

<CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ANÁLISIS DE DEFECTOS Y COMO EVITARLOS EN SOLDADURAS DE ARCO SMAW Y SAW LONGITUDINALES Y CIRCUNFERENCIALES EN DUCTOS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.

POR

ANGEL MURILLO SIGERO

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

VILLAHERMOSA, TABASCO A JUNIO DE 2010

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ANÁLISIS DE DEFECTOS Y COMO EVITARLOS EN SOLDADURAS DE ARCO SMAW Y SAW LONGITUDINALES Y CIRCUNFERENCIALES EN DUCTOS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.

POR

ANGEL MURILLO SIGERO

MONOGRAFÍA

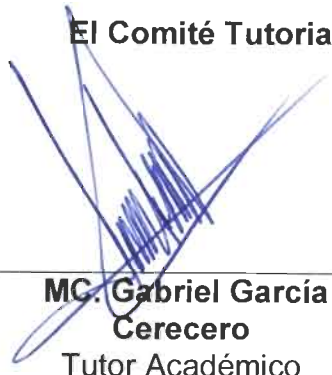
EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

VILLAHERMOSA, TABASCO A JUNIO DE 2010

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía “ANÁLISIS DE DEFECTOS Y COMO EVITARLOS EN SOLDADURAS DE ARCO SMAW Y SAW LONGITUDINALES Y CIRCUNFERENCIALES EN DUCTOS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS”, realizada por el alumno ANGEL MURILLO SIGERO, con número de matrícula 09ES-088 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



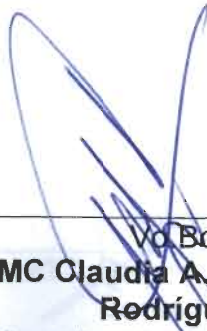
**MC. Gabriel García
Cerecero**
Tutor Académico



M. en I. Eloy Pérez Baruch
Tutor en Planta



**Dr. Felipe Arturo Reyes
Valdés**
Asesor



**Vo. Bo.
MC Claudia A. González
Rodríguez**
Coordinador de Posgrado

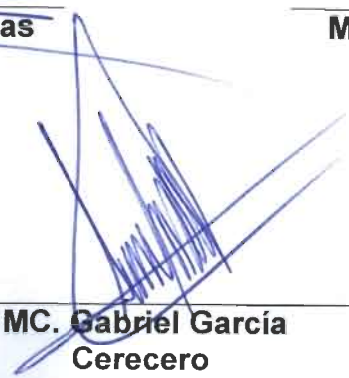
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Postgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **ANGEL MURILLO SIGERO**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **“ANÁLISIS DE DEFECTOS Y COMO EVITARLOS EN SOLDADURAS DE ARCO SMAW Y SAW LONGITUDINALES Y CIRCUNFERENCIALES EN DUCTOS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS”**, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 26 días del mes de Junio del 2010.


Dr. Efraín Almanza Casas
Presidente


MC. Víctor Hugo López Cortez
Secretario


MC. Gabriel García Cerecero
Vocal

AGRADECIMIENTOS

Esta monografía se la dedico en primera instancia a mi Esposa Gabriela a mis hijos, Yessica, Angel Mario y Mónica que me dieron su apoyo incondicional para sacar adelante esta especialidad, porque son ellos los que me impulsaron día con día, a Dios por darme la fortaleza y bendiciones diariamente hasta el día de hoy.

A todos mis maestros y amigos que nos guiaron y nos dieron luz para llegar al término de esta especialidad.

A Pemex Exploración y Producción que en el afán de mejorar la experiencia y capacidad técnica de sus empleados, promovió este proyecto con el apoyo incondicional.

Al M. en I. Eloy Pérez Baruch por brindarme su apoyo profesional, laboral y que desde el principio confió en darme la oportunidad de participar en este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|---|----------|
| SINTESIS | 1 |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | |
| 1.1 Antecedentes | 2 |
| 1.2 Planteamiento del problema | 2 |
| 1.3 Objetivo | 3 |
| 1.4 Justificación | 4 |
| 1.5 Alcance | 4 |
| CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE | |
| 2.1 Clasificación de los procesos de Soldadura | 5 |
| 2.2 Proceso de soldadura por arco de metal protegido (SMAW) | 6 |
| 2.2.1 Descripción General | 6 |
| 2.2.2 Aplicaciones | 7 |
| 2.3 Proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) | 7 |
| 2.3.1 Descripción General | 7 |
| 2.3.2 Aplicaciones | 8 |
| 2.4 Defectos en soldadura | 8 |
| 2.4.1 Clasificación | 8 |
| 2.4.1.1 Instituto Internacional de Soldadura (IIW) | 9 |
| 2.4.1.2 ASM HANDBOOK | 10 |
| 2.4.1.3 API 1104 | 11 |
| 2.5 Causas de los defectos en soldadura | 18 |
| 2.5.1 Agrietamiento por golpe de arco | 18 |
| 2.5.2 Agrietamiento bajo cordón de soldadura | 20 |
| 2.5.3 Agrietamiento Retardado | 22 |
| 2.5.4 Socavado | 23 |
| 2.5.5 Inclusiones de escoria | 24 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 2.5.6 | Porosidad | 25 |
| 2.5.7 | Falta de fusión y penetración | 27 |
| 2.6 | Reparación de defectos en soldaduras | 28 |
| 2.6.1 | Pasos de reparación | 29 |
| 2.6.2 | Remoción de defectos | 30 |
| | CAPÍTULO 3. DISCUSION Y ANALISIS DE BIBLIOGRAFÍA | 32 |
| | CAPÍTULO 4. CASOS DE ESTUDIO | 35 |
| 4.1 | Análisis de falla de un Oleoducto ^[2] | 35 |
| 4.2 | Método que proporciona a soldadores una nueva técnica para Evitar el Golpe de Arco. | 37 |
| | CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES. | 44 |
| | BIBLIOGRAFÍA. | 46 |
| | LISTADO DE TABLAS | 49 |
| | LISTADO DE FIGURAS | 50 |
| | RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO | 52 |

SÍNTESIS

Se pretende en la presente monografía investigar, analizar y concluir información referente a las causas de los defectos en soldaduras a tope y de filete, longitudinales y circunferenciales.

Las investigaciones están encaminadas a conocer todos los defectos, sus causas y como evitarlos, con el objeto de asegurar la integridad de las soldaduras aplicadas por los procesos de Arco de metal y electrodo revestido (SMAW) y arco sumergido (SAW), en los ductos de acero al carbono de transporte de hidrocarburos en PEMEX Exploración y Producción.

Además se incluye el análisis de dos casos de estudio, el primero referente a un análisis de falla de un oleoducto y el segundo referente a un tipo de defecto similar al golpe de arco, pero este no provocado por la falta de habilidad del soldador, sino por Inestabilidad del arco en la soldadura, producto de la presencia de campos magnéticos en las inmediaciones del bisel, llamado efecto del magnetismo residual.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES.

La empresa petrolera Mexicana, en una de sus 5 Subsidiarias denominada Pemex Exploración y Producción, tiene un censo de ductos en kilómetros hasta el año 2008 de 4,548 km de oleoductos y 7,896 km de gasoductos.

Por estos ductos se transporta una producción diaria de 2.792 millones de barriles de aceite crudo y 6,919 millones de pies cúbicos de gas, que proviene de 344 campos de producción, 6,382 pozos y 225 plataformas marinas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En PEMEX diariamente se transporta una producción de 2.792 millones de barriles de aceite crudo y 6,919 millones de pies cúbicos de gas a través de una gran red de ductos ubicados en el sureste, zona marina noreste y zona noroeste del país, hacia diferentes centros de proceso como son petroquímicas y refinerías, esta producción proviene de 344 campos petroleros, 6,382 pozos y 225 plataformas marinas.^[10]

En números estimados, alrededor de 2,000 barriles de crudo y 35 toneladas de gas se derramaron y fugaron al medio ambiente en el año 2008, tan solo en la

subsidiaria PEMEX Exploración y Producción, que ocasionaron impactos en la biodiversidad, suelos o cuerpos de agua.^[9]

Para PEMEX es de vital importancia reducir estas cifras al mínimo posible y un factor muy importante es el control de calidad en sus procesos de construcción de nuevos ductos de acero al carbono, especialmente el de las soldaduras por arco, que es la parte esencial en materia de procesos constructivos.

Tabla 1. Derrames y fugas ocurridas en el año 2008 en Pemex Exploración y Producción^[8].

| Organismo Subsidiario | Derrames (Líquidos) | | | Fugas (Gases) | |
|--------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|
| | Número registrado | Volumen* derramado (barriles) | Cantidad* derramada (toneladas) | Número registrado | Cantidad* fugada (toneladas) |
| Pemex Exploración y Producción | 152 | 2,008 | 280 | 65 | 35 |

*Cantidad estimada

1.3 OBJETIVO.

Realizar la recopilación de información técnica e información de nuevas investigaciones, referente a los defectos que se pueden producir durante los procesos de Arco de metal y electrodo revestido (SMAW) y arco sumergido (SAW), su clasificación según la normatividad y literatura disponible; así como las mejores prácticas para evitarlos.

Lo anterior, para asegurar la integridad mecánica de las soldaduras longitudinales y circunferenciales a tope y de filete en la construcción de nuevos ductos de transporte de hidrocarburos de PEMEX.

Lo anterior tendrá como finalidad el incremento de la eficiencia operacional y reducción de accidentes por fallas en soldaduras.

1.4 JUSTIFICACION

Petróleos Mexicanos (PEMEX) cumplió 70 años de ser la empresa petrolera de los mexicanos, consciente del reto de garantizar el abasto de energéticos, petrolíferos y petroquímicos básicos suficientes, de calidad y con estrictas normas para la protección del medio ambiente.

Para Petróleos Mexicanos, mantener y operar la infraestructura, es una prioridad que le permite salvaguardar la seguridad y la protección ambiental del entorno de sus operaciones.

El resultado de este análisis bibliográfico y/o estado del arte nos va a permitir concentrar una fuente de información de consulta rápida y confiable de los diferentes tipos de defectos en soldaduras por arco de los procesos SMAW Y SAW, el porqué se originan estos y las técnicas y/o procedimientos para evitarlos.

Por lo anterior y en virtud de que los accidentes (fugas y/o derrames) suceden durante los procesos de producción, distribución, almacenamiento y consumo, es de suma importancia prevenir, durante la etapa de fabricación de tubería de línea de acero al carbono y construcción de ductos para el transporte de hidrocarburos, los defectos en soldaduras longitudinales y circunferenciales.

1.5 ALCANCE

Investigar y obtener información de las causas de los defectos en soldaduras realizadas por el proceso de arco de metal protegido (SMAW) y doble arco sumergido (SAW), que son los procesos comúnmente utilizados en la construcción de tubería de línea y ductos de transporte de hidrocarburos, las medidas preventivas y correctivas requeridas para evitar su ocurrencia en las etapas de construcción y operación en ductos de transporte de hidrocarburos.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA ^[1].

Actualmente existen muchos procesos de soldadura, la Asociación Americana de Soldadura (American Welding Society.-AWS) ha reconocido y clasificado los procesos de soldadura en 6 grandes grupos, de acuerdo a la Figura 2.1.



Figura 2.1. Procesos de soldadura ^[20].

Para efectos de esta monografía, nos enfocaremos en los procesos de soldadura por arco de metal y electrodo revestido (Shield Metal Arc Welding, SMAW) y soldadura por arco sumergido (Submerged Arc Weld, SAW), dos de los procesos de soldadura más comunes en la fabricación de tubería de línea de acero al carbono y construcción de ductos de transporte de hidrocarburos.

2.2 PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO (SMAW).^[1]

2.2.1. Descripción general.

La soldadura de arco de metal y electrodo revestido (SMAW) es un proceso de soldadura de arco, en el cual la coalescencia de los metales es producida por calentamiento del arco eléctrico, que se genera entre la punta de un electrodo revestido y la superficie del metal base. El corazón del electrodo revestido consiste en una varilla de metal sólido o material vaciado. Este material conduce la corriente eléctrica hacia el arco y provee el llenado de material para la junta.

La primera función del revestimiento es proveer estabilidad de arco y proteger el metal fundido de la atmósfera, con gases, los cuales sirven como compuestos de cobertura resultantes del calor del arco eléctrico.

La soldadura de electrodo revestido es, por mucho, la más ampliamente usada de los diferentes procesos de soldadura de arco. Emplea el calor del arco para fundir el metal base y la punta del electrodo consumible, ver Figura 2.2.

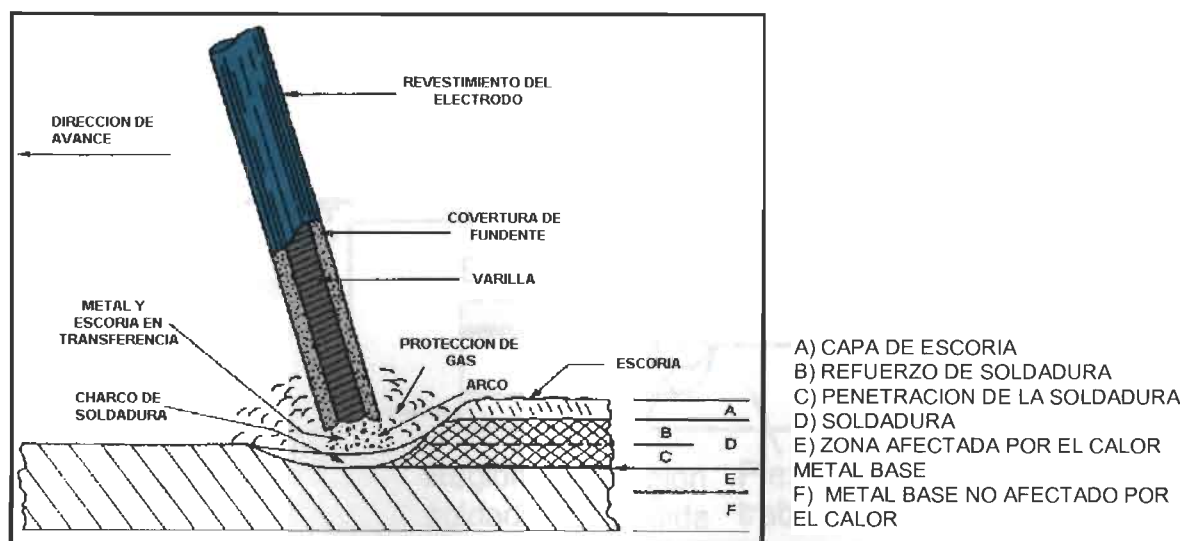


Figura 2.2. Proceso SMAW esquematizado ilustra el depósito de soldadura por electrodo revestido sobre placa de acero en una posición plana^[1].

2.2.2. Aplicaciones.

El proceso SMAW puede servir para unir la mayor parte de los metales y aleaciones comunes. La lista incluye los aceros al carbono, los de baja aleación, los aceros inoxidable y el hierro colado, así como el cobre, níquel y aluminio y sus aleaciones. La soldadura por arco de metal protegido también se usa para unir una amplia gama de materiales químicamente disimiles.

2.3 SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO (SAW).^[1]

2.3.1 Descripción general.

En la soldadura por arco sumergido, el extremo de un electrodo continuo de alambre desnudo se inserta en un montículo de fundente que cubre el área o la unión que se va a soldar (Figura 2.3). Se enciende un arco empleando uno de seis métodos de iniciación del arco. A continuación un mecanismo alimentador de alambre comienza a introducir el electrodo en la unión a una velocidad controlada y el alimentador se desplaza manual o automáticamente a lo largo de la soldadura. En la soldadura mecanizada o automática, el trabajo puede desplazarse debajo.

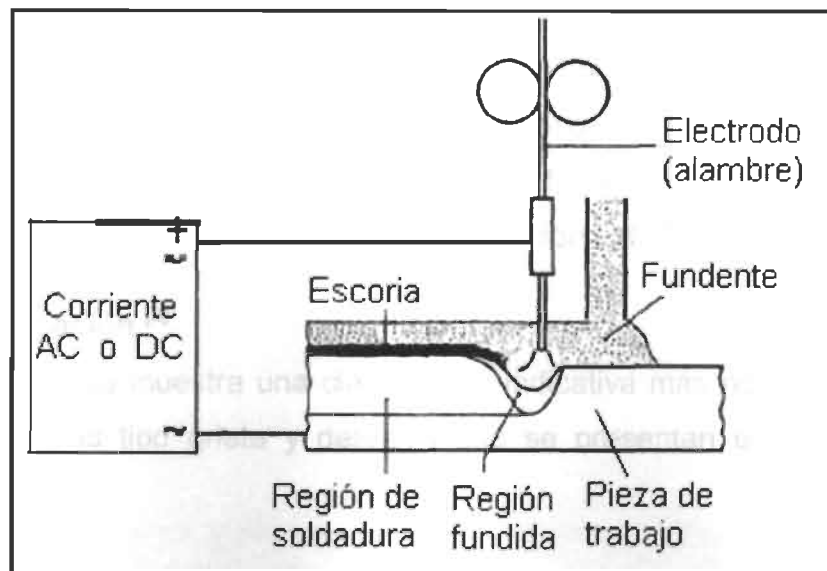


Figura 2.3. Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido.^[1]

2.3.2 Aplicaciones.

EL proceso de soldadura por arco sumergido (SAW), se usa en una amplia gama de aplicaciones industriales. La calidad de la soldadura, las elevadas tasas de deposición, la penetración profunda y la adaptabilidad a la operación automática hacen que el proceso sea apropiado para la fabricación de ensambles soldados. El proceso SAW se usa ampliamente en la fabricación de recipientes a presión, la construcción de barcos, barcasas y carros de ferrocarril, la fabricación de tuberías y la manufactura de miembros estructurales que requieren soldaduras largas. Algunas instalaciones industriales automatizadas producen en ensambles unidos con soldaduras cortas repetitivas.

2.4 DEFECTOS EN SOLDADURA.

Los defectos en soldaduras son diversos y se encuentran bien identificados y clasificados según la causa que los provoca y el tipo de falla consecuente si no se evitan durante la realización de una soldadura.

A continuación se revisará la bibliografía aplicable, que clasifica los defectos en soldaduras de arco tipo GMAW y SAW, la normatividad que los regula con el objetivo de evitarlos, también se revisará el estado del arte de las causas de defectos aún no tipificados por la reglamentación existente, como son los defectos que se producen por el efecto magnético residual en ductos causado por la inspección con equipo instrumentado por fuga de flujo magnético y por la polarización inducida de los sistemas de protección catódica.

2.4.1 Clasificación ^[2].

A continuación se muestra una clasificación indicativa más no limitativa de las principales fallas tipo grieta y defectos que se presentan en soldaduras de tuberías:

1. Agrietamiento por golpe de arco ^[2]

2. Agrietamiento bajo cordón de soldadura ^[2]
3. Agrietamiento retardado ^[2]
4. Agrietamiento por fatiga ^[4]
5. Agrietamiento por corrosión-esfuerzo ^[4]
6. Agrietamiento inducido por hidrogeno ^[4]
7. Agrietamiento por corrosión y sulfhídrico ^[4]
8. Socavado ^[4]
9. Inclusiones de escoria ^[4]
10. Porosidad ^[4]
11. Falta de fusión y de penetración ^[4]
12. Penetración excesiva ^[4]

INSTITUTO INTERNACIONAL DE SOLDADURA (I.I.W.), CLASIFICACIÓN DE DEFECTOS EN SOLDADURAS. ^[11]

Esta norma clasifica los defectos (Figura 2.4) de la siguiente forma:

Serie 100 - Fracturas. Longitudinales, transversales, radiales y en cráter.

Serie 200 – Cavidades. Bolsas de gas, porosidad interna, porosidad superficial.

Serie 300 – Inclusiones sólidas, escoria, fundente, óxidos metálicos y materiales extraños.

Serie 400 – Penetración o fusión incompleta.

Serie 500 – Forma imperfecta o contorno inaceptable, Socavado, refuerzo excesivo, falta de llenado, forma del chaflán.

Serie 600 – Defectos varios no incluidos anteriormente. Golpes de arco, salpicadura excesiva, superficie áspera.

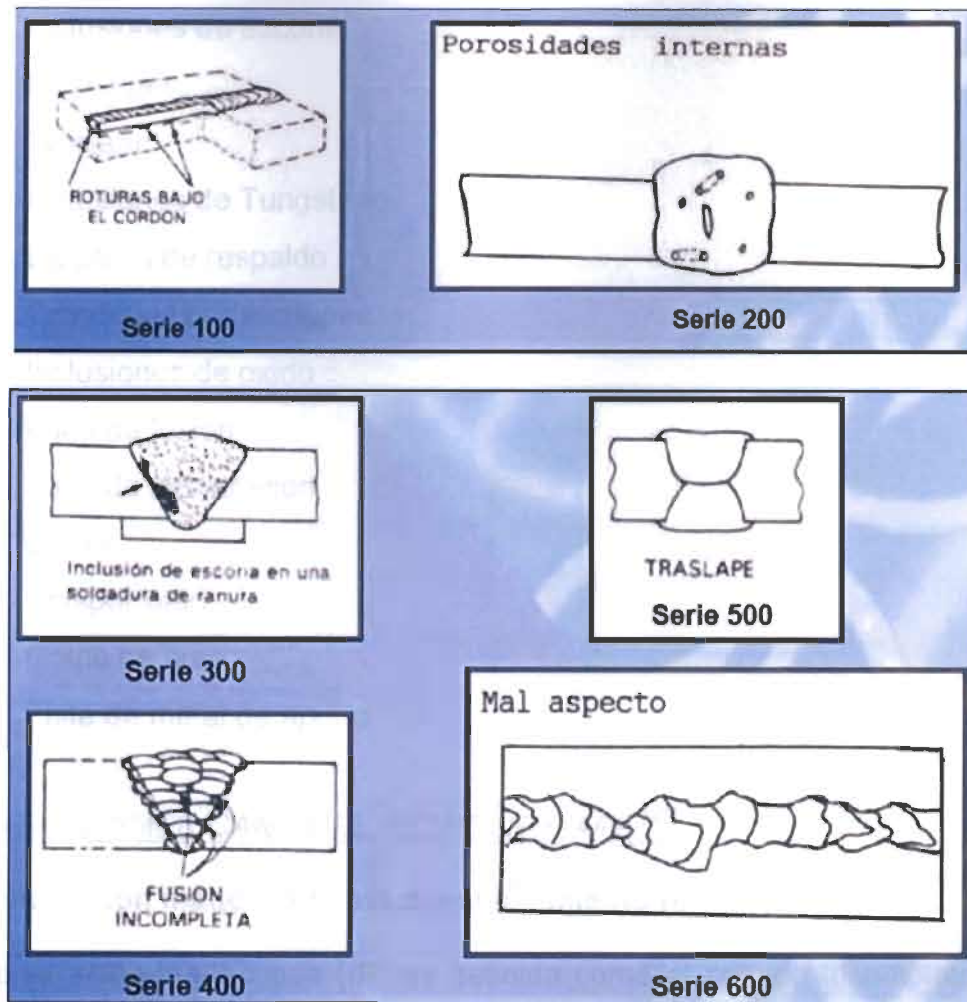


Figura 2.4. Clasificación de defectos, IAW ^[11]

ASM HANDBOOK VOL. 6. ^[13]

En este manual se describen los tipos de discontinuidades o defectos en soldaduras característicos, de los principales procesos de soldadura, también se adiciona información acerca de métodos comunes de inspección usados para detectar esos defectos.

Los defectos según el volumen 6 del *ASM HANDBOOK*, se clasifican de la forma siguiente:

- Socavado

- Inclusiones de escoria
- Porosidad
- Traslape
- Inclusiones de Tungsteno
- De placa de respaldo
- Cavidades por rechupes
- Inclusiones de oxido
- Falta de fusión
- Falta de penetración
- Cráter
- Chisporroteo
- Golpe de arco
- Falta de metal de aporte

INSTITUTO AMERICANO DEL PETROLEO (API) ^[12]

A) Penetración inadecuada sin desalineamiento (IP)

La penetración inadecuada (IP) es definida como el llenado incompleto de la raíz de la soldadura. Esta condición es mostrada esquemáticamente en la Figura 2.5. IP debe ser considerado como defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) La longitud de una indicación individual IP excede de 1 pulg (25 mm).
- b) La suma de las longitudes de las indicaciones IP en una longitud de cordón continuo de 12 pulg (300 mm) excede a 1 pulg (25 mm).
- c) La suma de las longitudes de las indicaciones IP exceden el 8 % de longitud en cualquier soldadura con menos de 12 pulg (300) de longitud de cordón.

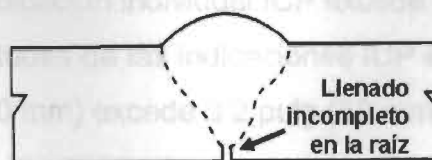


Figura 2.5. Penetración inadecuada sin desalineamiento (IP)

(NOTA: Una o ambas caras de la raíz pueden estar rellenas inadecuadamente en la superficie interior).

B) Penetración inadecuada debida a desalineamiento (IPD)

La penetración inadecuada debida a desalineamiento (IPD) es definido como la condición que existe cuando un canto de la raíz está descubierto porque la tubería adyacente o la preparación de junta están desalineadas. Esta condición es mostrada esquemáticamente en la Figura 2.6. IPD debe ser considerado un defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) La longitud de una indicación individual IPD excede de 2 pulg (50 mm).
- b) La suma de las longitudes de las indicaciones IPD en una longitud de cordón continuo de 12 pulg (300 mm) excede las 3 pulg (75 mm).

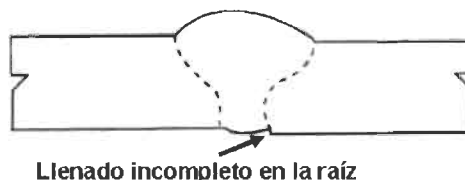


Figura 2.6. Penetración inadecuada debida a desalineamiento (IPD)

C) Penetración transversal inadecuada (ICP)

La penetración transversal inadecuada ICP es definida como una imperfección sub superficial entre el primer pase interno y el primer pase externo que es causado por la penetración inadecuada de las caras verticales. Esta condición es mostrada esquemáticamente en la Figura 2.7. ICP debe ser considerado defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) La longitud de una indicación individual ICP excede a 2 pulg (50 mm).
- b) La suma de las longitudes de las indicaciones ICP en una longitud de cordón continuo de 12 pulg (300 mm) excede a 2 pulg (50 mm).

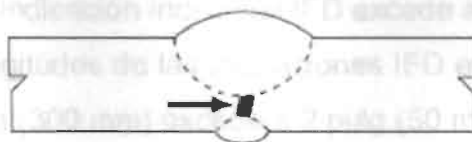
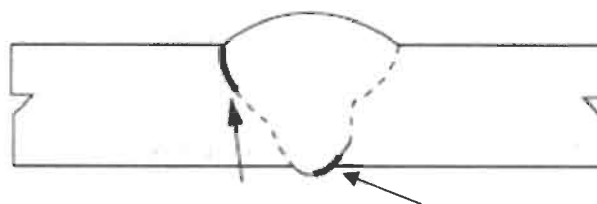


Figura 2.7. Penetración transversal inadecuada (ICP)

D) Fusión incompleta (IF)

La fusión incompleta (IF) es definido como una imperfección superficial entre el metal de soldadura y el material base que está abierto a la superficie. Esta condición es mostrada esquemáticamente en la Figura 2.8. IF debe ser considerado defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) La longitud de una indicación individual IF excede a 1 pulg (25 mm).
- b) La suma de las longitudes de las indicaciones IF en una longitud de cordón continuo de 12 pulg (300 mm) excede 1 pulg (25 mm).
- c) La suma de las longitudes de las indicaciones IF exceden el 8 % de longitud en cualquier soldadura con menos de 12 pulg (300) de longitud de cordón.



No hay unión, la imperfección está asociada a la superficie

Figura 2.8. Fusión incompleta (IF)

E) Fusión incompleta debida a traslape (IFD)

La fusión incompleta debida a traslape frío (IFD) es definida como una imperfección entre dos pases de soldadura adyacentes o entre el metal de soldadura y el metal base que no está abierto a la superficie. Esta condición es mostrada esquemáticamente en la Figura 2.9.

IFD debe ser considerado defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

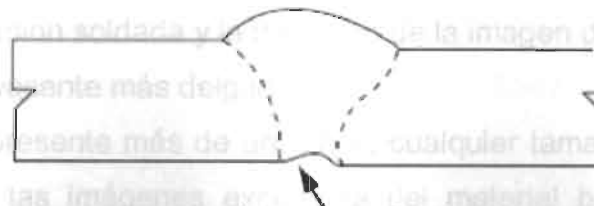
- a) La longitud de una indicación individual IFD excede a 2 pulg (50 mm).
- b) La suma de las longitudes de las indicaciones IFD en una longitud de cordón continuo de 12 pulg (300 mm) excede a 2 pulg (50 mm).
- c) La suma de las longitudes de indicaciones IFD exceden el 8% de la longitud del cordón.



Traslape frío entre cordones y Traslape frío entre el cordón de soldadura y el material base
Figura 2.9. Fusión incompleta debida a traslape (IFD)

F) Concavidad interna (IC)

Un cordón que ha sido fundido adecuadamente y que ha penetrado completamente el espesor de la tubería a lo largo de ambos lados del bisel pero cuyo centro está más abajo de la superficie interior de la pared de la tubería. La magnitud de la concavidad es la distancia perpendicular entre una extensión axial de la superficie de la pared de la tubería y el punto más bajo de la superficie del cordón soldado, es mostrado esquemáticamente en la Figura 2.10. Cualquier longitud de IC es aceptable si la densidad de la imagen radiográfica en la IC no excede a la del material base más delgado. En áreas donde se excede la densidad del material base más delgado, se aplicará el criterio para quemada pasante (BT).



El cordón de raíz funde en ambas superficies, pero el centro del pase de raíz está ligeramente bajo la superficie interior de la tubería.

Figura 2.10. Concavidad interna (IC)

G) Quemada Pasante (BT)

Una quemada pasante (BT) es definida como una porción del pase de raíz donde una excesiva penetración ha causado que el baño de soldadura penetre hacia el interior del tubo (provocando un agujero o perforación en el cordón).

Para tuberías con un diámetro exterior mayor o igual que 2,375 pulg (60,3 mm), un BT debe ser considerado defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) Cuando la máxima dimensión excede a $\frac{1}{4}$ pulg (6 mm) y la densidad de la imagen de BT excede la del material base adyacente más delgado.
- b) Cuando la máxima dimensión excede al menor de los espesores de pared nominales de la unión soldada y la densidad de la imagen de BT excede a la del material base adyacente más delgado.
- c) Cuando la suma de las máximas dimensiones de BTs separados, cuyas densidades de imagen exceden a la del material base adyacente más delgado, es mayor a $\frac{1}{2}$ pulg (13 mm) medido en una porción continua de cordón de soldadura de 12 pulg (300 mm), o medido a lo largo del total de la longitud de soldadura, cualquiera sea la menor.

Para tuberías con un diámetro exterior menor que 2,375 pulg (60,3 mm), un BT debe ser considerado defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) Cuando la máxima dimensión excede $\frac{1}{4}$ pulg (6 mm) y la densidad de la imagen de BT excede a la del material base adyacente más delgado.
- b) Cuando la máxima dimensión excede al menor de los espesores de pared nominales de la unión soldada y la densidad de la imagen de BT excede a la del material base adyacente más delgado.
- c) Cuando esté presente más de un BT de cualquier tamaño y la densidad de más de una de las imágenes exceda la del material base adyacente más delgado.

H) Inclusiones de escoria

Una inclusión de escoria es definida como un sólido no metálico atrapado en el metal depositado o entre el metal base y el metal depositado. Inclusiones de escoria alargadas (ESIs) por ejemplo, líneas de escoria continua o entrecortada, son encontradas usualmente en la zona de fusión. Las inclusiones de escoria aisladas (ISIs) son formadas irregularmente y pueden ser localizadas en cualquier lugar de la soldadura. Para propósitos de evaluación, cuando se mida el tamaño de una indicación radiográfica, la máxima dimensión de la indicación debe ser considerada como su longitud.

Para tuberías con un diámetro exterior mayor o igual que 2,375 pulg (60,3 mm), una inclusión de escoria debe ser considerada defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) La longitud de una indicación ESI excede las 2 pulg (50 mm).
- b) Cuando la suma de las longitudes de las indicaciones ESI en cualquier tramo continuo de 12 pulg (300 mm) de cordón de soldadura excede a 2 pulg (50 mm).
- c) Cuando el ancho de una indicación ESI excede a 1/16 pulg (1,6 mm).
- d) Cuando la suma de las longitudes de las indicaciones ISI en cualquier tramo continuo de 12 pulg (300 mm) de cordón de soldadura excede a 1/2 pulg (13 mm).
- e) Cuando el ancho de una indicación ISI excede a 1/8 pulg (3 mm).
- f) Cuando más de cuatro indicaciones ISI con el máximo ancho de 1/8 pulg (3 mm) están presentes en cualquier tramo continuo de 12 pulg (300 mm) de cordón de soldadura.
- g) Cuando las longitudes sumadas de indicaciones ESI e ISI exceden el 8 % de la longitud soldada.

Para tuberías con un diámetro exterior menor que 2,375 pulg (60,3 mm), una inclusión de escoria debe ser considerada defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) Cuando la longitud de una indicación ESI excede a tres veces al espesor nominal de pared más delgado de la junta.
- b) Cuando el ancho de una indicación ESI excede a 1/16 pulg (1,6 mm)
- c) Cuando las longitudes sumadas de indicaciones ISI excede dos veces al espesor de pared nominal más delgado de la unión soldada y el ancho excede a la mitad del espesor de pared nominal más delgado de la unión
- d) Cuando la suma de las longitudes de las indicaciones ESI e ISI exceden el 8 % de la longitud soldada.

I) Porosidad

La porosidad es definida como un gas atrapado por solidificación del metal soldado antes de que el gas tenga la oportunidad de ascender a la superficie del baño fundido y escapar. Las porosidades son generalmente esféricas pero pueden ser elongadas o de forma irregular, tales como las porosidades alargadas (agujeros de gusano).

F) Grietas (C)

Las grietas (C) deben ser consideradas defectos si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) Cuando la grieta de cualquier tamaño o localización dentro de la soldadura, no es una fisura de cráter o una fisura de estrella.
- b) Cuando la grieta es una grieta de cráter o grieta de estrella con una longitud superior a $5/32$ pulg (4 mm).

G) Socavado

El socavado es definido como un canal fundido dentro del material base adyacente a la base o raíz de la soldadura y que no es llenado por el metal de aporte. La socavación adyacente al pase de acabado (EU) o al pase de raíz (IU) debe ser considerada como un defecto si existe alguna de las siguientes condiciones:

- a) Cuando la suma de las longitudes de indicaciones de socavaciones EU e IU, en cualquier combinación, en cualquier tramo continuo de 12 pulg (300 mm) excede a 2 pulg (50 mm).
- b) Cuando la suma de las longitudes de indicaciones de socavaciones EU e IU, en cualquier combinación, excede un sexto de la longitud soldada.

2.5 CAUSAS DE LOS DEFECTOS EN SOLDADURA

2.5.1. Agrietamiento por golpe de arco ^[2].

Hay muchas razones por las que ocurre agrietamiento en la soldadura y en la zona adyacente a la misma conocida como zona afectada por el calor (ZAC), una causa de agrietamiento conocida es cuando sin la debida atención se realiza el arco eléctrico fuera de la ranura de la soldadura.

El defecto se representa como una ZAC localizada o un cambio en el contorno de la superficie de la soldadura terminada causada por el golpe de arco. Un golpe de arco también puede ser resultado de la producción de calor por el paso de una corriente eléctrica, un golpe de arco también tiende a producir endurecimiento, particularmente en aceros de alto carbono y aceros de alta aleación ^[4]. Figura 2.11.



Figura 2.11. Ejemplo de un golpe de arco ^[6]

Cuando el arco se realiza, el metal con el que se pone en contacto es calentado rápidamente, entonces cuando el arco es retirado el metal se enfría rápidamente; causando un revenido del material. Esto afecta únicamente una pequeña parte de volumen de metal, el resto no es calentado considerablemente.

Entonces, cuando el contenido de carbono en el acero es bastante alto, si este se calienta por encima de la temperatura crítica, a como lo hace un golpe de arco, el revenido tiene como resultado la formación de martensita.

La Martensita se puede formar en aceros de bajo carbono si el revenido es bastante drástico. Con la adición de elementos aleantes, la martensita se formará en un contenido de bajo carbono y en un rango de enfriamiento lento, Figura 2.12.

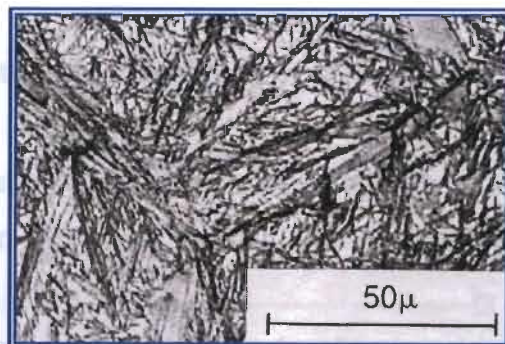


Figura 2.12. Microestructura martensítica, correspondiente a un acero al carbono cuyo contenido de carbono es de 1.22% ^[2]

La martensita se forma durante el enfriamiento del metal a cierta temperatura debajo de 371°C , el metal que se ha formado en martensita se expande. Esta expansión del metal resulta en esfuerzos internos que pueden causar pequeñas micro grietas que pueden ocurrir justamente debajo de la superficie.

Si el arco es golpeado en el área sobre la cual el condón va hacer depositado, el metal que está bajo esfuerzos o posiblemente agrietado es fusionado rápidamente después del depósito del cordón de soldadura, esta acción elimina el problema. De otra forma si el cordón es golpeado fuera de la zona de soldadura los esfuerzos y los agrietamientos quedarán como remanentes.

Si el agrietamiento resultante de un golpe de arco aparece en la superficie, un cordón de soldadura debe ser depositado sobre este agrietamiento. El cordón de soldadura deberá tener de un tamaño razonablemente largo y ancho para incrementar el suficiente calor de aporte en el área con el defecto, cuidando reducir la velocidad de enfriamiento de la soldadura.

Los esfuerzos residuales pueden ser corregidos con un tratamiento térmico posterior. Una manera más efectiva para prevenir la ocurrencia de estos esfuerzos y agrietamientos es precalentar de tal forma que la velocidad de enfriamiento sea lenta. Claro que la regla a seguir es nunca dar un golpe de arco fuera de la unión a soldar.

2.5.2. Agrietamiento bajo cordón de soldadura ^[2]

Esta forma de agrietamiento ocurre en el metal base a muy corta distancia de la línea de fusión. Esto ocurre en aceros de baja y alta aleación, Figura 2.13.

Los factores responsables de esta forma de agrietamiento no son completamente conocidos, se sabe que el hidrógeno disuelto puede estar presente.

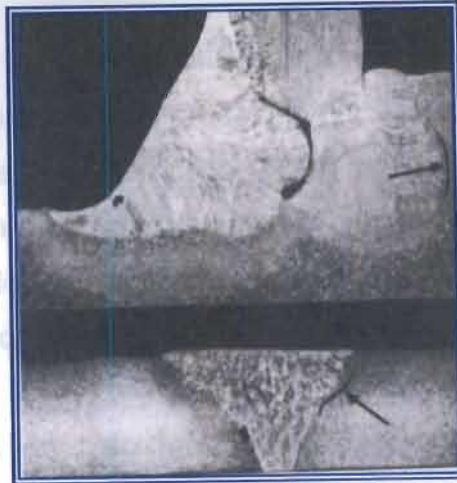


Figura 2.13. Ejemplo de agrietamiento bajo el cordón de soldadura ^[2].

Se sabe que el agrietamiento bajo cordón es el resultado de:

1. Cuando la contracción es igual en el metal base y en la soldadura.
2. Cuando existe restricción al enfriamiento en el metal base.
3. Cuando el esfuerzo es causado por la expansión del metal cuando se forma la martensita.
4. Aumento del agrietamiento por la precipitación del hidrógeno del formando hidrógeno molecular.

La presencia de hidrógeno en las soldaduras actúa como un factor para iniciar la formación de esas grietas.

Las grietas ocurren en la superficie del metal y cuando la tubería es puesta en operación, el crecimiento de las mismas es muy rápido causando la falla de la unión soldada.

Desde que se tiene conocimiento que la presencia de hidrogeno es la principal causa de agrietamiento bajo cordón, en la medida de lo posible se deberá prevenir la presencia de hidrogeno en la soldadura. Este puede entrar desde la atmósfera, por el recubrimiento de los electrodos y por la humedad.

Para prevenir que el hidrogeno entre por la atmosfera, el metal fundido debe siempre ser protegido por el gas producido por el recubrimiento del electrodo o en caso de soldadura por el proceso GTAW por un gas inerte. Electrodo de bajo hidrogeno están diseñado con un recubrimiento que contiene únicamente pequeñas trazas de hidrógeno. El uso de estos electrodos elimina agrietamientos bajo cordones.

Una principal causa de hidrogeno de soldadura es la humedad. Algunos soldadores gustan sumergir sus electrodos en agua para obtener un mejor arco eléctrico, esta práctica no debe ser permitida. El recubrimiento del electrodo se debe proteger de cualquier tipo de defecto antes de realizar la soldadura, la unión a soldar deberá estar seca y nunca deberá ser realizada durante la lluvia o nieve.

Si el metal base se enfría muy lentamente, algo de hidrogeno que ha sido disuelto tendrá oportunidad de escapar de la soldadura por precipitación. Por esta razón, un precalentamiento del metal antes de soldar ayuda a prevenir agrietamientos bajo cordón. El precalentamiento deberá prevenir la formación de martensita, eliminando unos de los factores que contribuyen el agrietamiento.

Con un precalentamiento se ayuda a eliminar esfuerzos atrapados en el metal si este es efectivo se previene el agrietamiento.

2.5.3. Agrietamiento Retardado.

El agrietamiento retardado esta usualmente asociado con soldaduras hechas en materiales de pequeños espesores. Esta forma de agrietamiento ocurre en el cordón de soldadura y es causado, en parte, por el patrón de solidificación y enfriamiento de la soldadura. Porque el metal base es mucho mas frio que la

soldadura, la solidificación progresa desde la línea de fusión hacia dentro. Por esta razón el centro de la soldadura está a una temperatura más alta que el resto de la soldadura.

2.5.4. Socavado.

Es cuando el metal base es reducido de su espesor original por el proceso de una soldadura, Figura 2.14.

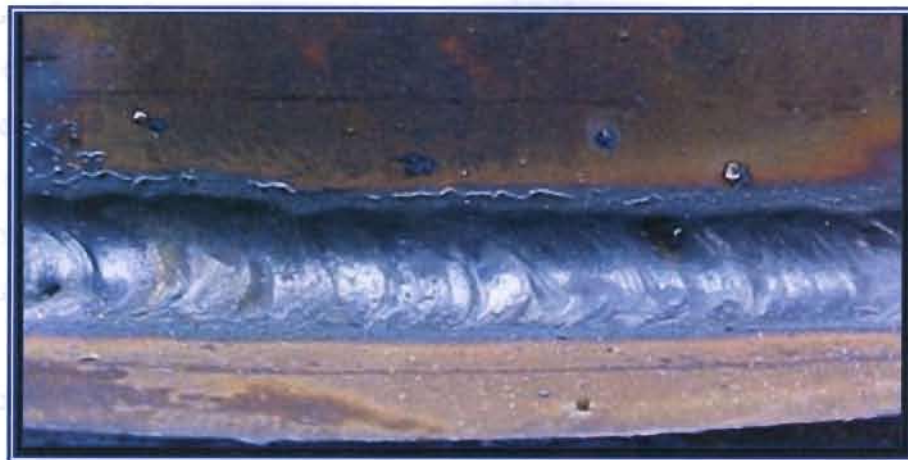


Figura 2.14, Socavado en soldadura ^[21]

El exceso de corriente puede causar los socavados en la soldadura dejando un surco que se define como socavados en la soldadura. Esto puede ocurrir en varios grados de severidad; con una longitud de arco normal, el socavado puede ocurrir si el electrodo no es manipulado con un maneral para suministrar en cantidad adecuada el metal de aporte a las orillas en la soldadura, el arco debe ser pausado en las orillas depositando metal y suministrando calor adicional a esa área.

Pausando en las orillas de la soldadura se obtiene un efecto en el metal con lo cual se obtiene una mejor mezcla del metal base y del metal de aporte. El uso de metal de aporte incorrecto puede provocar el socavado debido a que si el electrodo usado es de diferente composición, la solidificación y enfriamiento de

la soldadura se llevará a cabo a diferente temperatura y por esta razón la composición del metal de aporte debe ser siempre la especificada.

En resumen el socavado es causado por una o varias combinaciones de los siguientes factores:

1. Exceso de corriente de soldadura.
2. Incorrecta manipulación de electrodos.
3. Usando un incorrecto proceso de soldadura como el usar metales de aporte de mala composición.
4. Electrodo con ángulo de electrodo muy pequeño.
5. Longitud de arco muy largo.
6. Velocidad de avance muy lenta.
7. Usar electrodos defectuosos.

2.5.5. Inclusiones de escoria.

Pueden tener un serio y adverso efecto en la calidad de soldadura. Usualmente la escoria viene del recubrimiento del electrodo, en algunas ocasiones las partículas de escoria aparecen en el metal base y pueden ser retenidas en la soldadura.

Esas inclusiones de escoria frecuentemente a parecen al final de una soldadura si el procedimiento de soldadura correcto no es usado. La fundición de la escoria brilla más que el metal base y sube a la superficie del charco de fundición rápidamente formando una capa que cubre el metal. La escoria solidifica a temperatura más baja que el metal entonces cuando una parte del relleno no es completado con el metal y tiene un contorno redondeado la escoria se deposita en esa cavidad. Cuando el metal solidifica mas escoria se formará en la orilla y formara una adhesión de inclusiones.

Durante la oscilación, el arco debe pausarse en la orilla de la junta para proveer suficiente calor en esta área para que esta no enfrie muy rápido y depositara metal de aporte adicional a la superficie de la junta de metal líquido y solido sin que a parezca socavado. Por este método cualquier escoria atrapada previamente será fundida nuevamente y tendrá tiempo suficiente para surgir a la superficie de la soldadura.

2.5.6. Porosidad.

La porosidad es causada por la presencia de aceite, grasa o humedad en la soldadura que forma de burbujas de gas que quedan atrapadas durante el enfriamiento. La porosidad puede a parecer en formas de largos agujeros redondos o de pequeñas burbujas, Figura 2.15.



Figura 2.15 Porosidad en soldadura ^[21]

Los tipos de porosidad en soldadura están generalmente designados por la cantidad y distribución de los poros, estos se clasifican como sigue ^[13]:

- Porosidad uniforme dispersa, Fig 2.16

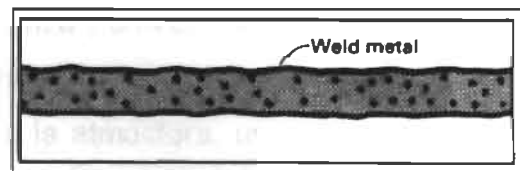


Figura 2.16

- Porosidad por inclusiones, Figura 2.17

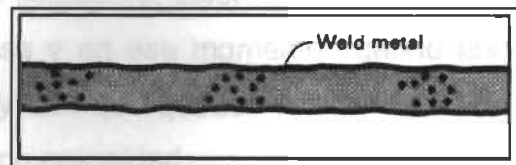


Figura
2.17

- Porosidad lineal, Figura 2.18

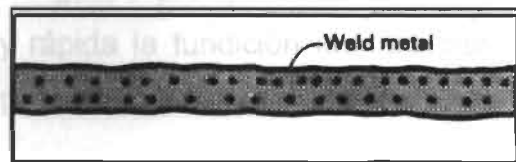


Figura
2.18

- Porosidad alargada, Figura 2.19

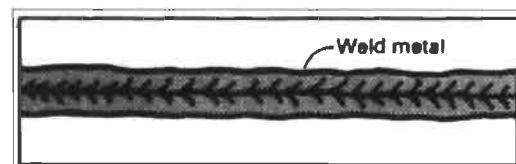


Figura
2.19

- Poro túnel o poro de gusano, Figura 2.20



Figura 2.20

La humedad es quizás la principal causa de la porosidad. Cuando la humedad se introduce al charco de metal, esta se evapora y a la temperatura del charco el vapor del agua se desintegra generando hidrógeno y oxígeno. Una parte de esos gases surgen a la superficie y se van a la atmósfera, una parte de esos gases es disuelta por el charco de metal.

Durante el enfriamiento y solidificación de la soldadura, existe una etapa en la cual el charco se encuentra en forma espesa y en ese momento cuando las burbujas de gas surgen lentamente y es muy fácil que queden atrapadas en la soldadura, provocando o que conocemos como porosidad.

No todas las porosidades son causadas por gases precipitados durante la fundición, si la velocidad de avance es muy rápida la fundición enfriará muy rápido, lo que provocará que las burbujas de gases quedan atrapadas.

Para prevenir la porosidad se debe evitar lo siguiente:

1. Evitar la excesiva oscilación del electrodo.
2. La velocidad de avance no debe ser muy rápida.
3. Aceite y grasa debe ser removido de la unión.
4. Cuando se pueda, se debe utilizar electrodos de bajo hidrógeno.

Los electrodos con aceite, grasa o guantes sucios es una causa muy común de porosidad, situaciones de las cuales algunos soldadores no están enterados, la soldadura debe estar libre de humedad si es necesario la unión deberá ser secada con un equipo oxiacetileno.

2.5.7. Falta de fusión y penetración.

La falta de fusión y de penetración son defectos inaceptables en la industria de tuberías, particularmente las que están sujetas a alta presión. Cuando estos defectos están presentes en la raíz del cordón están en formas de pequeños canales que parecen corrosiones. Estos pequeños defectos pueden alargarse hasta ser defectos muy serios, especialmente cuando la tubería contiene sustancias corrosivas como ácidos, gases licuados y compuestos de sulfuros.

Primeramente la falta de fusión y penetración ocurre cuando los procedimientos de soldadura no se siguen correctamente o cuando el soldador carece de habilidad para soldar, Figura 2.21 y 2.22.



Figura 2.21 Falta de fusión ^[21]



Figura 2.22, Falta de penetración ^[21]

2.6. REPARACIÓN DE DEFECTOS EN SOLDADURAS ^[2]

Las reparaciones o eliminación de defectos que a continuación se discutirán están basadas en los siguientes defectos, los cuales pueden ser detectados por pruebas no destructivas:

1. Porosidad.
2. Falta de fusión.
3. Falta de penetración.
4. Agrietamiento en la raíz, penetración excesiva y junta fría.

2.6.1. Pasos de reparación. ^[2]

PRIMER PASO.

Localizar el defecto y determinar el tamaño. Cada defecto que este a simple vista debe ser evaluado en tamaño a fin de evitar remover exceso metal base y soldadura.

SEGUNDO PASO.

Si hay procedimiento de soldadura calificado entonces debe ser revisado en los siguientes términos:

- Composición del material.
- Clasificación del electrodo.
- Preparación de la junta.
- Temperatura entre pasos.
- Temperatura de precalentamiento.

Este proceso le ayudara establecer los temas que serán usados como parte de la reparación de la soldadura. La falla en la soldadura puede ser por algunas de las condiciones mencionadas anteriormente. De cualquier forma es importante resaltar que la soldadura tiene un ciclo de intenso calentamiento y enfriamiento; los esfuerzos residuales internos pueden ser altos. Si el material de la tubería es de media aleación o acero resistente al calor, entonces un procedimiento de reparación pueden prepararse para verificar los pasos necesarios para reparar.

El procedimiento incluirá los siguientes pasos:

- Método de localización del defecto.
- Método de remoción de metal en y alrededor de la grieta.
- Planteamiento de la aplicación del precalentamiento y temperatura de entrepasos, antes y durante la soldadura.
- Tratamiento térmico post soldadura.
- Clasificación del electrodo hacer usado.
- Como será supervisada la reparación.
- Usar soldadores calificados.
- Esquemas a final de la hoja detallando la preparación del área a reparar.

Para producir una buena reparación de soldadura deben estar estipuladas en el procedimiento una o más de las siguientes instrucciones:

1. Limpieza.
2. Reparación de la junta.
3. Selección del procedimiento de soldadura.
4. Ejecución de un apropiado precalentamiento y temperatura de entrepasos.

2.6.2. Remoción de defectos.

Un defecto puede ser marcado claramente por el inspector. Normalmente los defectos superficiales y algunos otros defectos razonables pueden ser removidos por esmerilados o desbastados. Defectos al interior de la soldadura pueden ser removidos por método de desbaste.

La soldadura puede ser precalentada a lo requerido y mantenerla así. La temperatura de precalentamiento es la misma que la que se usó en la fabricación de soldadura.

Hay dos etapas para reparar:

- a) Remover el defecto.
- b) Preparación del área con el defecto para soldar.

CAPÍTULO 3.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA

Todos los autores y estándares de control de los procesos de soldaduras por arco convergen a los mismos tipos de defectos, los cuales se agrupan en 4 o 5 defectos más comunes, indicados en la Tabla 2.

Según el volumen 6 del ASM Metal Handbook, la observación de las discontinuidades ocurridas y sus relativas cantidades dependen en gran medida del proceso de soldadura utilizado, el método de inspección aplicado, el tipo de soldadura realizado, el diseño de junta y ajuste obtenido, el material utilizado y las condiciones laborales y ambientales.

Las discontinuidades de soldadura más frecuentes encontrados durante la fabricación, por orden decreciente de ocurrencia en los procesos de soldadura por arco objeto de nuestra investigación son los siguientes:

Tabla 2. Discontinuidades o defectos en soldadura comunes según el proceso de soldadura aplicado^[12].

| Arco de metal protegido (SMAW) | Arco sumergido (SAW) |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Inclusiones de escoria | Falta de penetración |
| Porosidad | Exceso de penetración |
| Falta de penetración | Inclusiones de escoria |
| Exceso de penetración | Porosidad |
| Socavado | |

Las inclusiones y grietas, son los defectos más comúnmente encontrados en soldadura, por lo tanto discutiremos en esta sección como y porque se generan estos tipos de discontinuidades o defectos

Las soldaduras circunferenciales en ductos están hechas usando estándares de calidad que controlan procedimiento y materiales y por lo tanto se minimiza el número y severidad de defectos, el estándar más común el API 1104.

La Tabla 3 nos muestra las principales causas de los defectos más comunes y las medidas de corrección para evitar que sucedan.

Tabla 3. Defectos en soldadura, sus causas y sus correcciones^[22].

| DEFECTO | CAUSA | CORRECCIÓN |
|---------------------------------|---|---|
| Salpicaduras y Chisporroteo | <ol style="list-style-type: none"> 1. Desviación del arco. 2. Amperaje demasiado alto. 3. Arco demasiado largo. 4. Electrodo defectuoso. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Asegúrese de una buena conexión a tierra. 2. Ajuste el amperaje según necesidad. 3. Ajuste el arco a la longitud adecuada. 4. Emplee el electrodo adecuado. 5. Emplee polaridad adecuada. 6. Seque el metal base. |
| Inclusiones de Escoria | <ol style="list-style-type: none"> 1. Electrodo de mala calidad. 2. Inapropiado uso del electrodo. 3. Sobrecalentamiento. 4. Arco alto; amperaje y voltaje elevados. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Emplear electrodos garantizados. 2. Emplear técnica recomendada. 3. Evitar sobrecalentamiento 4. Emplear altura correcta del arco amperajes y voltajes adecuados los recomendados por el fabricante. 5. Emplear movimientos uniformes. |
| Porosidad | <ol style="list-style-type: none"> 1. Arco corto, excepto con electrodos inoxidables o de bajo hidrógeno. 2. Tiempo insuficiente de fusión. 3. Demasiado amperaje. 4. Material base sucio. 5. Revestimiento húmedo. 6. Avance rápido. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Mantener el arco más largo. 2. Dé suficiente tiempo a la fusión, para que los gases se escapen. 3. Amperaje adecuado. 4. Limpiar bien la superficie. 5. Secar el electrodo. 6. Velocidad adecuada al avance. |
| Penetración y Fusión incompleta | <ol style="list-style-type: none"> 1. Mucha velocidad de avance. 2. Electrodo muy grueso. 3. Amperaje muy bajo. 4. Penetración defectuosa | <ol style="list-style-type: none"> 1. Deje suficiente campo libre en el fondo. 2. Seleccione el electrodo adecuado. 3. Use suficiente amperaje para obtener la penetración deseada. 4. Calcule correctamente penetración del electrodo. 5. Corregir velocidad de avance. 6. Limpiar junta de materias extrañas. |
| Socavado | <ol style="list-style-type: none"> 1. Manejo indebido del electrodo. 2. Empleo de diámetro incorrecto del electrodo. 3. Amperaje excesivo. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Emplee movimiento uniforme de oscilación en la soldadura a tope. 2. Evite el empleo de electrodos de diámetros mayores. 3. Use amperaje adecuado. 4. Evite soldadura excesiva. 5. Sostenga el electrodo a una distancia segura del plano vertical al hacer filetes horizontales. |

| | | |
|---------|---|--|
| Grietas | <ol style="list-style-type: none"> 1. Electrodo inadecuado. 2. Tamaño desproporcionado de la soldadura respecto al espesor de la pieza. 3. Soldaduras defectuosas. 4. Preparación defectuosa. 5. Unión rígida. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Para eliminar juntas rígidas, adoptar un diseño de estructura y el método adecuado. 2. Adapte el diámetro del electrodo al espesor de la pieza. 3. Evite soldaduras de cordones en serie. 4. Mantenga los bordes de la junta sin sujeción, el máximo tiempo posible. 5. Haga soldaduras resistentes de buena fusión. 6. Caliente las piezas previamente. 7. Procure que las juntas tengan una separación libre entre planchas, uniforme y adecuada. 8. Trabaje con el amperaje más bajo posible. 9. Utilice electrodos de bajo hidrógeno. |
|---------|---|--|

De lo anterior podemos definir que los defectos o discontinuidades que se presentan en soldaduras por arco durante los procesos SMAW Y SAW son principalmente los seis que se enlistan en la Tabla 3, por lo que se ha puesto gran énfasis en la restricción de estos defectos en la normatividad vigente.

CAPÍTULO 4

CASOS DE ESTUDIO

4.1 Análisis de falla de un Oleoducto ^[3]

Se caracterizó el agrietamiento transversal de una soldadura de costura en un tubo de acero al carbono grado API 5L X46 perteneciente a un ducto de transporte de aceite crudo. La grieta primaria, se inicia en la superficie interna del tubo, en la interface entre la zona afectada por el calor (ZAC) y la soldadura, propagándose de modo continuo a través de las direcciones radial y longitudinal.

La grieta inicia en un defecto de soldadura y en picaduras de corrosión, ver Figura 4.2. La superficie interna del tubo y la superficie agrietada, presentaron capas de óxidos ricos en hierro, oxígeno y azufre, Figura 4.3. Lo anterior confirma un mecanismo de corrosión debido a la presencia del Ácido Sulfhídrico (H₂S) y por los espectros del micro análisis químico-cualitativo mediante energía dispersiva de rayos X (EDS), ver Tabla 4 y Figura 4.1.

Tabla 4. Resultados del Microanálisis EDS en la superficie de fractura^[3].

| Posición | Elementos % | | | |
|----------|-------------|----|----|---|
| | O | Fe | Si | S |
| Región 1 | 25 | 54 | 8 | 7 |
| Región 2 | 9 | 81 | 5 | 2 |

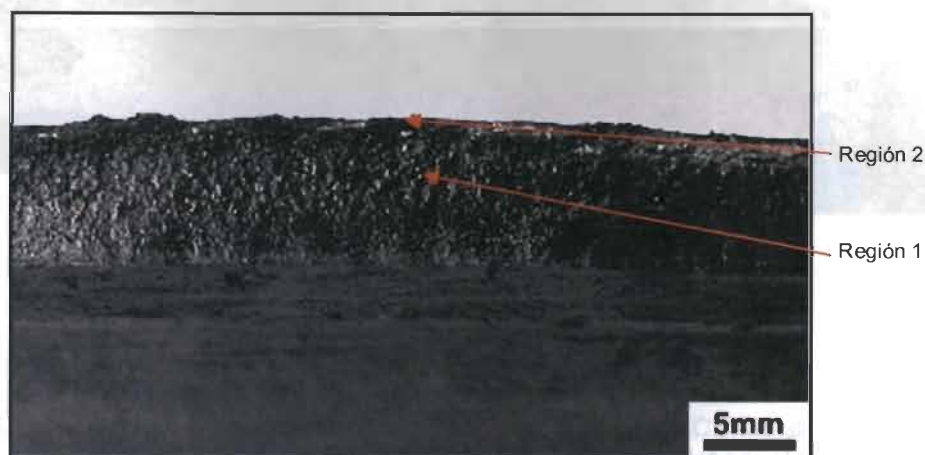


Figura 4.1. Inspección Visual de la sección longitudinal de la superficie expuesta en el agrietamiento, detallando la superficie de fractura donde predomina fractura plana y en la parte superior se caracteriza corte tipo labio^[3].

El esfuerzo de tensión (presión interna) fué la principal causa de propagación de la grieta, sin embargo, la mayor ramificación de esta, se presentó en el metal base y no en la ZAC, debido a la maleabilidad de la microestructura del metal base.

Ambas zonas, metal base y ZAC, presentaron agrietamiento en la interface con presencia de ampolladuras. El análisis fractográfico indicó la acción de un mecanismo de fractura frágil con grietas apiladas hacia la ZAC, lo cual describe las etapas del mecanismo de fragilización por el hidrógeno atómico.

Estos resultados indican que la falla del ducto ocurrió por agrietamiento por esfuerzo orientado inducido por hidrogeno (stress oriented hydrogen induced cracking, SOHIC).

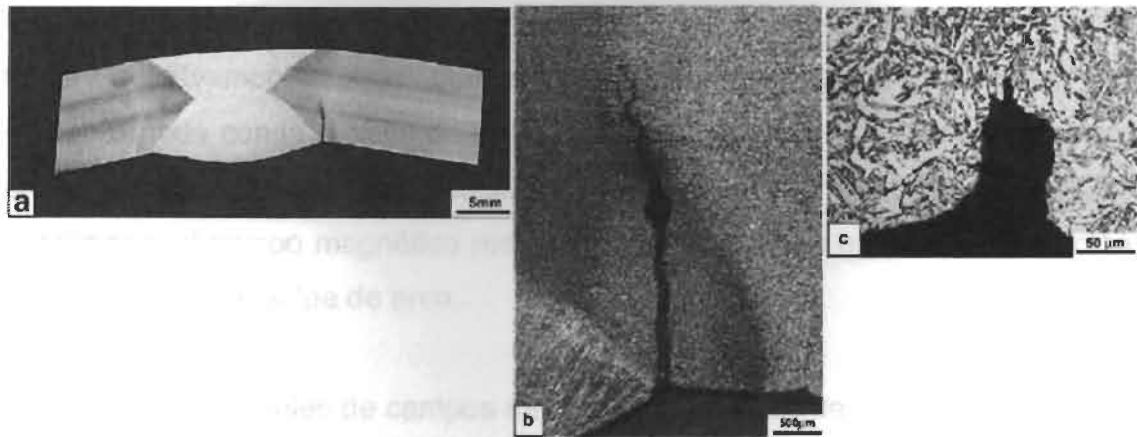


Figura 4.2. Análisis microestructural de las zonas de soldadura, ZAC y Metal base: (a) inicio del agrietamiento; (b) agrietamiento en la interface ZAC y soldadura y (c) agrietamiento asociado a defecto de soldadura ^[3].

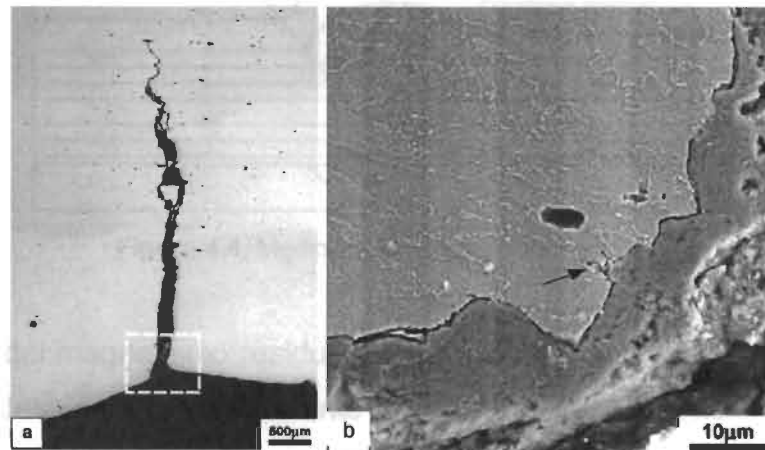


Figura 4.3. Detalle (a) Propagación de grieta en la sección transversal (b) acercamiento a las capas de óxidos. La flecha indica agrietamientos secundarios ^[3].

4.2. Método que proporciona a soldadores una nueva técnica para evitar el golpe de arco. ^[13]

Existe un nuevo método que permite a los soldadores, con poco conocimiento sobre el magnetismo residual en ductos, reducir el golpe de arco durante el proceso de soldaduras en ductos sometidos a reparaciones.

El golpe de arco ocurre comúnmente durante las reparaciones de ductos que tienen relativamente poco tiempo (6 meses a 1 año) de haber sido inspeccionado con la técnica de Fuga de Flujo Magnético (MFL). La interacción entre el campo magnético asociado con el flujo de corriente a través del electrodo y el campo magnético residual en un ducto que está bajo reparación, puede producir el golpe de arco.

Se midieron los niveles de campos magnéticos de diferentes ductos en el sur de México, la medición se realizó en el espacio entre los extremos cortados y entre los extremos a unir (unión en "V"), Figura 4.4.

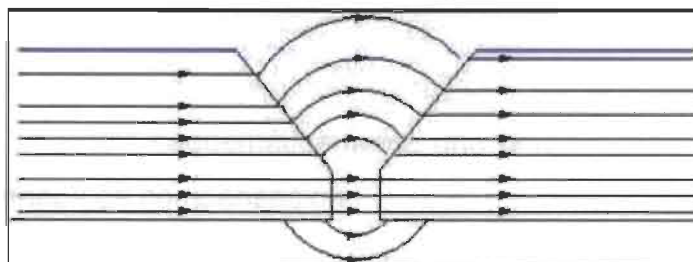


Figura 4.4. Medición de campos magnéticos ^[13]

Los efectos del magnetismo residual en partes a ser soldadas a menudo son la causa del desvío del arco durante el proceso de reparación en ductos, fenómeno conocido como Golpe de arco, los ductos de acero al carbono son enormes estructuras ferromagnéticas y pueden ser magnetizadas por campos magnéticos terrestres si se extienden de norte a sur, el golpe de arco se convierte en una preocupación cuando el ducto ha estado sujeto a fuertes campos magnéticos como lo es una inspección de línea por medio de Fuga de Flujo magnético (Magnetic Flux Leakage-MFL), este proceso puede inducir magnetización residual en ductos en operación, el MFL utiliza fuertes magnetos permanentes para saturar magnéticamente la pared del ducto.

Como todos sabemos el proceso manual de soldadura por arco consiste en establecer un circuito eléctrico entre la máquina soldadora, los electrodos, las

partes a ser soldadas y la conexión a tierra, la corriente fluye a través de un conductor y produce un campo magnético de acuerdo a la ley de Ampere, la interacción entre este campo magnético y el campo magnético residual de las partes a soldar, causa un desplazamiento del arco con respecto a la junta que puede causar defectos, el golpe de arco depende de la magnitud y dirección del campo magnético residual de las partes. La magnitud del campo magnético residual en la zona de soldadura debe ser menor a 30 Gauss para asegurar una soldadura de calidad y buenas propiedades mecánicas.^[14] Es necesario conocer la magnitud y polaridad del campo magnético residual en la ranura en "V" utilizando un Gasómetro, posteriormente se enrollará una bobina alrededor de la tubería y cerca de la unión a tope para reducir el campo magnético residual.

La Figura 4.5, muestra esquemáticamente una unión a tope en "V", y los tres posibles escenarios de compensación.

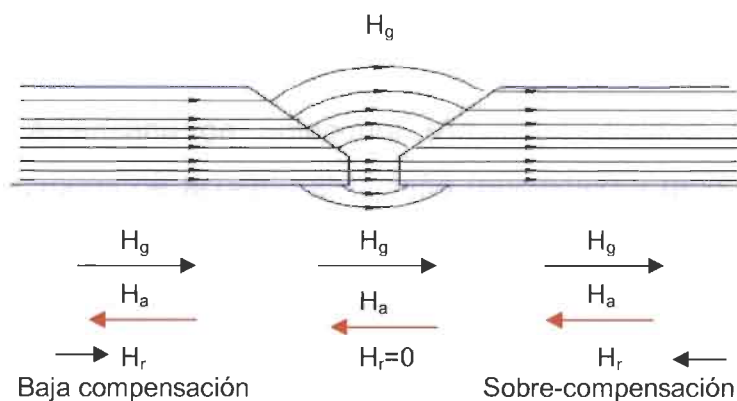


Figura. 4.5. Escenarios de compensación del campo magnético residual ^[13]

El caso ideal ocurre cuando se aplica un campo magnético (H_a) opuesto al campo magnético residual (H_g) y el campo magnético resultante (H_r) es igual a cero. En el segundo caso, H_a no es lo suficientemente alto, el resultado es una baja compensación donde $H_r = H_g - H_a$. En el caso de la sobre compensación, H_a es lo suficientemente fuerte para revertir la polaridad del campo magnético residual. Estos dos últimos casos crean el riesgo de causar el golpe de arco durante el proceso de soldadura.

Kildishev propuso una tecnología para tubería ferromagnéticas basada en compensación por remagnetización axial en la ranura del tubo y cerca de la unión.^[15] El procedimiento es científicamente correcto, pero se requiere un sólido conocimiento en magnetismo para su aplicación. Proctor propuso un procedimiento práctico para reducir el campo magnético en tuberías,^[16] bien conocido en la industria del petróleo, observando la variación de corriente que fluye a través de la bobina para compensar el campo magnético residual en la ranura. Este procedimiento requiere cambios de magnitudes de corriente, sin embargo, podrían estar fuera del rango de los valores de corriente determinadas para el electrodo en el procedimiento de soldadura.

El procedimiento de Proctor requiere, como regla general, enrollar el cable de tierra alrededor de la tubería como una bobina, de 4 a seis vueltas a una distancia de medio diámetro y modificar la corriente en el electrodo para compensar el campo magnético residual.

La Asociación Americana de Soldadura (American Welding Society-AWS) clasifica los electrodos de acuerdo al tamaño (pulgadas) y rango de corriente (amperes). Por ejemplo, un electrodo E6010 de 1/8"Ø, tiene un rango de corriente de 75-130 amperes, Galvery y Marlov recomiendan el uso de la corriente de menor rango para obtener un arco suave.^[17]

Los soldadores ajustan la corriente que fluirá a través del electrodo al inicio del procedimiento de soldadura para obtener la longitud de arco correcto, esto entonces no puede garantizar una apropiada compensación del campo magnético residual cuando se tiene fijo el flujo de corriente, el número de vueltas (embobinado) y la posición o sentido del embobinado.

Dado lo anterior, se realizó una investigación experimental en la cual se tomaron lecturas de campos magnéticos residuales (3,584 lecturas) en ductos

de transporte de hidrocarburos de PEMEX en el Sur de México, con diámetros de 8, 10 y 30 pulgadas, se removieron secciones de tubería y se tomaron las lecturas que se indican en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de campos magnéticos residuales medidos en campo^[13]

| Diámetro (pulg.) | Promedio MA | Promedio MB | Promedio MC |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Gauss | | |
| 8 | 30 | 20 | 40 |
| 10 | 1,000 | 25 | 400 |
| 30 | 500 | 25 | 350 |

Donde:

- MA es la medición del campo magnético residual en el entrehierro después del cortar la tubería.
- MB es la medición de campo magnético residual de la nueva sección de tubería antes de su instalación.
- MC es la medición de campo magnético residual en el entrehierro de la nueva sección de tubería y la línea regular con unió a tope tipo "V".

Los valores de MC son los valores necesarios para compensar el campo magnético residual y así evitar el golpe de arco.

Para determinar el valor necesario de compensación se desarrolló un programa de simulación llamado Método Magnético por elementos Finitos (Finite Element Method Magnetics- FEMM). El programa utiliza las siguientes variables:

- t = WT (Espesor de pared del tubo).
- n = Número de vueltas de la bobina.
- I = Flujo de corriente en amperes a través de la bobina y el electrodo.
- X_0 = Posición de la bobina con referencia a la ranura.
- D = Diámetro externo.
- H_g = Intensidad del campo magnético residual en la ranura.

- H_r = Campo magnético de compensación necesario.

El cual a través de la expresión general:

$$Hr = Hg^{1.04} + 712 D^{0.23} + 1,148t - 6.3nl^{0.76} - 1387Xo^{-0.25} \quad (1)$$

Esta expresión general reúne las condiciones de campo y tiene como objetivo determinar el campo magnético de compensación para contrarrestar el campo magnético residual (H_g) por debajo de 30 Gauss.

La Figura 4.6 muestra a manera de ejemplo la relación entre H_a (Proporcional a nl -ampere-vuelta) y la posición de la bobina relativa a la ranura X_0 para siete intensidades de campo magnético residual H_g , muestra la aplicación de un campo magnético de compensación requerido H_a , en función de la posición de la bobina X_0 , la cantidad de energía requerida depende directamente de la posición de la bobina.

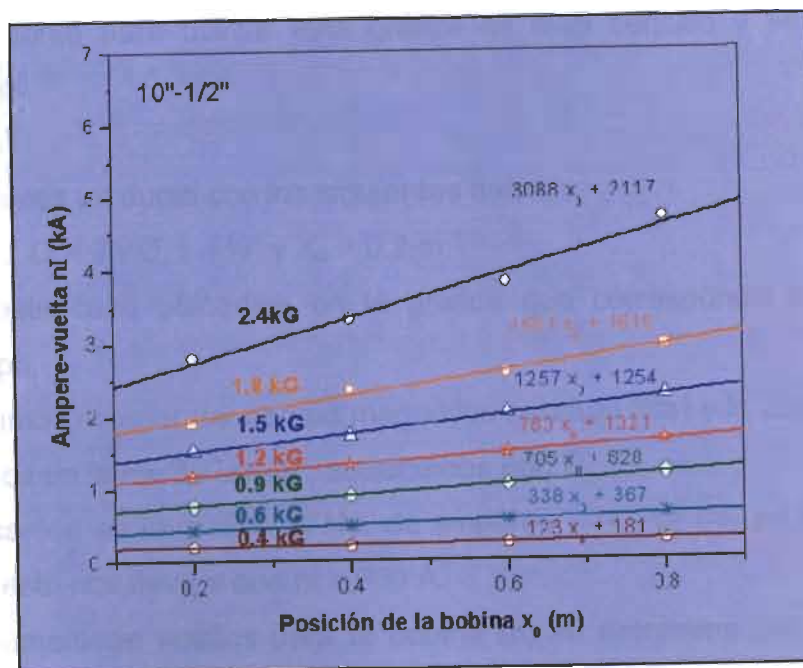


Figura 4.6, Relación entre Ampere-vuelta, H_a y posición de la bobina, X_0 [13]

Aplicando la ecuación (1), a todos los rangos posibles de las variables consideradas en el modelo se podría obtener tanta información como para generar gráficas con curvas de compensación de campo magnético residual como la de la Figura 4.7, para un determinado caso de campo.

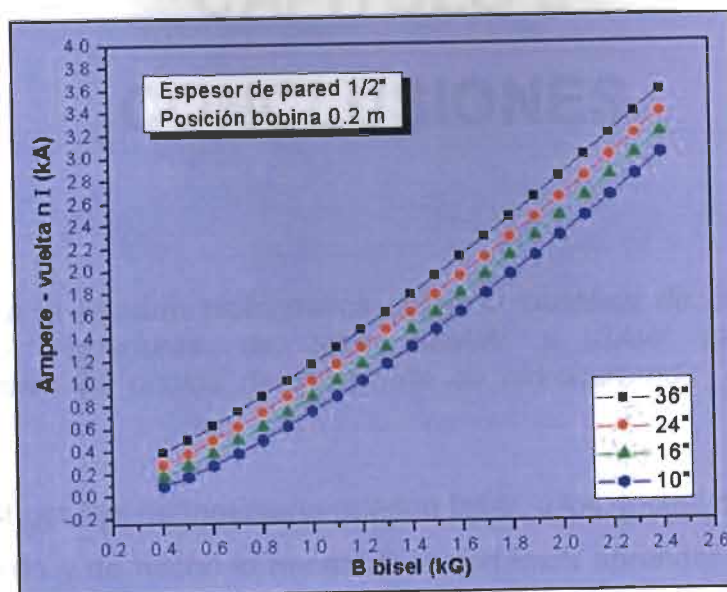


Figura 4.7. Curvas de compensación del campo magnético residual^[13].

El procedimiento para utilizar esta gráfica es muy sencillo y se describe a continuación:

1. Tenemos un ducto con los siguientes datos:
 - a. $D = 36''\varnothing$, $t = \frac{1}{2}''$ y $X_0 = 0.2$ m
2. En este caso ubicamos en la gráfica que corresponda los datos de campo.
3. Medimos el valor del campo magnético residual (B_b) y lo ubicamos en la gráfica en el eje de las "X", suponemos 800 G.
4. Ubicamos en la grafica el No. de amperes – vuelta (nI) en el eje de las "Y", esto nos lleva a que $nI = 900$ A.
5. El número de vueltas para la bobina (n) se determina por la siguiente

$$\text{ecuación: } n = \frac{nI}{\text{Amp elect}} \quad (2)$$

$$\text{Entonces } n = \frac{900 \text{ A}}{100}$$

$n = 9$ vueltas y se ubicará a 0.20 metros de la ranura.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES.

De acuerdo a la revisión bibliográfica sobre el "*Análisis de defectos y como evitarlos en soldaduras de arco SMAW y SAW longitudinales y circunferenciales en ductos de transporte de hidrocarburos*", se concluye lo siguiente:

Todas las estructuras de Ingeniería pueden fallar, y los ductos de petróleo y gas pueden hacerlo y de hecho lo hacen. Que podemos aprender de esas fallas y ¿cómo podrían haberse evitado?

Las fallas en ductos siguen ocurriendo, a la par de las mezclas de problemas complejos, en particular el deterioro en el tiempo, cambio de condiciones, factores externos y como siempre, el *factor humano*.

Esta monografía hace énfasis en que el aprendizaje, a partir de las fallas en soldaduras ocurridas en ductos puede ayudarnos a reducir las mismas, y por lo tanto no deberíamos dejar pasar por alto un defecto en soldadura, sin un profundo análisis y evaluación de las lecciones aprendidas, actividades que generalmente son compartidas con la comunidad técnica relacionada a la industria.

Tres conclusiones principales emergen de este trabajo:

- 1) Los ductos son una forma segura de transporte de energía.
- 2) Las tendencias actuales indican una reducción en los índices de defectos en soldaduras en ductos.

- 3) Un buen entrenamiento (transferencia del conocimiento), una sólida base de competencias, y un fuerte gerenciamiento son la clave para prevenir defectos en soldaduras de ductos, aunque la seguridad comienza con un buen diseño (procedimiento).

Se debe considerar y tomar en cuenta que desafortunadamente en ductos antiguos el estándar API 1104 no fué usado en la construcción de líneas, por ejemplo, en una revisión, se determinó que el 70% de las soldaduras circunferenciales en la construcción de ductos en los años 60's contienen defectos que están fuera de los actuales estándares para soldaduras. Adicionalmente la inspección radiográfica no estaba incluida en el estándar mencionado hasta 1953 y las normas de ductos no requerían inspección radiográfica en soldaduras circunferenciales.^[18] En consecuencia éstas soldaduras pueden contener grandes y numerosos defectos.

Hay dos razones principales por las que estos defectos no causan fallas:

- Las soldaduras son altamente resistentes a los defectos
- Las soldaduras se encuentran en o sobre un terreno estable, donde los aumentos en las cargas axiales es poco probable.

En consecuencia, siempre que no cambian las cargas axiales en una soldadura circunferencial, no es probable que falle en servicio.

Por lo anterior es de suma importancia el controlar y minimizar los defectos en soldaduras que de no ser evitados en la actualidad se estarán heredando fallas potenciales en los ductos de transporte de hidrocarburos en México que podrían ocasionar, daños al medio ambiente, muertes y lesiones a la población aledaña.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) O'Brien, R.L. *Manual de Soldadura, Tomos I y II de la American Welding Society*, Octava Edición, traducido de la octava edición en inglés: *WELDING HANDBOOK/WELDING PROCESSES. VOLUME 2*, capítulos 2 al 10, 1991.
- 2) Hobasar Rampul, Pipe welding procedures. Capitulo 13 Defectos de Soldadura en Tuberías, Industrias Press Inc.. p.207 – 221, Segunda edición 2003.
- 3) Cesar R.F. Azevedo. Department of Metallurgical and Materials Engineering, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brazil. Failure analysis of a crude oil pipeline; Received 9 Available online 22 January 2007. p. 979 (1) – 979 (2) y 993 (16), May 2006; accepted 1 December 2006.
- 4) Tiratsoo John. Pipeline and Integrity Technology (3rd. Edition). Clarion Technical publisher, Cracks in Pipelines and how to find them; p. 343 (4) – 344 (5) y 993 (16), 2003.
- 5) Helmut Thielsch. Última edición, Defects and Failures in Pressure Vessels and Piping. Capitulo 12 Defectos de Soldadura en Tuberías. p.214 – 266, 1977.
- 6) DUNIA WELDING, WELDING DAN NTD, 2008, <http://hazwelding.wordpress.com/2008/04/26/arc-strikes/> (consulta Enero 2010).
- 7) M. Erog̃lu, M. Aksoy, N. Orhan, Materials Science and Engineering A269 (1999) 59–66, Effect of coarse initial grain size on microstructure and mechanical properties of weld metal and HAZ of a low carbon steel,- p. 979 (1) – 979 (2) y 993 (16), Received 14 August 1998; received in revised form 25 February 1999.

- 8) R.L. O'Brian, Manual de Soldadura, Tomos I y II de la American Welding Society, Octava Edición, traducido de la octava edición en inglés: WELDING HANDBOOK/WELDING PROCESSES. VOLUME 2, capítulos 2 al 10, 1991.
- 9) Informe Desarrollo Sustentable 2008 de PEMEX, portal <http://www.pemex.com/index.cfm>, www/desarrollosustentable.pemex.com/portal/, (consulta abril 2010)
- 10) Anuario estadístico 2009 de PEMEX, portal <http://www.pemex.com/index.cfm>, http://www.ri.pemex.com/files/content/1_AE_COMPLETO.pdf, (consulta abril 2010).
- 11) IIW, International Institute of Welding.
- 12) API STANDARD 1104, Welding of Pipelines and Related Facilities, TWENTIETH EDITION, Cap. 9 Acceptance Standards for Nondestructive Testing, p. 21 – 27, OCTOBER 2005.
- 13) AMS HANDBOOK, Autores varios, Welding, Brazing and Soldering, Volumen 6, Capítulo "Classification of Weld Discontinuities", p. 2603 – 2611, 1993.
- 14) José Hiram Espina Hernández, Francisco Caleyó, Gabriela L. Rueda y Jose Manuel Allen CIDIM, Instituto Politécnico Nacional, Eloy Perez Baruch y Abraham Lopez Montenegro Pemex PEP, Método que proporciona a soldadores una nueva Técnica para Evitar el Golpe de Arco, OIL & GAS JOURNAL, p. 54 – 59, Diciembre 21 de 2009.
- 15) Bakunov, A.S. y Muzhitskii, V.F. "Testing Residual Magnetization of parts before welding," Russian Journal of Parts Nondestructive Testing, Vol. 40 No. 3, p. 209-210, Marzo 2004.
- 16) Kildishev, A.N. , Nyenhuis, J.A., Dobrodeyev, P.N., y Volokhov, S.A., Deperming Technology in Large Ferromagnetic Magnetics Pipes, IEEE International Magnetics Conference, Kyongju, Korea, Mayo 18-21, 1999.
- 17) Proctor, N.B., The Removal of Detrimental Magnetic Fields at Pipeline Tie-Ins, Pipeline Research Council International, Catalog No. L51389e, Houston: Technical Tollboxes Inc., 1980.

- 18) Galvery, W.L., and Marlow, F.M., *Welding Essentials: Questions & Answers*, p. 117, New York: Industrial Press Inc., 2000.
- 19) Hopkins, P, *LEARNING FROM PIPELINE FAILURES*, WTIA/APIA Welded Pipeline Symposium, Perth, Australia, p. 8, Marzo de 2008.
- 20) Artículo "Conoce los procesos de soldadura y unión", portal www.aws.org/wj/esp/2009/05/wjesp0509-46.pdf, consulta abril 2010.
- 21) *Welding Defects*. Wanda S. Benton. Florence-Darlington Technical College. UNDERCUT. POROSITY. INCOMPLETE FUSION. OVERLAP. UNDERFILL. SPATTER, etc., portal www.aws.org/educators/Library/0000/000630.ppt, consulta abril 2010.
- 22) Monografía "Defectos en Soldadura" portal www.monografias.com

LISTADO DE TABLAS

| | Página |
|--|--------|
| 1 Derrames y fugas ocurridas en el año 2008 en Pemex Exploración y Producción. | 3 |
| 2 Discontinuidades o defectos en soldadura comunes según el proceso de soldadura aplicado. | 32 |
| 3 Defectos en soldadura, sus causas y sus correcciones. | 33 |
| 4 Resultados del Microanálisis EDS en la superficie de fractura. | 35 |
| 5 Valores de campos magnéticos residuales medidos en campo. | 41 |

LISTADO DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| 2.1 Procesos de soldadura. | 5 |
| 2.2 Proceso SMAW esquematizado ilustra el depósito de soldadura por electrodo revestido sobre placa de acero en una posición plana | 6 |
| 2.3 Esquema del proceso de soldadura por arco sumergido | 7 |
| 2.4 Clasificación de defectos, IIW | 10 |
| 2.5 Penetración inadecuada sin desalineamiento (IP) | 12 |
| 2.6 Penetración inadecuada debida a desalineamiento (IPD) | 12 |
| 2.7 Penetración transversal inadecuada (ICP) | 13 |
| 2.8 Fusión incompleta (IF) | 13 |
| 2.9 Fusión incompleta debida a traslape (IFD) | 14 |
| 2.10 Concavidad interna (IC) | 14 |
| 2.11 Ejemplo de un golpe de arco | 19 |
| 2.12 Microestructura martensítica, correspondiente a Acero al carbono cuyo contenido de carbono es de 1.22% | 19 |
| 2.13 Ejemplo de agrietamiento bajo el cordón de soldadura | 21 |
| 2.14 Socavado en soldadura | 23 |
| 2.15 Porosidad en soldadura | 25 |
| 2.16 Porosidad uniforme dispersa | 26 |
| 2.17 Porosidad por inclusiones | 26 |
| 2.18 Porosidad lineal | 26 |
| 2.19 Porosidad alargada | 26 |
| 2.20 Poro túnel o poro de gusano | 26 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.21 | Falta de fusión | 28 |
| 2.22 | Falta de penetración | 28 |
| 4.1 | Inspección Visual de la sección longitudinal de la superficie expuesta en el agrietamiento, detallando la superficie de fractura donde predomina fractura plana y en la parte superior se caracteriza corte tipo labio. | 36 |
| 4.2 | Examinación microestructura de las zonas de soldadura, ZAC y Metal base: (a) inicio del agrietamiento; (b) agrietamiento en la interface ZAC y soldadura y (c) agrietamiento asociado a defecto de soldadura | 37 |
| 4.3 | Detalle (a) Propagación de grieta en la sección transversal (b) acercamiento a las capas de óxidos. La flecha indica agrietamientos secundarios. | 37 |
| 4.4 | Medición de campos magnéticos | 38 |
| 4.5 | Escenarios de compensación del campo magnético residual | 39 |
| 4.6 | Relación entre Ampere-vuelta, H_a y posición de la bobina, X_0 | 42 |
| 4.7 | Curvas de compensación del campo magnético residual | 43 |

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Nombre: Angel Murillo Sigero

Grado a obtener: Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

Título de Monografía: Análisis de defectos y como evitarlos en soldaduras de arco SMAW y SAW longitudinales y circunferenciales en ductos de transporte de hidrocarburos.

Títulos obtenidos: Ingeniero Mecánico Electricista.

Universidad: Universidad Juarez Autónoma de Tabasco (UJAT).

Campo profesional: Ingeniería.

Experiencia profesional: Ingeniero Especialista de Mantenimiento de Ductos de Transporte de Hidrocarburos en Pemex Exploración y Producción, Área de Integridad Mecánica y Confiabilidad de Ductos.

Lugar y fecha de nacimiento: Veracruz, Veracruz, 10 de Diciembre de 1970.

Nombre de padres: Angel Murillo Murillo y María Esther Sigero Urgell.