos son producidos por las elevadas temperaturas que además de fundir el metal lo evaporan. Este vapor se condensa en pequeñas partículas de metal oxidado que salen en forma de humo de la soldadura. Dependiendo del tipo de soldadura, podrán estar presentes óxidos de aluminio, cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, manganeso, níquel, titanio y vanadio.

Los gases, como el ozono, el dióxido de nitrógeno y el monóxido de carbono, se generan por la descomposición de los revestimientos de electrodos y la acción de los rayos ultravioleta. Los humos, partículas de metales tóxicos que se producen durante los trabajos de soldadura, generalmente tienen diferentes composiciones.



3.9. Conclusiones del capítulo 3

- ❖ Se establece el procedimiento de cálculo a considerar durante el proceso de soldadura en la junta de la línea de tubería, fabricada de acero del tipo API 5 L.
- ❖ Las diferentes fórmulas desarrolladas para cada uno de los procesos consideran deposición de depósito para una y varias pasadas durante el proceso de soldeo.
- ❖ Los procesos de soldadura afectan grandemente el medio ambiente y salud del hombre ya que en los mismos se generan emanaciones de gases y humos que afectan el organismo del ser humano.



CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ La falla de la línea de petróleo se debe a un efecto combinado de corrosión erosión en la que la corrosión es inducida por hidrógeno, sulfuros y cloruros de manera intergranular en todo el cuerpo de la línea, provocando un comportamiento frágil de la estructura y la disminución de sus propiedades mecánicas.
- ❖ El ciclo térmico de la soldadura de la junta, generó en la zona térmicamente afectada por el calor granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida del metal base, alineados y aciculares en la dirección horizontal y en forma de banda ferrítico-perlítico en la dirección horizontal.
- ❖ En el análisis de dureza se pudo determinar que la misma es superior en la pileta del cordón (207,6 HRB) y que en la medida que se depositan los demás cordones, esta disminuye (181,6 HRB) producto del recocido al que se someten los mismos durante el proceso.
- ❖ Al abordar la valoración económica donde se consideró el costo de la mano de obra, los costos de producción, los costos de energía, los costos de la soldadura y los costos de la materia prima, se incurre en un total de 41,71 CUP durante la ejecución de la soldadura de la línea de tubería del acero API 5 L.



RECOMENDACIONES

- ❖ Evaluar en próximo trabajo la realización de la unión soldada en la línea de tubería con el proceso GTAW, considerando que con el mismo se depositan cordones continuos y el metal de aporte presenta como elemento fundamental el manganeso.
- ❖ Establecer el nivel de tensiones residuales, que en mayores espesores hagan aconsejables el uso de un tratamiento post-soldeo de alivio de tensiones, así como determinar el nivel de tensiones de origen térmico que pueden producirse en el proceso de soldadura SAW.
- ❖ Encontrar un posible estado de bitensión (tensiones residuales transversales y tensiones residuales longitudinales), que pueda implicar comportamientos de la microestructura que faciliten la formación de la grieta y propagación.

Referencias bibliográficas



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ashby, M., Engineering Materials 1. An Introduction to their Properties and Applications. Second Edition. Department of Engineering, University of Cambridge, UK. ISBN 0 7506 3081 7. p 131 – 140, 1996.
2. Bailey, N., Weldability of Ferritic Steels. The Welding Institute, 1995.
3. Barreiro, A., Aceros especiales, 3ª. Editorial Madrid, 1966.
4. Bang I.; Son, Y.; Oh, K.; Kin, Y.; Kim, W., Numerical Simulation of Sleeve Repair Welding of In-Service Gas Pipelines. Welding Research Supplement, Welding Journal, p. 273 – 282, December 2002.
5. Burgos, S., Tecnología de soldadura. Editorial Pueblo y Educación. 1987.
6. Cisilino, A.; Chapetti, M.; Otegui, J., Minimum thickness for circumferential sleeve repair fillet welds in corroded gas pipelines. International Journal of Pressure Vessel and Piping, v. 79, p. 67 – 76, 2000.
7. EL- Hebeary, R., Shennawy, M. y Abdel - Aziz, A., Control del Riesgo de Hidrógeno Inducido en grietas de la Soldadura del Acero, 2004 IIW. Congreso Internacional, 19 - 33, Cairo, Egipto 2004.
8. Fournier, D.; Roger, J.; Bellouati, A. Boué, C. Stam H. y Lakestani, F.; Analytical Science. Vol 17. s 158 - s160, 2001.
9. Gianetto, J.; Bowker, A.; Bouchard, R., Tensile and toughness properties of pipeline girth welds. 2006.
10. Giraldo, J.; Chaves, C., El agrietamiento Inducido por Hidrógeno en Soldadura de Acero, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, 2004.
11. González, V., Manual de soldadura a fuego. Plátano Editora. Lisboa. 1978. 198 p
12. Harvey, P.; William, A., Study of Synergistic effect of Erosion and Corrosion of TiN and CrN Hard Coatings on AISI 1045 Mild Steel. Scientia et Technica Año XVI, No 38, ISSN 0122-1701, 2008.
13. Ishikawa, N.; Shinmiya, T.; Igi, s., Toughness evaluation on seam HAZ of high strength linepipe. 2006.
14. James, M., y Back, O., Medidas no destructivas cuantitativas de Tensiones Residuales. CRC, Revisión crítica en ciencias de los materiales en estado sólido. Vol. 9, Issue 1. 1980.



15. James, M., Handbook of Measurement of Residual Stresses, Edited by J. Lu, Society for Experimental Mechanics, Inc., pp. 1 - 4. 1996.
16. Ju, Jang-Bog, Kwon, Dongil. The effect of microstructural change on fracture behavior in heat-affected zone of API 5L pipeline steel. 2002.
17. Lancaster, J., Metalurgia de la soldadura. Sixth Ed., 256 - 268, Woodhead Publishing, Abington Cambridge, England. 1999.
18. Macherauch, E.; Kloos, K., Conferencia en ciencia y tecnología de tensiones residuales. Vol. 1, Garmisch-Partenkirchen, DGM - Verlag, Oberursel, pp. 3 - 26. 1986.
19. Maroef, I.; Olson; D. L., Eberhart; M., y Edwards; G., Hidrógeno atrapado en la soldadura de un acero ferrítico. Revisión Internacional de materiales. 47 (4), 191-223. 2002.
20. Masubuchi, K., Análisis de estructuras soldadas. Pergamon Press, Elmsford, N. Y. 1980.
21. Mathar, J., Transacciones ASME, 56, (4), pp. 249 - 254. 1934.
22. Meyer, H., Grietas Laminares en Construcciones Soldadas. II Conf. On Significance of Defecte in Welds, Welding Inst. London. 1968.
23. Nangel, D., Tensión y propiedades de deformación de aceros estructurales en la dirección del espesor. Metal Const. Nro 2, Vol. 64. 1969.
24. Nolan, D.; Sterjovski, Z.; Dunne, D., Hardness prediction models based on HAZ simulation for in - service welded pipeline steels. Science and Technology of Welding and Joining, v. 6, n. 10, p. 681 - 694. 2005.
25. Oddy, A.; McDill, J., Burn through prediction in pipeline welding. International Journal of Fracture, v. 97, n. 4, p. 249 - 261, 1999.
26. Ortega, R.; Franco, C.; Valdés, E.; Rodríguez, G., Dispersión Asistida por Magnetron en Películas de TiN. Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapac., vol. 13 N- 2, pag 31-38, 2005.
27. Paris, P.; Twenty years of reflection on question involving fatigue crack growth. Fatigue threshold, London. 1982.
28. Park, Y.; Maroef, I.; Landau, A.; Olson, D., Retained Austenite as a Hydrogen Trap in Steel Welds, Welding Journal, February, 27s - 35s. 2002.



29. Quintero, M.; Cerpa, S.; Mejias, G.; León, J.; Quintero, A., Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 56 (4) 1 – 3, 2006.
30. Pitrun, M., The Effect of Welding Parameters on Levels of Diffusible Hydrogen in Weld Metal Deposited Using Gas Shielding Rutile Flux Cored Wires, doctorate thesis, The University of Wollongong, Dpt. of Materials Engineering. 2004.
31. Ramírez, G., Introducción a la técnica de ensayo no destructivos, Ed. Instituto Nacional de técnicas aeroespaciales, Madrid, 1980.
32. Rodríguez, H. Metalurgia de la Soldadura. Edit Pueblo y Educación 1983. 613 pp.
33. Stout, R.; Doty, W., Weldability of Steels. Welding Research Council, 1971.
34. Seferian, D., Metalurgia de la soldadura. Editorial Revolucionaria. 1967. 397 pp.
35. Talero, J.; Muñoz, M., Introducción al cálculo de estructuras metálicas según Eurocódigo 3. 1^{era} Edición corregida. España. 2000.
36. Taylor, L., Aspectos metalúrgicos de las propiedades mecánicas de metales soldados. Weld and Metal const. Nro 5. 1975.
37. Watanabe, M., Grietas laminares. Welding in Shipbuilding. Welding Inst. London. 1962.
38. Walther, H.; Fournier, G.; Krapez, J.; LuuKKala, M.; Schmitz, B.; Sibilia, C.; Stamm H y Thoen, J., Analytical Science. Vol 17. s165 - s168, 2001.
39. Wormigton, H., Grietas laminares en Planchas de Acero calmados con Silicio. Weld and Metal Const. Nro 9, Vol. 35, 1967.
40. Zuñiga, R., Tecnología de la soldadura eléctrica por fusión. Edit Pueblo y Educación. 350 pp. 1987.