

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTORSIÓN EN LA INSTALACIÓN DE
ENVOLVENTES METÁLICAS DE ACERO AL CARBONO POR EL PROCESO
SMAW EN GASODUCTOS QUE TRANSPORTAN GAS AMARGO**

POR

ING. JESÚS ALBERTO PINEDA GÓMEZ

MONOGRAFÍA

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

VILLAHERMOSA, TABASCO. JUNIO DEL 2010.

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTORSIÓN EN LA INSTALACIÓN DE ENVOLVENTES METÁLICAS DE ACERO AL CARBONO POR EL PROCESO SMAW EN GASODUCTOS QUE TRANSPORTAN GAS AMARGO

POR

ING. JESÚS ALBERTO PINEDA GÓMEZ

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

VILLAHERMOSA, TABASCO. JUNIO DEL 2010.

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía "ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTORSIÓN EN LA INSTALACIÓN DE ENVOLVENTES METÁLICAS DE ACERO AL CARBONO POR EL PROCESO SMAW EN GASODUCTOS QUE TRANSPORTAN GAS AMARGO", realizada por el alumno **JESÚS ALBERTO PINEDA GÓMEZ** con número de matrícula **09ES-090**, sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



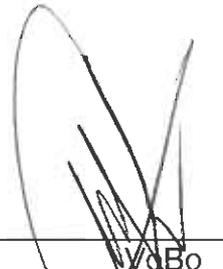
**Dr. Felipe de Jesús García
Vázquez**
Tutor Académico



M en K Eloy Pérez Baruch
Tutor en Planta



**Dr. Felipe Arturo Reyes
Valdés**
Asesor



MC. Claudia A González Rodríguez
Coordinador de Posgrado

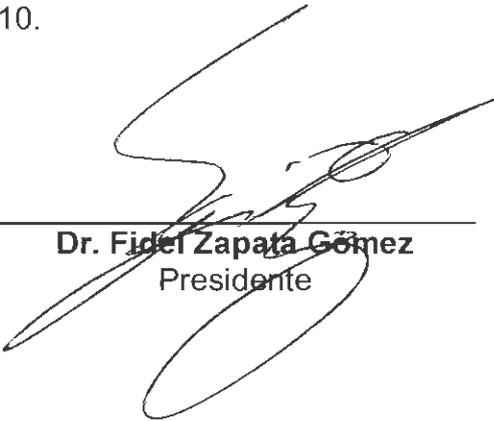
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de Especialización del alumno **JESÚS ALBERTO PINEDA GÓMEZ**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **"ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DISTORSIÓN EN LA INSTALACIÓN DE ENVOLVENTES METÁLICAS DE ACERO AL CARBONO POR EL PROCESO SMAW EN GASODUCTOS QUE TRANSPORTAN GAS AMARGO"**, 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 25 días del mes de Junio del 2010.



Dr. Fidel Zapata Gómez
Presidente



MC. Gabriel García Cerecero
Secretario



Dr. Felipe de Jesús García Vázquez
Vocal

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo va dedicado a toda mi familia, quienes fueron pacientes, tuvieron fe en mi esfuerzo por sacar adelante esta especialidad, y me dieron su cariño y comprensión; muy especialmente para mi esposa Leticia Leal Mendoza por su incondicional apoyo, apertura, aceptación y su cooperación para que yo lograra alcanzar mi objetivo.

Así mismo a mis tres hijas que me alentaron con apoyo todo el tiempo, y me dieron aliento y fuerza para llegar al final, mi admiración y respeto para con ellas.

A todos mis compañeros de trabajo y los que concluyeron conmigo esta especialidad, muy en especial a mi Tutor de Planta M. en I. Eloy Pérez Baruch por su asesoramiento, guía y oportunidad de continuar aprendiendo.

Y a todos los maestros que de alguna forma me motivaron y me brindaron su incondicional apoyo y conocimiento, en especial al Dr. Felipe García Vázquez, M. en C. Víctor Hugo López Cortez, y al M. en C. Gabriel García Cerecero.

Y sobre todas las cosas, le doy gracias a Dios por haberme brindado la oportunidad de tomar esta especialidad, dándome los medios, fuerzas, entendimiento y fortaleza para llegar a un buen fin; haciéndome llegar mediante mi familia su apoyo y comprensión.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| Síntesis | 1 |
| Capítulo 1: Introducción | 2 |
| 1.1 Antecedentes | 2 |
| 1.2 Objetivos | 4 |
| 1.2.1 Objetivos Generales | 4 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 4 |
| 1.3 Justificación | 5 |
| 1.4 Alcance | 5 |
| 1.5 Planteamiento del Problema | 6 |
| Capítulo 2: Estado del Arte | 8 |
| 2.1 Proceso de soldadura de arco manual con electrodo revestido (SMAW) | 8 |
| 2.1.1 Principios del proceso de soldadura SMAW | 10 |
| 2.1.2 Clasificación de electrodos del proceso de soldadura SMAW | 12 |
| 2.1.3 Parámetros del proceso de soldadura SMAW | 16 |
| 2.2 Tubería de conducción | 24 |
| 2.2.1 Procesos de fabricación de tuberías de conducción | 25 |
| 2.2.2 Características del gas transportado | 27 |
| 2.3 Rehabilitación de tubería de conducción | 29 |
| 2.4 Envolvertes soldadas | 32 |
| 2.5 Esfuerzos residuales en soldaduras | 36 |
| 2.5.1 Clasificación de los esfuerzos residuales | 43 |
| 2.5.2 Efectos de los esfuerzos residuales sobre la integridad de la soldadura | 44 |
| 2.5.3 Medición de los esfuerzos residuales en soldadura | 46 |
| 2.5.4 Métodos de alivio de los esfuerzos residuales en la soldadura. | 49 |
| 2.6 Distorsión de componentes de acero soldadas | 53 |
| 2.6.1 Tipos de deformaciones en uniones soldadas | 54 |
| 2.6.2 Control de distorsiones en soldaduras | 63 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Capítulo 3: | Análisis y discusión de bibliografía | 71 |
| Capítulo 4: | Caso de estudio | 72 |
| Capítulo 5: | Conclusiones | 77 |
| Capítulo 6: | Recomendaciones | 78 |
| | Bibliografía | 79 |
| | Listado de Tablas | 82 |
| | Listado de Figuras | 82 |
| | Resumen Autobiográfico | 86 |

SÍNTESIS

En México la infraestructura de oleoductos y gasoductos tiene una edad promedio de 26 años, siendo la confiabilidad operativa, baja, al igual que la integridad mecánica, lo que sitúa a esta infraestructura en el 75% de su vida útil de diseño. PEMEX es uno de los principales productores de gas y petróleo a nivel mundial, que cuenta con una extensa red de gasoductos, superando los 5000 km de extensión. Es por eso que se debe contar con las herramientas necesarias para prolongar la vida útil y mantener en niveles óptimos para el transporte de gas, asegurando el suministro, la seguridad y la protección ambiental en México.

La infraestructura de ductos terrestres existente a nivel nacional, es utilizada para el transporte de hidrocarburos líquidos y gaseosos a los diferentes centros de procesamiento y para su exportación. Estos ductos sufren daños irreversibles en su integridad mecánica (pérdida de espesores) por el prolongado tiempo en servicio; lo que hace imperante garantizar su seguridad y confiabilidad operativa, por lo que es necesario restituirles esas condiciones en su integridad mediante la instalación (soldadura) de envolventes metálicas bipartidas, utilizando el proceso de Soldadura de Arco Manual por Electrodo Recubiertos (SMAW, Shield Metal Arc Welding).

En el presente trabajo se hace una recopilación de información para conocer los efectos que produce las distorsiones térmicas en el proceso SMAW, aplicado en la instalación de envolventes metálicas bipartidas de fábrica para corregir indicaciones en ductos terrestres detectadas con equipo instrumentado; con el fin de conocer sus efectos en el proceso de soldadura y minimizarlos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Actualmente Petróleos Mexicanos, por medio de la Dirección de Pemex Exploración y Producción, desarrolla programas estratégicos de mantenimiento a las plataformas, en los que se requiere del mantenimiento a los sistemas de tuberías de proceso que conforman las mismas, para que estas operen en condiciones de eficiencia, seguridad y rentabilidad, asegurando la operación en sus diferentes fases, las cuales deben garantizar la seguridad del personal, de las instalaciones y del medio ambiente en el que se encuentran [1].

Tomando como base la normativa correspondiente [1,2], y derivado de las inspecciones con equipo instrumentado mediante las técnicas de flujo magnético y ultrasonido a los ductos terrestres que transportan hidrocarburos líquidos y gaseosos, los cuales reportan indicaciones internas y externas, que degradan el espesor de pared de las tuberías y ante la imposibilidad de dar libranza operativa para la reparación de las mismas con la sustitución de tramos, se procedió a la corrección de estas indicaciones con la instalación de envolventes metálicas bipartidas de fábrica, mediante la aplicación de soldadura por el proceso SMAW, coadyuvando a la restitución de la integridad mecánica de los ductos. Estas correcciones se apegan al cumplimiento de la normatividad vigente tanto nacional como internacional y al control de calidad en el proceso

de soldadura y calificación de soldadores, así como en la fabricación de los materiales utilizados y la conformación de las juntas longitudinales y circunferenciales.

Los tipos de envolventes (camisas) utilizados para la reparación de indicaciones ya sean internas o externas, son de dos tipos: Tubo – tubo y boyler, las cuales constan de dos medias cañas que son soldadas primeramente en forma longitudinal al ducto en el lugar donde se localiza la pérdida de espesor, posteriormente se aplican las soldaduras de sello (filete) en los extremos de las envolventes, lo anterior se logra sin necesidad de libranza operativa y manteniendo la producción de hidrocarburos acorde a las exigencias de entrega por parte de los clientes existentes en la industria petrolera.

El procedimiento para la instalación de envolventes metálicas bipartidas, implica primeramente la instalación de las medias cañas alrededor del ducto, aplicando las soldaduras en el sentido longitudinal y posteriormente las soldaduras circunferenciales o transversales mediante el proceso SMAW. La soldadura permite la fusión de metales o unión metalúrgica debido a que este es un proceso de aporte de metal fundido, el cual, produce excesivo calor y éste es depositado de forma puntual en los elementos a soldar, lo que crea calentamientos y enfriamientos no uniformes, lo cual ocasiona expansiones y contracciones respectivamente [3]. Este fenómeno es natural en todos los metales debido a las propiedades físicas que estos poseen. Este efecto de expansiones y contracciones crea deformaciones de las estructuras soldadas las cuales pueden ser perjudiciales en el desempeño de la tubería y de los componentes del envoltorio, es por eso que este trabajo tiene como propósito principal realizar un estudio bibliográfico del efecto que tiene el fenómeno de distorsión en este tipo de aplicaciones.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Mediante un análisis bibliográfico de los efectos que produce la distorsión térmica en el proceso de soldadura en la instalación de envolventes metálicas por el proceso SMAW, detectar áreas de oportunidad y acciones correctivas, lo cual en un futuro permitirá actualizar el procedimiento del proceso de soldadura, estableciendo las mejoras que serán evaluadas, para cumplir con los requerimientos de calidad durante el proceso de la soldadura.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Búsqueda y análisis del estado del arte referente a los efectos que provoca la distorsión térmica (contracción y expansión) en la aplicación de la soldadura SMAW en la instalación de envolventes a ductos en operación.
2. Determinar cuáles son los principales efectos que provoca la distorsión térmica (contracción y expansión) en la aplicación de la soldadura SMAW en la instalación de envolventes a ductos en operación.
3. Análisis de los parámetros esenciales que intervienen en el proceso de soldadura SMAW.
4. Determinar los parámetros del proceso de soldadura SMAW que tienen mayor significancia en la distorsión térmica y en la integridad mecánica del sistema después de la reparación.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Para el transporte de hidrocarburos y sus derivados hacia los centros de proceso se cuenta con una extensa red de ductos terrestres de diferentes diámetros, alojados en diversos derechos de vía, los cuales requieren de inspecciones periódicas para verificar que cumplan con las condiciones de seguridad y en su caso proporcionarles mantenimiento correctivo para mantener las condiciones de operación dentro de los límites de confiabilidad requeridos. Estos ductos cumplen con un programa de inspección y mantenimiento preventivo, el cual consta de una serie de inspecciones, entre la que sobresale por su tecnología de punta y efectividad para la detección de indicaciones en ductos la inspección con equipo instrumentado, y además cumplen con un programa de mantenimiento correctivo, este último en base a los resultados obtenidos de la inspección. Dentro del programa de mantenimiento correctivo es muy común la instalación de envolventes en ductos en operación, soldados mediante el proceso de soldadura SMAW, el análisis y entendimiento del proceso, el conocimiento de las variables esenciales y la comprensión de los efectos de la distorsión térmica, son los aspectos más relevantes para el establecimiento de las bases para garantizar que la reparación en la tubería tenga un desempeño óptimo.

1.4 ALCANCE

El alcance de este trabajo consiste en realizar una recopilación del estado del arte referente del efecto que tienen las distorsiones térmicas generadas durante el proceso de reparación de tubería utilizando la instalación de envolventes metálicas mediante el proceso de Soldadura de Arco Manual por Electrodo Recubierto (SMAW, Shield Metal Arc Welding), así como la

determinación de los parámetros del proceso de soldadura SMAW que tienen mayor significancia en la distorsión térmica y en la integridad mecánica del sistema después de la reparación.

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el ámbito nacional el estudio de las distorsiones térmicas y los esfuerzos residuales generados por estas dentro del proceso de reparación de tubería utilizando la instalación de envolventes metálicas mediante el proceso de Soldadura de Arco Manual por Electrodo Recubierto, es muy escaso, no existen procedimientos ni reportes de estudios sistemáticos que se adecuen a condiciones existentes en el país. Como es bien sabido el proceso SMAW involucra necesariamente aporte de calor para unir dos piezas entre sí [3]. El aporte de calor es muy importante no solo porque permite que se lleve a cabo la unión, si no porque afecta su microestructura y ésta a su vez, sus propiedades mecánicas. Además provoca variaciones dimensionales y puede generar tensiones residuales que afecten la integridad mecánica de los componentes soldados. Conjuntamente de lo mencionado anteriormente, existen dos preocupaciones vitales cuando se aplica soldadura sobre gasoductos en servicio.

- La primera es mantener un rango de seguridad alto durante la reparación, debido a que existe el riesgo de penetrar totalmente la pared del tubo dejando que el contenido escape ("Burn Through").
- El segundo aspecto esencial tiene que ver con el enfriamiento acelerado debido al flujo interior del gas, haciendo que la soldadura tenga una zona afectada por el calor demasiado dura y por tanto ser susceptible al agrietamiento por hidrógeno. ("Hydrogen Cracking").

Por lo que la presente monografía tiene como objetivo realizar un estudio bibliográfico para encontrar las variables esenciales que mantengan un balance, ósea que aseguren una zona afectada por el calor sin problemas de agrietamiento y asimismo que aseguren un calor de entrada alto pero sin comprometer la integridad de pared del tubo e igualmente no provoquen demasiada distorsión térmica y esfuerzos residuales que comprometan un buen desempeño de los componentes que comprenden la reparación.

2.

ESTADO DEL ARTE

2.1. PROCESO DE SOLDADURA DE ARCO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

La soldadura está relacionada con casi todas las actividades industriales, además de ser una importante industria en sí misma. Gracias al desarrollo de nuevas técnicas durante la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios, tubería y barcos. Es una técnica fundamental en la industria automotriz, en la aeroespacial, en la fabricación de maquinaria y en la de cualquier tipo de producto hecho con metales.

La sociedad americana de la soldadura (AWS por sus siglas en inglés) define un proceso como una acción progresiva o una serie de acciones que participan en el curso de la producción de un tipo de resultado [4].

El tipo de proceso de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas y químicas de los metales que se van a unir, de la utilización a la que estará destinada la pieza, del medio ambiente en el que estará en servicio y de las instalaciones disponibles [3].

2.1.1. Principios del proceso de soldadura SMAW

Como se puede observar en la Figura 2.1 el proceso de soldadura de arco manual con electrodo revestido ("Shielded Metal Arc Welding" por sus siglas en ingles SMAW) se encuentra dentro de la clasificación de procesos de soldadura con arco (AW).

El proceso de soldadura de arco manual con electrodo revestido o también conocido como soldadura de electrodo cubierto o como soldadura con varilla, es un proceso en el cual se funde o se une a los metales por calentamiento suministrado por un arco que se forma entre un electrodo metálico revestido y la pieza de trabajo [5], en este proceso las gotas de metal derretido son transferidas a través del arco y son convertidas en un cordón de soldadura, un escudo protector de gases es producido de la descomposición del material fundente que cubre el electrodo, además, el fundente también puede proveer algunos elementos aleantes al cordón, la escoria derretida se escurre sobre el cordón de soldadura donde protege el metal soldado aislándolo de la atmósfera durante la solidificación, esta escoria también ayuda a darle forma al cordón de soldadura especialmente en soldadura vertical y sobre cabeza [5-6].

Como se mencionó anteriormente, la escoria tiene diversa funciones, éstas pueden resumirse en las siguientes: función eléctrica del recubrimiento, función física de la escoria (como protección) y función metalúrgica del recubrimiento (ver Figura 2.2).

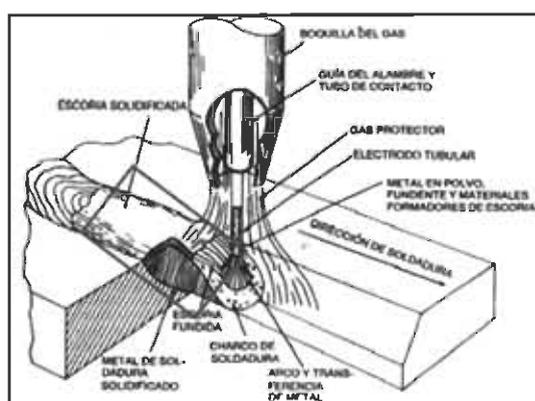


Figura 2.2. Características y funciones de la escoria [7]

El núcleo del electrodo proporciona la mayor parte del metal de aporte de soldadura, la escoria debe ser removida subsecuentemente de la deposición de cada cordón de soldadura [5-6].

El arco eléctrico puede alcanzar temperaturas del orden de los 5500 °C, depositándose el núcleo del electrodo fundido en el material que se está soldando, a su vez mediante la combustión del recubrimiento se genera una atmósfera que permite la protección del proceso, esta protección se circunscribe para evitar la penetración de humedad y posibles elementos contaminantes.

El principio de funcionamiento del proceso de soldadura SMAW es muy sencillo, durante la formación del arco el electrodo y la pieza de trabajo forman parte de un circuito eléctrico como se muestra en la siguiente figura.

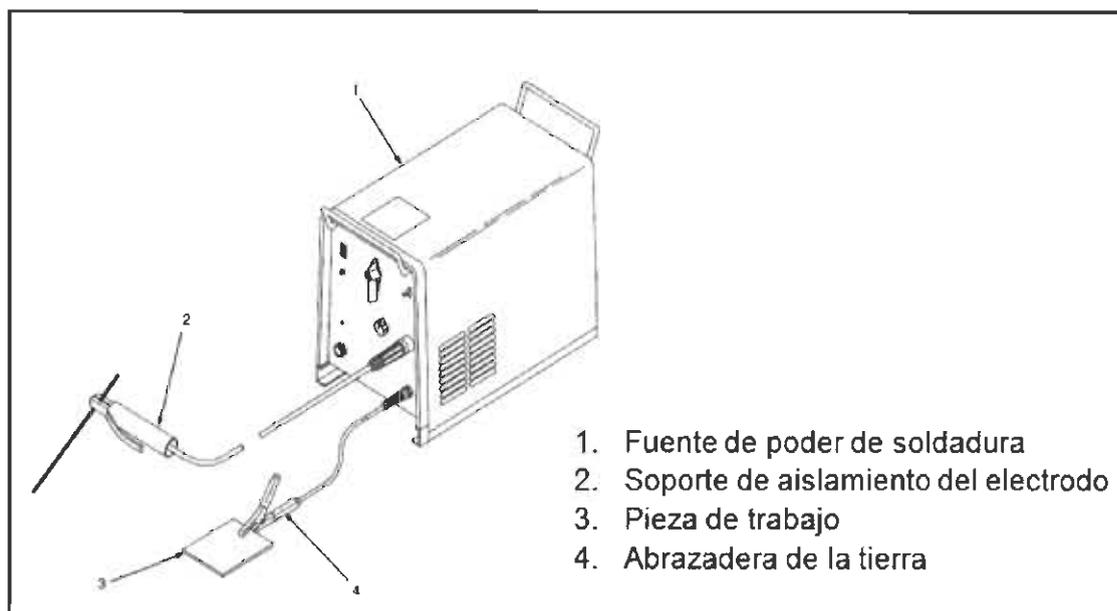


Figura 2.3. Circuito eléctrico en el proceso de soldadura SMAW [5]

En este proceso de soldadura es muy importante un control exhaustivo de los parámetros de soldadura. Cuando el electrodo se desplaza a lo largo de la pieza a una velocidad de avance adecuada los depósitos de material se distribuyen a lo largo del cordón en forma uniforme [5]. Así mismo es importante mencionar que la potencia en los procesos de soldadura se mide en voltaje y corriente, el voltaje (voltios) se rige por la longitud del arco entre el electrodo y la pieza de trabajo y se ve influida por el diámetro del electrodo. La corriente es

una medida más práctica de la potencia en un proceso de soldadura y se mide en amperios (Amps) y el fundamento para el control de este parámetro es sencillo, para un electrodo delgado se requiere menos amperaje que para uno grueso o pequeño [6].

Los mejores resultados de soldadura se logran manteniendo un arco corto, moviendo el electrodo a una velocidad uniforme, y la alimentación del electrodo a una velocidad constante la cual está relacionada con la velocidad de fundición del electrodo [6].

Otro de los cuidados importantes en el proceso de soldadura SMAW es el de los electrodos ya que el recubrimiento de los electrodos es higroscópico (absorbe con facilidad y retienen la humedad). La humedad que captan los electrodos, al exponerse a una atmósfera húmeda, se disocia durante la soldadura produciendo hidrógeno y oxígeno. Así en la zona térmicamente afectada pueden causar agrietamiento en frío. A fin de minimizar los problemas de humedad, es preciso empacarlos, almacenarlos y manejarlos correctamente. Los electrodos que han estado expuestos demasiado tiempo a la intemperie deben cocerse a una temperatura bastante alta para que expulsen la humedad absorbida, sin embargo un calentamiento excesivo puede dañar la cobertura del electrodo [6].

2.1.2. Clasificación de electrodos del proceso de soldadura SMAW

Existen diferentes tipos de electrodos utilizados en el proceso de soldadura SMAW. El tipo y tamaño del electrodo define los requerimientos de voltaje de 16 a 40 V y de amperaje de 20 a 550 Amps del arco, además la corriente de la fuente de poder puede ser alterna o continua dependiendo del electrodo empleado [5].

Las composiciones de los recubrimientos de los electrodos pueden ser orgánicas o inorgánicas, y estas sustancias se pueden subdividir en las que forman escoria y las que son fundentes. Algunos de los principales compuestos son:

- Para la formación de escoria se utilizan: SiO_2 , MnO_2 y FeO .

- Para mejorar el arco se utilizan: Na_2O , CaO , MgO y TiO_2 .
- Desoxidantes: Grafito, aluminio, polvo de hierro.
- Para mejorar el enlace: Silicato de sodio, silicato de potasio y asbestos.
- Para mejorar la aleación y la resistencia de la soldadura: Vanadio, cesio, cobalto, molibdeno, aluminio, zirconio, cromo, níquel, manganeso y tungsteno.

El diámetro del electrodo determina la intensidad de corriente promedio que debe utilizarse. Por ejemplo, para un diámetro de 4 mm puede emplearse una corriente de unos 150 a 200 A. En cuanto a la longitud de los electrodos la medida más usual es la de 356mm (14") existiendo además electrodos de 229 mm (9") y de 457mm (10 ").

La siguiente figura muestra un esquema del sistema de identificación de electrodos de acuerdo a la norma de la sociedad americana de soldadura (AWS) AWS A 5.1 [8].

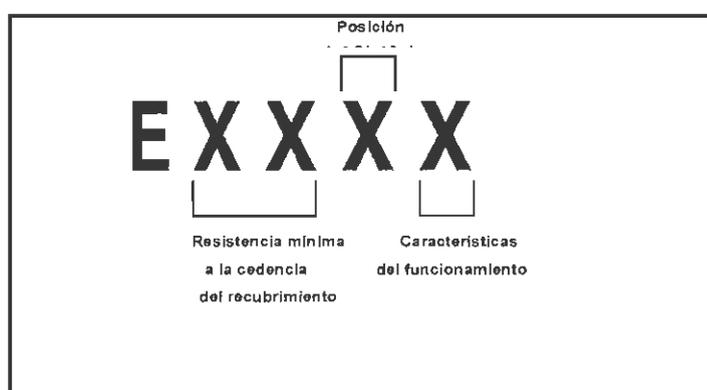


Figura 2.4. Sistema de identificación de electrodos de acuerdo a la norma AWS A 5.1 [8].

La "E" indica electrodo para soldadura por arco. El primer y segundo dígito (de izquierda a derecha) indican el esfuerzo mínimo de tensión del metal depositado en unidades PSI, esto se observa con mayor claridad en la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Indicación de los dígitos uno y dos en un electrodo del proceso SMAW [8,9,10]

| Clasificación | Esfuerzo mínimo a la tensión PSI (MPa) | Esfuerzo mínimo a la cedencia PSI (MPa) |
|---------------|--|---|
| E 60XX | 62,000 (425) | 50,000 (345) |
| E70XX | 70,000 (485) | 57,000 (395) |
| E 80XX | 80,000 (550) | 67,000 (460) |
| E 90XX | 90,000 (620) | 77,000 (530) |

El tercer dígito designa las posiciones de soldadura en que puede trabajar el electrodo y el cuarto dígito el tipo de revestimiento y el tipo de corriente adecuado para el electrodo [8,9]. Por ejemplo en la siguiente tabla se observan los tipos de recubrimiento y corriente, de cada uno de los valores para el cuarto dígito.

Tabla 2.2. Tipo de corriente usada y recubrimiento para cada uno de los valores del cuarto dígito [8,9,10]

| Clasificación | Tipo de corriente usada | Penetración | Recubrimiento |
|---------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------|
| EXXX0* | CDEP | Profunda | Celulosa, sodio |
| EXXX1 | AC, CDEP | Profunda | Celulosa, potasio |
| EXXX2 | AC, CDEN | Media | Rutilo, sodio |
| EXXX3 | AC, CDEP, CDEN | Ligera | Rutilo, potasio |
| EXXX4 | AC, CDEP, CDEN | Ligera | Rutilo, limadura de hierro |
| EXXX5 | CDEP | Media | Bajo hidrógeno, sodio |
| EXXX6 | AC, CDEP | Media | Bajo hidrógeno, potasio |
| EXXX7 | AC, CDEP, CDEN | Media | Polvo de hierro, óxido de hierro |
| EXXX8 | AC, CDEP | Media | Bajo hidrógeno, polvo de hierro |
| EXXX9 | AC, CDEP, CDEN | Media | Óxido de hierro, titanio, potasio |

Después de estos dígitos pueden ser agregados dígitos que designan características especiales en el electrodo.

penetración son generalmente usados para soldaduras en placas y soldaduras de penetración parcial, cuando el esfuerzo no es un factor que gobierna y para otras aplicaciones críticas menores. Los electrodos de baja penetración son usados en aplicaciones donde la profundidad de penetración no es crítica, estos electrodos principalmente están compuestos de celulosa, la cual provee la característica de baja penetración en estos electrodos.

La especificación para electrodos de acero de baja aleación para soldadura por arco de la Sociedad Americana de Soldadura es la AWS A 5.5 [11], esta especificación emplea un sufijo para designar la composición química del metal de soldadura como puede verse en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5. Especificación para electrodos de acero de baja aleación.

| SUFJO | C | MN | SI | NI | CR | MO |
|-------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | 0.12 | 0.6 - 1.0* | 0.40 - 0.80* | | | 0.40 - 0.65 |
| B1 | 0.12 | 0.9 | 0.60 - 0.80* | | 0.40 - 0.65 | 0.40 - 0.65 |
| B2L | 0.05 | 0.9 | 0.80 - 1.00* | | 1.00 - 1.50 | 0.40 - 0.65 |
| B2 | 0.12 | 0.9 | 0.60 - 0.90* | | 1.00 - 1.50 | 0.40 - 0.65 |
| B3L | 0.05 | 0.9 | 0.80 - 1.00* | | 2.00 - 2.50 | 0.90 - 1.20 |
| B3 | 0.12 | 0.9 | 0.60 - 0.80* | | 2.00 - 2.50 | 0.90 - 1.20 |
| B4L | 0.05 | 0.9 | 1.00 | | 1.75 - 2.25 | 0.40 - 0.65 |
| B5 | 0.07 - 0.15 | 0.40 - 0.70 | 0.30 - 0.60 | | 0.50 - 0.60 | 1.00 - 1.25 |
| C1 | 0.12 | 1.2 | 0.60 - 0.80* | 1.00 - 2.75 | | |
| C2 | 0.12 | 1.2 | 0.60 - 0.80* | 3.00 - 3.75 | | |
| C3 | 0.12 | 0.040 - 1.25 | 0.80 | 0.80 - 1.10 | 0.15 | 0.35 |
| D1 | 0.12 | 1.25 - 1.75 | 0.60 - 0.80* | | | 0.25 - 0.45 |
| D2 | 0.15 | 1.65 - 2.00 | 0.60 - 0.80* | | | 0.25 - 0.45 |
| G | | 1.00 Min | 0.80 Min | 0.50 Min | 0.50 Min | 0.20 Min |
| M** | 0.1 | 0.60 - 2.25 | 0.60 - 0.80* | 1.4 - 2.50 | 1.4 - 2.50 | 0.25 - 0.55 |

2.1.3. Parámetros del proceso de soldadura SMAW (5 y 6)

Como en todo proceso de soldadura, en el proceso de soldadura de arco manual con electrodo revestido es importante tener un control exhaustivo de los parámetros de proceso, con el fin de garantizar que las uniones manifiesten la calidad y las propiedades adecuadas y a su vez tengan un desempeño apropiado dentro de la aplicación que van a efectuar.

Los parámetros de control más importantes en el proceso de soldadura SMAW son:

- Tipo y polaridad de la corriente
- Amperaje
- Longitud del arco
- Velocidad de soldadura

A continuación se explicará más en detalle en la influencia que tiene cada uno de estos parámetros.

Tipo y polaridad de la corriente

La soldadura por arco manual con electrodo revestido puede efectuarse con corriente alterna o continua dependiendo del electrodo a usar. El tipo de corriente de soldadura y la polaridad, afectan la rapidez de fusión de los electrodos recubiertos.

La corriente continua (CC) siempre produce un arco más estable y una transferencia de metal más uniforme que la corriente alterna (CA). Esto se debe a que la polaridad de la corriente no está cambiando todo el tiempo, como sucede con la corriente alterna (CA).

El arco de CC hace que el charco de soldadura funda mejor las superficies de unión y produce un cordón más uniforme e incluso con amperajes bajos. Por esta razón, la CC es ideal para soldar secciones delgadas, también es preferida para soldar en posiciones, así como para soldar con arco corto. Dentro de las desventajas de soldar con CC está el flujo magnético, que puede ser un problema al soldar metales magnéticos (Hierro y Níquel), una forma de resolver este problema es cambiar a CA.

La soldadura con corriente alterna ofrece dos ventajas que no tiene la CC. Una es la ausencia de flujo magnético y la otra es el costo de la fuente de potencia. Al no haber flujo magnético, se pueden usar electrodos más grandes y

corrientes más elevados. Los electrodos que tienen hierro pulverizado en su revestimiento están diseñados para operar a mayores amperajes con CA.

Existen dos tipos de polaridades dentro del circuito de soldadura:

- Polaridad inversa (electrodo al positivo)
- Polaridad directa (electrodo al negativo)

La mayor parte de los electrodos recubiertos trabajan mejor con polaridad inversa (electrodo al positivo), aunque algunos son apropiados (e incluso diseñados) para polaridad directa (electrodo al negativo). La polaridad inversa logra mayor penetración, pero la directa aumenta la rapidez de fusión del electrodo [5].

Polaridad Inversa (electrodo al positivo)

Dos terceras partes del calor se concentran en el extremo del electrodo y una tercera parte sobre la pieza de trabajo.

- Mayor velocidad de deposición.
- Penetración de soldadura más profunda.

Polaridad Directa (electrodo al negativo)

Una tercera parte del calor se concentra en el extremo del electrodo y dos terceras partes sobre la pieza de trabajo.

- Penetración de soldadura menos profunda.

No es conveniente usar amperajes que rebasen el intervalo recomendado, ya que el electrodo puede sobrecalentarse y causar demasiada salpicadura, flujo magnético, socavación y agrietamiento del metal de soldadura [6].

Longitud del arco

La longitud del arco es la distancia entre la punta derretida del núcleo del electrodo y la superficie del charco de soldadura [5]. La transferencia de metal desde la punta del electrodo hasta el charco de soldadura no es una acción suave y uniforme, debido a esto, el voltaje del arco varía al transferirse las gotas de metal fundido a través del arco, incluso cuando la longitud de este se mantiene constante. Las variaciones en el voltaje serán mínimas si se suelda con el amperaje y la longitud de arco correcto. La longitud del arco correcta varía con la clasificación del electrodo, su diámetro, la composición del revestimiento, el amperaje y la posición de soldadura y además la longitud del arco aumenta al incrementarse el diámetro del electrodo.



Figura 2.5. Influencia del tamaño del arco [6]

Como se observa en la figura anterior, el tamaño del arco tiene un efecto considerable en las características del cordón de soldadura depositado. Si el arco es muy pequeño será muy estable, mas sin embargo el calor de entrada no será suficiente para fundir totalmente el electrodo ni lograr la penetración deseada. Con un arco grande se incrementara la penetración debido al incremento del calor de entrada, pero la complejidad de control en un arco excesivamente grande aumenta considerablemente, es por eso que es muy común encontrar defectos de soldadura como son los de salpicadura y socavado [6].

Velocidad de soldadura

El parámetro de velocidad de soldadura o de recorrido influye en la cantidad de calor que se aporta a la pieza, y por lo tanto, afecta la estructura metalúrgica del metal de soldadura y de la zona afectada térmicamente (ZAT). Como en la en gran parte de los procesos de soldadura, una velocidad de avance baja causa un incremento el aporte de calor y en consecuencia un acrecentamiento en el ancho de la zona afectada térmicamente y así mismo se reduce la velocidad de enfriamiento de la soldadura [5,12]. Un aumento en la velocidad de recorrido reduce el tamaño de la zona afectada por el calor y eleva la velocidad de enfriamiento de la soldadura, este aumento en la velocidad de enfriamiento puede elevar la resistencia mecánica y la dureza de una soldadura en un acero endurecible [12].

Existen diferentes factores para una velocidad de soldadura adecuada como son [6,12]:

- Tipo de corriente de soldadura, amperaje y polaridad
- Posición de soldadura
- Rapidez de fusión del electrodo
- Espesor del material
- Condición superficial del metal base
- Tipo de unión
- Preparación de la unión
- Manipulación del electrodo

Ángulos del electrodo

La posición angular del electrodo con respecto a la pieza de trabajo puede tener un efecto en la calidad del depósito de soldadura. La posición del electrodo determinará la facilidad con que será depositado libre de socavados, escoria y la uniformidad del cordón. El ángulo del electrodo es llamado también ángulo de avance y ángulo de trabajo [12]. El ángulo de avance es el ángulo entre la junta y el electrodo en plano longitudinal y el ángulo de trabajo es el ángulo entre el electrodo y el plano perpendicular de la dirección de viaje o avance. Para la posición plana o de nivel de soldadura es recomendable que el electrodo se encuentre entre 10 y 30 grados con respecto al eje perpendicular de la pieza de trabajo (la inclinación debe de ser hacia la dirección de soldadura) como lo muestra la siguiente figura.

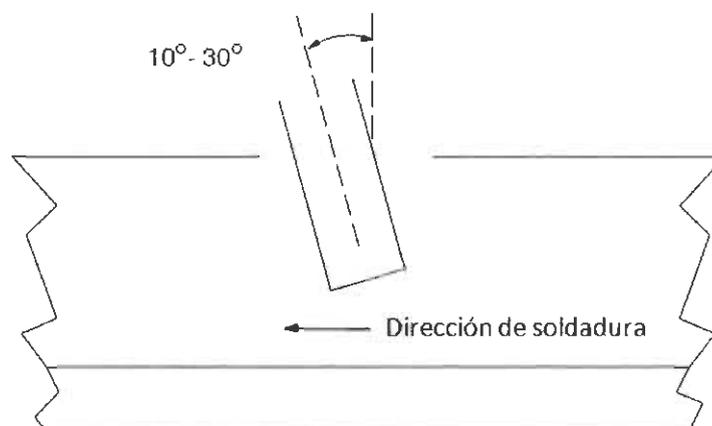


Figura 2.6. Angulo del electrodo en una soldadura con posición plana [6]

Para una posición horizontal para en una junta en "T" lo recomendable es soldar a 45 grados con respecto a cada una de las placas [6], como lo muestra la siguiente figura.

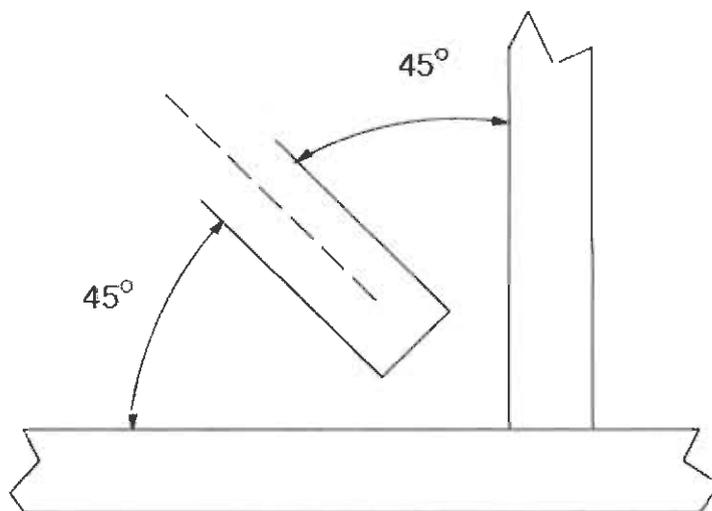


Figura 2.7. Ángulo del electrodo en una junta en "T" [6]

2.2. TUBERÍA DE CONDUCCIÓN

En forma general una tubería es un conducto formado de tubos por donde se lleva el agua, los gases combustibles, petróleo, etc. y que con base al uso, podemos dividir en cuatro grupos [13]:

- Tubería de perforación (Drill Pipe)
- Tubería de revestimiento (Casing)
- Tubería de proceso (Process Pipe)
- Tubería de conducción, de transporte o de línea (Line Pipe)

La tubería de conducción, de línea o transporte es aquella que transporta hidrocarburos en una fase o multi-fases, entre estaciones y/o plantas para su proceso, bombeo, compresión, almacenamiento y distribución [13].

En la siguiente figura se muestra el esquema de una tubería de conducción de gas según la norma ASME B 31.8-2007 [14].

2.2.1. Procesos de fabricación de tuberías de conducción

Para el proceso de reparación de tuberías de conducción es necesario que se tomen en cuenta los métodos empleados en la fabricación de esta, ya que esto permite la anticipación de los posibles mecanismos de falla, durante y después del proceso de reparación por soldadura SMAW, así como determinar las condiciones finales químicas, de distorsión térmica y de integridad mecánica en la tubería y componentes empleados para la reparación.

De acuerdo a los aspectos que el fluido a transportar impone sobre la tubería, esta debe cumplir con ciertos requisitos químicos y mecánicos dependiendo el uso (ver Figura 2) [13].

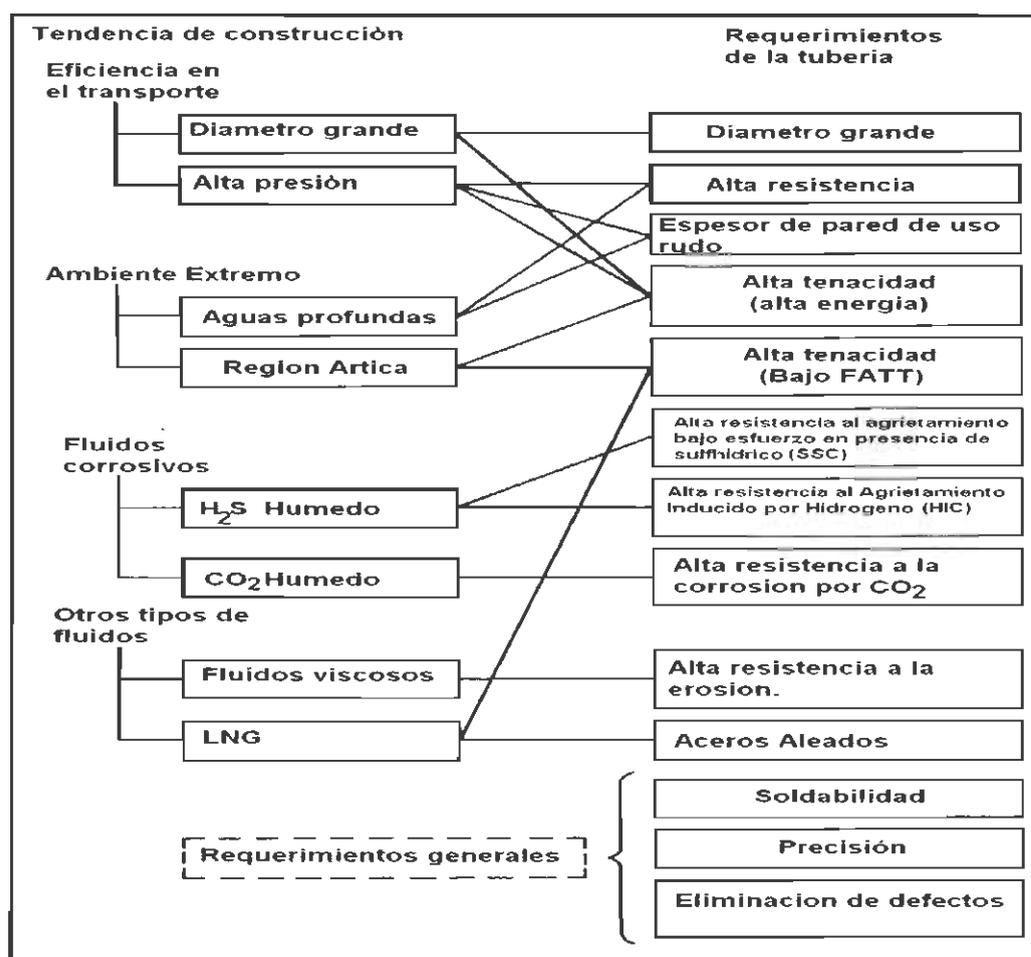


Figura 2.9. Requisitos de tubería conductora dependiendo el uso [13]. Tomando como referencia la norma API SPEC 5L, se pueden agrupar en dos, los procesos de fabricación de los tubos empleados en el transporte de hidrocarburos dependiendo los siguientes aspectos (Tabla 2.7) [16]:

Tabla 2.7. Clasificación según API 5L considerando si el tubo fue o no soldado durante su fabricación [16].

| PROCESO SIN COSTURA (Fig. 4.4a) | PROCESO CON COSTURA (Figura 4.4b y 4.4c) | |
|--|--|---|
| | Sin metal de aporte | Con metal de aporte |
| Acero trabajado en caliente para forma un producto tubular sin cordones de soldadura. ○ Extrusión  | ❖ Soldadura por difusión ❖ Soldadura por resistencia eléctrica ❖ Soldadura láser | Soldadura por Arco Sumergido ■ Cordón simple o doble ■ Tipo Longitudinal ■ Tipo Helicoidal |
| | | Soldadura de Arco Metal – Gas ■ Cordón simple o doble ■ Tipo Longitudinal ■ Tipo Helicoidal |

Acorde a esta norma los aspectos más importantes respecto a la fabricación son el material (propiedades químicas y mecánicas, y el grado y especificación de calidad) y las dimensiones (diámetro, espesor, peso y longitud de la tubería).

Los defectos de fabricación que puede llegar a tener la tubería se dividen en tres categorías, que son:

1. Los propios de la placa.
2. Los propios de la soldadura.
3. Los propios de la fabricación.

Dentro de la categoría de los defectos propios de la soldadura se encuentran las grietas, la fusión incompleta, la penetración incompleta, las inclusiones de escoria, la porosidad, las socavaciones, la convexidad, la quemadura por arco y las salpicaduras.

2.2.2. Características del gas transportado

Tomando como base los registros estadísticos de producción nacional del año 2006, en México se distribuyeron 5,356.1 millones de pies cúbicos diarios de gas natural, de los cuales el 57.7% corresponde a gas amargo y el 42.3% restante a gas dulce.

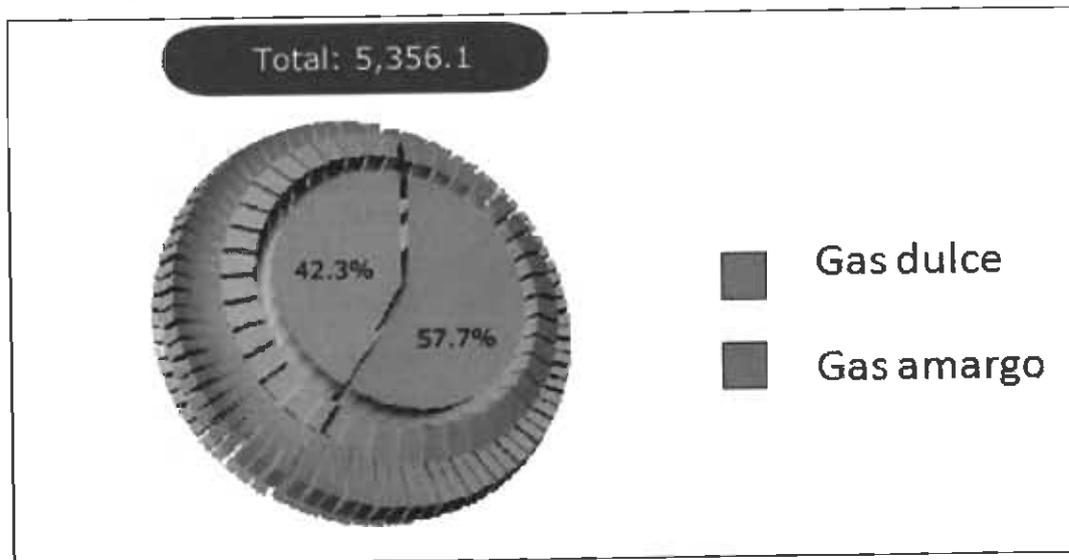


Figura 2.10. Distribución por tuberías de conducción de gas diariamente en México [17]

La calidad y composición química del material transportado es un factor determinante que influye en los mecanismos de daño de las tuberías de conducción, por lo cual se describen las características del gas.

Gas dulce

Gas transportado a una presión de operación menor a 0.1 atm, o transportado a una presión mayor de ésta, que:

- A pesar de contener ácido sulfhídrico no contiene agua en fase líquida.
- A pesar de contener agua en fase líquida y ácido sulfhídrico (H_2S), la presión parcial de éste, es menor de 0.1 atm.

Gas amargo

Gas natural transportado a una presión de operación mayor de 0,45 MPa (65 psi), que contiene agua en fase líquida o vapor y ácido sulfhídrico (H_2S), este último con una presión parcial de H_2S mayor o igual a 0.1 atm. En la tabla siguiente se muestra la composición de este tipo de gas, en este caso es una muestra del gasoducto Subdirección Región Sur activo integral Bellota –Jujo coordinación de operación de pozos e instalaciones de explotación.

Tabla 2.8. Esquema de Composición química del gas amargo

| COMPONENTE | % MOL | COMPONENTE | % MOL |
|-------------------|---------|----------------------|---------|
| NITRÓGENO | 1.3020 | ISOBUTANO | 0.9740 |
| CO ₂ | 4.1350 | BUTANO NORMAL | 1.8680 |
| ACIDO SULFHIDRICO | 5.9540 | ISOPENTANO | 0.4090 |
| METANO | 57.0100 | PENTANO NORMAL | 0.0140 |
| ETANO | 19.3970 | HEXANO Y MAS PESADOS | 0.4220 |
| PROPANO | 8.1550 | | |
| | | TOTAL | 100.00% |

Los gasoductos pueden presentar defectos debido a varias razones, por ejemplo, el mal diseño de la tubería, errores de operación o corrosión.

Según estudios del organismo internacional NACE, el 5% de las fallas de soldaduras de conducción de hidrocarburos es causado por problemas en la soldadura [18], por lo que es importante el control de los efectos causados por la soldadura, y más aun cuando se trata de una reparación con el uso envolventes.

Es por eso que este trabajo se enfoca en el estudio de los efectos de la distorsión (expansión y contracción) en la instalación de envolventes metálicas de acero al carbono en gasoductos que transportan gas amargo.

2.3. REHABILITACIÓN DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN

Para facilitar la rehabilitación de tuberías de conducción es recomendable el uso de una metodología para la rehabilitación o reparación de tubería de conducción. Andrew Palmer y asociados [19] proponen un conjunto de pasos a seguir para mejorar la calidad de la reparación de una tubería de conducción que son los siguientes:

1. Inspección y detección. Etapa 1:
2. Evaluación de discontinuidades. Etapa 2:
3. Respuesta a detección. Etapa 3:
4. Rehabilitación o reparación. Etapa 4:

Dentro de esta metodología propuesta es importante usar herramientas de administración de proyectos y de modelos de costos [19].

Otro punto muy importante durante la metodología de reparación es lo necesario que es contar con métodos adecuados para evaluar la severidad de defectos detectados en un ducto y evitar así reparaciones y/o rehabilitaciones innecesarias.

Actualmente la decisión de reparar un ducto está en función de la severidad del defecto presente, para un ducto esta decisión está basada en dos criterios [20]:

1. La capacidad del ducto de soportar la presión interna (su resistencia residual).
2. La vida remanente del ducto.

Si el defecto reduce la vida remanente a un periodo menor del esperado para la operación la reparación es necesaria. La decisión en términos de la resistencia residual, además de las distorsiones térmicas es algo que consta de gran complejidad y se estudiara en esta monografía [21].

La última etapa del programa de reparación y rehabilitación es la evaluación del mecanismo de reparación. La evaluación de la integridad mecánica determina con que método de reparación se solucionara el problema en puesta. Existen distintos métodos de reparación dentro de los cuales enlistamos los más comunes [22].

- Esmerilado.
- Soldadura de relleno.
- Camisa metálica de refuerzo soldada (envolvente)
- Camisa de refuerzo no metálica.
- Camisas mecánicas (grapadas, abrazaderas de fábrica o envolventes atornilladas).
- Sustitución de carrete.
- Actualización de la Protección Catódica.

El estudio realizado en este trabajo de monografía se centraliza en la rehabilitación de tubería de conducción mediante envolvente soldada o también conocida como camisa metálica de refuerzo soldada.

2.4. ENVOLVENTES SOLDADAS

Hay dos puntos básicos sobre soldadura de equipo en servicio. el primer punto es acerca de evitar falla por quemada pasante, donde el arco de soldadura causa una perforación en la pared del equipo. El segundo punto es el agrietamiento por hidrógeno, donde las soldaduras en servicio han sido hechas con una velocidad de enfriamiento rápida como resultado del flujo contenido que ayuda a la evacuación de calor por la pared de la tubería [23].

La aplicación de la soldadura en servicio debe lograr un balance entre seguridad y evitar propiedades no satisfactorias. Por ejemplo, si la pared de la tubería es menor que 0.250 pulg, puede ser necesario limitar el calor aportado para minimizar el riesgo de falla por quemada pasante; pero un bajo nivel de calor de aporte puede ser insuficiente para superar la evacuación de calor por parte del fluido transportado resultando en una excesiva velocidad de enfriamiento con los consecuentes riesgos de agrietamiento por hidrógeno.

Cuando no es posible dejar al ducto fuera de servicio, una técnica común de reparación en línea viva es la instalación de una envolvente circunferencial completa, soldada.

Un envolvente es un elemento cilíndrico de alta resistencia mecánica y que encierra completamente la zona dañada de una tubería, actuando como refuerzo mecánico para ayudar al ducto a soportar las expansiones causadas por la presión de operación o como un contenedor hermético para el caso de un tubo con fuga. La camisa puede ser fabricada a partir de un tubo de diámetro un poco mayor al del tubo a reparar, cortándose en dirección longitudinal a la mitad, o bien fabricadas por rolado de placa, forja o fundición. Estas se colocan alrededor del tubo dañado, alineándose y uniéndose circunferencialmente mediante el proceso SMAW, como se muestra en la Figura 2.11. Los códigos para recipientes a presión y sistemas de tuberías requieren que la camisa sea

diseñada para soportar como mínimo la presión de diseño del ducto y deben ser de una longitud axial mínima de 4 pulgadas, no habiendo limitante expresa para la longitud máxima [20, 24].



Figura 2.11. Unión circumferencial de envoltente con el proceso SMAW (20, 24)

Durante la instalación del envoltente se utilizan dos tipos aplicaciones de soldadura, que son la soldadura del tipo circumferencial y longitudinal, esto se observa con mayor claridad en la siguiente figura.



Figura 2.12. Soldadura en envoltente durante su instalación [23]

La soldadura circumferencial en las envoltentes es opcional cuando éstas se instalen únicamente para refuerzo y no para contener la presión interna o

cuando no se tenga fuga en el ducto. Se deben dar consideraciones especiales para minimizar concentraciones de esfuerzos resultantes de la reparación. Las envolventes circunferenciales completas, instaladas para eliminar fugas, o para contener la presión interna deben estar diseñadas para soportar la presión de diseño o la máxima de operación del sistema que se va a reparar. Dicha envolvente será soldada en su totalidad tanto circunferencial como longitudinalmente [1].

Este método de reparación puede dividirse en dos tipos, los cuales se describen a detalle en las páginas siguientes:

- **TIPO A:** Provee un refuerzo mecánico al tubo, pero no es diseñada para contener la presión del fluido ni fugas.
- **TIPO B:** Se conceptualiza como un recipiente a presión, diseñado para contener la presión de operación del ducto en caso de fuga.

La siguiente tabla entra más en detalle de las características de cada uno de los tipos de envolventes.

Tabla 2.6. Características de los tipos de envolventes [24]

| TIPO | CARACTERÍSTICAS | VARIANTE |
|-----------|--|--|
| TIPO A | Sin soldar al tubo (de refuerzo únicamente) | Camisa completa, soldada longitudinalmente |
| | | De media caña, sin soldadura |
| | | Camisa completa, fijada con tornillos |
| TIPO B | Soldada al tubo (contenedor de presión) | Camisa completa, soldada al tubo circunferencial y longitudinalmente |
| | | Camisa completa, soldada al tubo circunferencialmente y longitudinalmente con espacio anular |

Prácticamente todos los defectos de la tubería pueden ser reparados con el envolvente tipo A, esto se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 2.9. Defectos que se pueden reparar con envoltentes tipo A

| NOVICACIONES | ACCIONES PERMITIDAS DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO EN TUBERÍA DE PROCESO | | | | | | CRITERIOS DE ACEPTACIÓN |
|--|---|---|------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------|--|
| | Sustitución de tramo | Envolvente circunferencial completa soldada | Esmerilado | Relleno con material de aporte | Refuerzo no metálico | Operar a presión reducida | |
| Abolladuras | X | X | | | | | Las que no excedan una profundidad de 6 mm (1/4 pulg.) en un tubo de 305 mm (12 pulg.) de diámetro nominal y menores a 6% del diámetro nominal de tubos mayores de 305 mm (12 pulg.) y no afecten a una unión soldada (longitudinal o circumferencial) y no contengan impurezas atrancadoras. |
| Muecos y ranuras | X | X | X | | | | Profundidad menor de 10% del espesor nominal. |
| Defectos en soldadura | | | | | | | |
| Penetración inadecuada y fusión incompleta | X | X | | X | | | Menores a 25.4 mm (1 pulg.) de longitud. |
| Cavidades por quemaduras | X | X | | | | | Para diámetros de 305mm (12 pulg.) y menores, hasta 6.4 mm (1/4 pulg.) de longitud y para diámetros mayores de 305 mm (12 pulg.), hasta un espesor nominal del material base, si el espesor es mayor a 6.4 mm (1/4 pulg.). |
| Inclusiones de escoria | X | X | | | | | Hasta 50.8 mm (2 pulg.) de longitud e 1.6 mm (1/16 pulg.) de ancho. |
| Porosidad o burbujas de gas | X | X | | | | | Hasta 1.6 mm (1/16 pulg.) de diámetro. |
| Socavación | X | X | | | | | Hasta una profundidad de 6.4 mm (1/32 pulg.) a 12.5% del espesor, si el espesor es mayor a 6.4 mm (1/32 pulg.) y su longitud no excede el valor de 50.8 mm (2 pulg.) o 1/8 de la longitud de soldadura, si que sea menor. |
| Laminaciones en metal base | X | X | | | X | X | Profundidad menor de 10% del espesor nominal y sin contacto con la soldadura. |
| Quemaduras por arco (Daños Calientes) | X | X | X | X | | | Los daños calientes que tengan una profundidad no mayor a 10% del espesor nominal de la tubería no ameritan reparación ni estudio. Los daños calientes iguales o mayores a 10% del espesor nominal de la tubería deben ser evaluados con estudios de ingeniería basados en métodos de evaluación de pérdida localizada de metal, aumentando un 10% las dimensiones del daño. |
| Grietas o fisuras | X | X | | | | | Inaceptable cualquier tamaño. Reparar a la brevedad posible con base en un estudio de mecánica de fractura. Las grietas persistentes o que hayan alcanzado su tamaño crítico de acuerdo a un estudio de mecánica de fractura deben ser reparados de inmediato, antes tanto la presión debe reducirse a un nivel seguro ESTUDIAR EL EFECTO DE LA PRESIÓN REDUCIDA . |
| Corrosión externa generalizada | X | X | | | X | X | Espesor mínimo requerido conforme a E.1.2.11 de la NFP-012-PIB/EN-2008. |
| Corrosión interna generalizada | X | X | | | | X | Espesor mínimo requerido conforme a E.1.2.11 de la NFP-012-PIB/EN-2008. |
| Corrosión externa localizada | X | X | | X | X | X | De acuerdo con el ASME-B31G Modificado. |
| Corrosión interna localizada | X | X | | | | X | De acuerdo con el ASME-B31G Modificado. |

Es importante mencionar que si la tubería no puede dejar de operar durante una reparación que involucre trabajos de soldadura, se debe reducir la presión de operación a un nivel seguro, realizándose en cada caso un análisis en el que participen las dependencias de Operación, Mantenimiento y Seguridad de la entidad responsable de la tubería [1].

Una vez realizada la reparación, mediante soldadura SMAW, el efecto de la solidificación en el charco de soldadura produce expansiones y contracciones térmicas, que a su vez provocan esfuerzos internos en la soldadura; dichos esfuerzos son los esfuerzos residuales los cuales producen las distorsiones en los elementos soldados [25].

A continuación en este trabajo se entrara más en detalle sobre el efecto que tienen los esfuerzos residuales, y las distorsiones en componentes soldados por procesos de soldadura por arco, enfatizándose en el proceso SMAW.

2.5. ESFUERZOS RESIDUALES EN SOLDADURAS

Partiendo del concepto que maneja la normativa de Petróleos Mexicanos de que los esfuerzos son las reacciones de un cuerpo a la acción de fuerzas, cargas, presiones o desplazamientos aplicados [1,2], un esfuerzo residual en soldadura es aquel que es generado por las fuerzas y desplazamientos ocasionadas por las contracciones y expansiones durante el proceso de solidificación del charco de soldadura.

Los esfuerzos residuales son esfuerzos que están presentes en el interior del material y que permanecen en él cuando se eliminan todas las cargas aplicadas. Las tensiones residuales originadas por la soldadura se producen como consecuencia de las diferentes expansiones y contracciones generadas al calentar localmente el material y también por los cambios dimensionales que son inducidos por las transformaciones microestructurales que se presentan.

La soldadura permite la fusión de metales o unión metalúrgica debido a que este es un proceso de aporte de metal fundido, el cual, produce excesivo calor y éste es depositado de forma puntual en los elementos a soldar, lo que crea calentamientos y enfriamientos no uniformes, lo cual ocasiona expansiones y contracciones respectivamente [12]. Este fenómeno es natural en todos los metales debido a las propiedades físicas que estos poseen. Este efecto de expansiones y contracciones crea deformaciones de las estructuras soldadas, las cuales pueden ser perjudiciales, a tal punto de desechar el componente soldado si el nivel de distorsión es muy alto.

La naturaleza de los esfuerzos en estructuras soldadas es discutida en términos de su magnitud, direccionalidad, distribución espacial, rango y variabilidad. Los efectos de los siguientes factores en los esfuerzos residuales son considerados: propiedades del material, manufactura del material, geometría estructural, proceso de fabricación, proceso de soldadura, tratamientos pos soldadura y condiciones de servicio.

Como se menciono anteriormente, el hecho de aplicar soldadura implica la aplicación de calor altamente localizado en metales que responden a la ley física de expansión contracción, capaces de afectar su estructura y en condiciones de movimiento restringido, de esta manera se puede afirmar que durante el calentamiento que la soldadura impone a una pequeña parte de las piezas, el aumento de volumen de esta resulta impedido por el calentamiento desigual del metal base y por el grado de embridamiento que tenga la misma, por lo que el crecimiento de volumen libre será función directa del gradiente de temperatura " ΔT " y del coeficiente " α " de dilatación del material calentado [26].

En el caso de una unión soldada, en la zona de influencia térmica (ZIT), donde se supera el valor de temperatura del campo elástico, la tensión de compresión tiende a superar la de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo logra. El proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente, resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, esfuerzos térmicos de tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material. Cualquier proceso que aporte calor en forma localizada sobre una pieza de acero y de tal manera que a la temperatura final se produzcan deformaciones plásticas, dejará en dicha pieza esfuerzos residuales de valor generalmente igual o muy próximo al límite de fluencia del material a temperatura ambiente. La siguiente figura muestra algunos de los factores por los que se generan esfuerzos residuales en la soldadura.

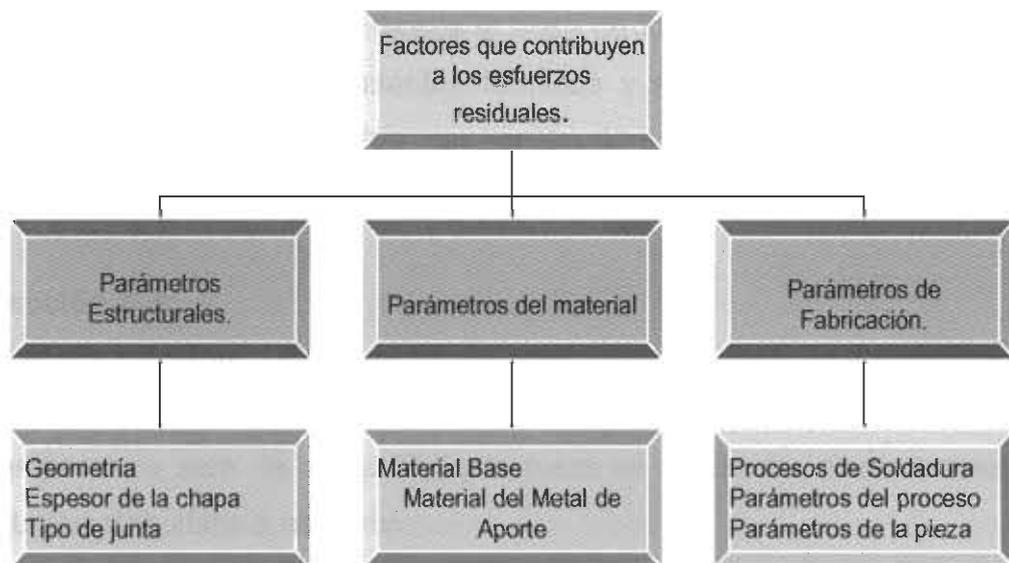


Figura 2.13. Factores que influyen en la generación de esfuerzos residuales en la soldadura

Cualquier proceso que aporte calor en forma localizada sobre una pieza de acero y de tal manera que a la temperatura final se produzcan deformaciones plásticas, dejará en dicha pieza esfuerzos residuales (ver Figura 2.14) de valor generalmente igual o muy próximo al límite de fluencia del material a temperatura ambiente

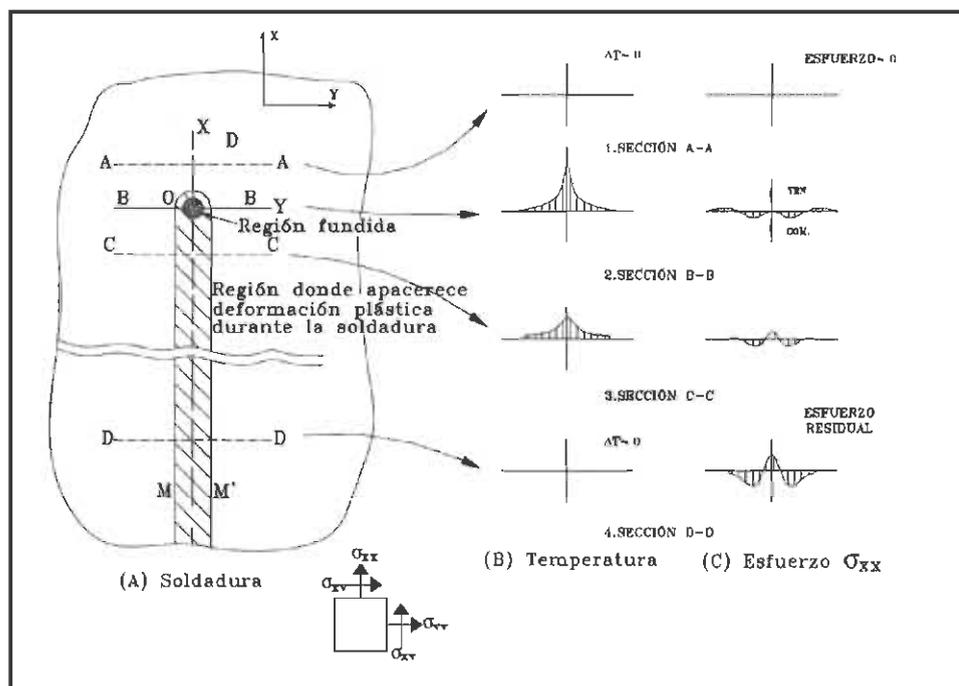


Figura 2.14. Estados transitorios y finales durante la soldadura [26]

A continuación se explica (sobre la base de lo planteado por Masubushi K. [26]) el curso de acontecimientos térmicos y movimientos de expansión contracción cuando se efectúa un cordón de soldadura sobre una chapa lo cual se puede dividir en 4 secciones, como muestra la Figura 2.14.

La sección A-A.

Ubicada delante de fuente de calor todavía no ha experimentado perturbación alguna como consecuencia del arco situado en "B", por lo tanto su temperatura será la inicial " T_0 " y la pieza se encuentra libre de tensiones residuales atribuibles a ese arco.

La sección B-B.

Ubicada en el centro del arco experimenta un súbito crecimiento de temperatura hasta alcanzar el valor máximo, se produce la elevación de temperatura de las zonas adyacentes.

Este aumento de temperatura provoca la dilatación de las masas y consecuentemente aparecen tensiones de compresión en las zonas adyacentes al metal fundido.

En las zonas más alejadas y frías, responsables de embridamiento de las zonas que se expanden aparecen tensiones de tracción para mantener el equilibrio de tensiones de la pieza. El metal fundido carece de resistencia mecánica, por lo que en el centro de la soldadura la tensión tendrá valor cero.

La sección C-C.

Estará enfriándose después de haber sido transitada por el arco en razón de la conductividad térmica del metal, tan pronto como pase el arco comenzará la evacuación del calor hacia el resto de la pieza con lo que descenderá la temperatura de la zona calentada por este. En lo que respecta al estado de tensiones se observa que al enfriarse las zonas dilatadas en condición de embridamiento, surgen tensiones de tracción en la zona de soldadura y en la zona afectada por el calor. En zonas alejadas

aparecen tensiones de compresión para que se cumpla la condición de equilibrio.

La sección D-D.

Suficientemente alejada del arco como para que se haya producido el enfriamiento total, se encontrará nuevamente la temperatura inicial de la pieza, las tensiones tendrán su valor máximo final que corresponde al estado permanente definitivo de las tensiones residuales.

Es importante señalar, que durante los estados transitorios, como en la condición final, deberán satisfacerse las condiciones clásicas de equilibrio de las fuerzas y momentos totales actuantes, es decir, que la sumatoria de las fuerzas residuales es nula, lo que implica ausencia de traslación y rotación.

Una de las variables importantes a considerar es el gradiente de temperatura que se crea al soldar, y además el número de pasadas de soldadura, estas variables dan origen a esfuerzos que causan cambios en la microestructura de los metales. Si los metales tuviesen un coeficiente de dilatación térmica de cero, los esfuerzos no podrían desarrollarse en la soldadura y por lo tanto no habría contracciones ni distorsiones en elementos soldados, pero como se sabe que todos los metales se expanden y se contraen cuando se calientan y se enfrían causando cambios en el volumen de la pieza en conjunto, o sea; cambios en las dimensiones [26].

La distribución de los esfuerzos residuales interna en una soldadura se muestra en la figura 2.15, en esta figura se observan los esfuerzos internos a lo largo del cordón (σ_x) y los esfuerzos transversales (σ_y).

En ella se puede apreciar que a lo largo del cordón se forman altos esfuerzos residuales de tracción, los cuales descienden rápidamente conforme se alejan de la soldadura hasta convertirse en esfuerzos residuales de compresión en el material base. Aquí es importante tener en cuenta dos variables: el esfuerzo residual máximo de tracción presente ($\sigma_{max} = \sigma_m$) y el ancho de la zona traccionada ($2f$).

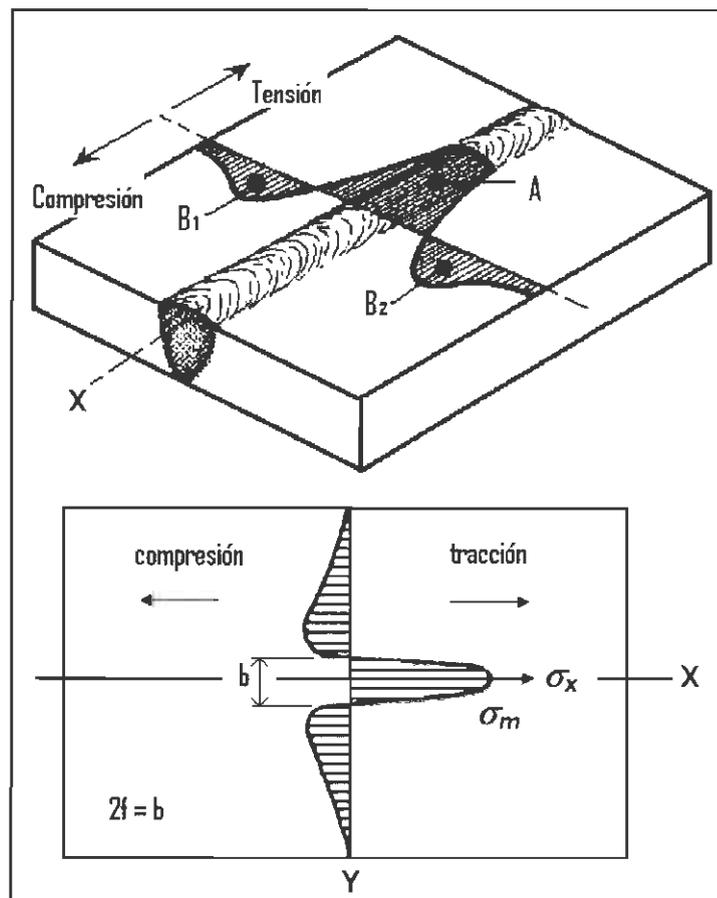


Figura 2.15. Distribución de esfuerzos residuales longitudinales en una placa debido al proceso de soldadura [27].

Como se puede observar en la figura 2.15, la misma soldadura provoca esfuerzos residuales transversales al cordón, pero de menor magnitud. Sin embargo pueden aumentar cuando se restringe la contracción lateral de las placas al momento de soldarlas.

Cuando las planchas son fijadas a través de dispositivos (mecanismos de sujeción) de manera que se impide su deformación en la dirección perpendicular al cordón, aparecen esfuerzos de tracción uniformes a lo largo de la soldadura que se suman a las tensiones residuales e incrementan la tensión máxima en la dirección transversal. Este fenómeno se muestra en la figura 2.16.

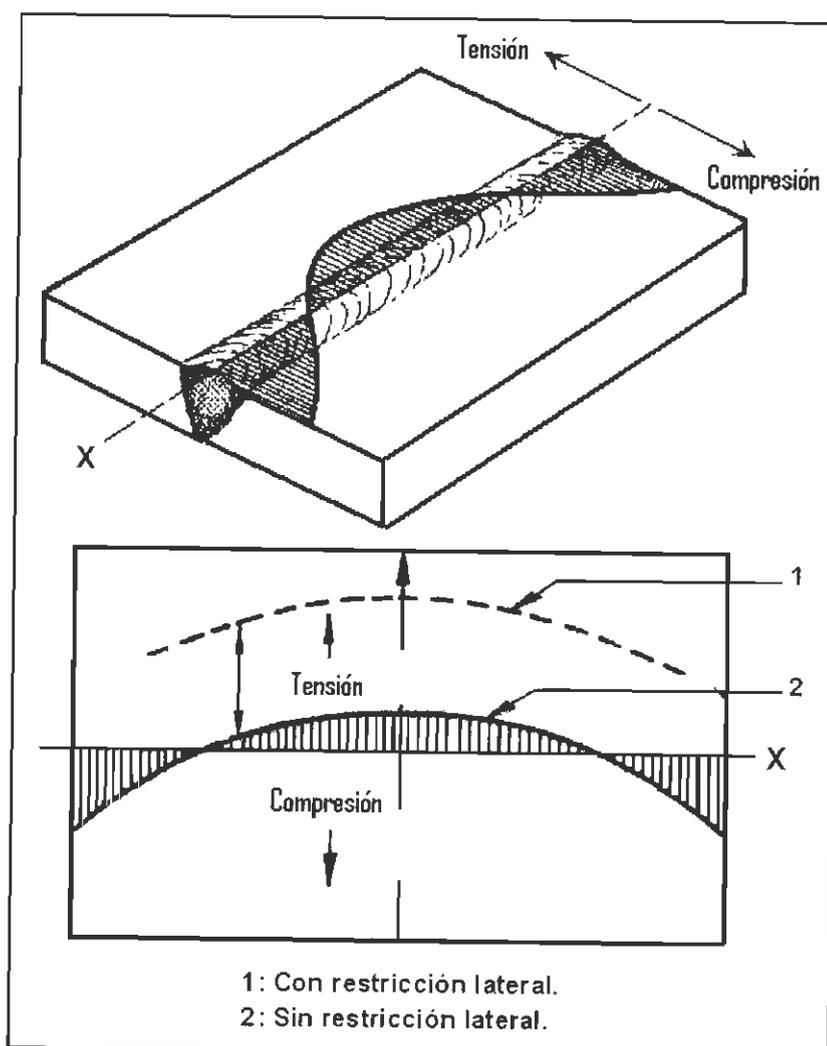


Figura 2.16. Esfuerzos residuales transversales en placas sujetadas con mecanismos de clampeo

2.5.1. Clasificación de los Esfuerzos Residuales

Los esfuerzos residuales se clasifican en: Esfuerzos Residuales Macroestructurales y Esfuerzos Residuales Microestructurales. Las expansiones producidas por el calentamiento de una placa durante su soldadura pueden originar esfuerzos residuales macroestructurales, mientras que transformaciones microestructurales (como la formación de martensita en el acero) puede dar origen a esfuerzos residuales microestructurales.

Otra clasificación que se hace en los esfuerzos residuales en la soldadura es de de acuerdo al mecanismo que los producen:

1. Las producidos por diferencias estructurales.
2. Los producidos por una desigual distribución de las tensiones no-elásticas, incluyendo las tensiones plásticas y térmicas.

Los esfuerzos residuales que permanecen después del enfriamiento dan origen a la mayoría de los problemas en la pieza soldadas. Los esfuerzos residuales afectan en forma significativa a fenómenos que suceden a bajos niveles de aplicación de tensión, tales como:

1. Fractura frágil.
2. Fisuración por tenso-corrosión.
3. Carga crítica de piezas expuestas a colapso elástico.
4. Estabilidad dimensional después del mecanizado.

2.5.2. Efectos de los Esfuerzos Residuales Sobre la Integridad de la Soldadura

Los esfuerzos residuales pueden disminuir considerablemente la resistencia a la tracción de las estructuras soldadas cuando éstas se encuentran sometidas a determinados mecanismos de deterioro, para entender ello es importante analizar el gráfico en la figura 2.17, en él se aprecian placas soldadas a tope y como consecuencia del calor de la soldadura se producen tensiones residuales longitudinales representadas por la curva A. esta primera curva se caracteriza por tener un alto nivel de tensiones residuales en el centro del cordón, pero siempre menores al límite de fluencia del material (curva D). Si ahora esta estructura soldada es sometida en servicios a esfuerzos externos uniformes de magnitud $\sigma = \sigma_1$, las tensiones resultantes serán la suma de éstas y de los esfuerzos residuales. Siendo la

zona de cordón la más crítica en estas condiciones, los esfuerzos allí presentes pueden alcanzar el límite de fluencia y provocar su plastificación local. Cuando se produce la plastificación de una región del material, ésta libera sus tensiones residuales redistribuyendo las restantes como se indica en la curva E. Si la estructura está sometida a esfuerzos de tracción más altos ($\sigma = \sigma_2$), mayor será la plastificación local de la zona más tensionada (cordón de soldadura), obteniéndose redistribuciones de las tensiones residuales [26]. El resultado final será un menor efecto de las tensiones residuales sobre el comportamiento mecánico de la estructura.

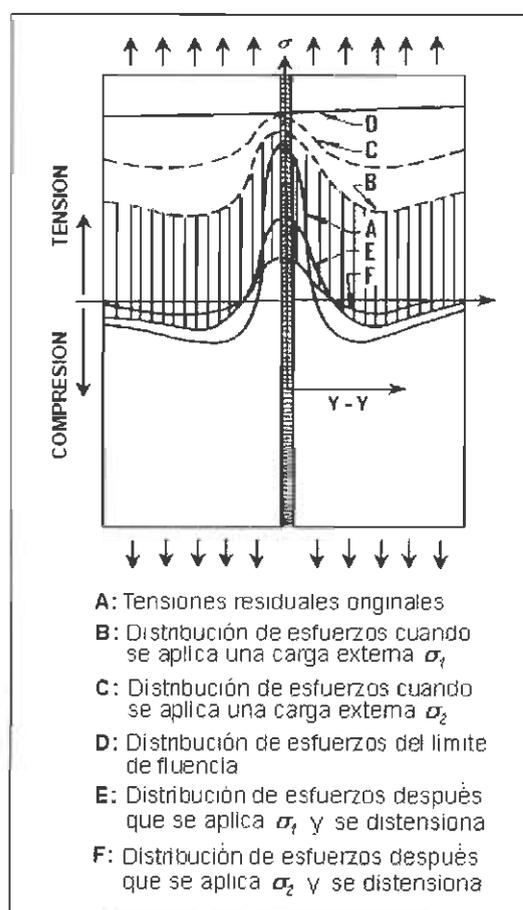


Figura 2.17. Distribución de esfuerzos residuales longitudinales [26]

Por ello los esfuerzos residuales no juegan un papel decisivo en estructuras fuertemente solicitadas; pero, en cambio, sí son determinantes en la vida del componente soldado cuando éste sea sometido a bajos esfuerzos mecánicos y mecanismos de daño.

La resistencia a la fatiga de una estructura soldada se ve favorecida si ésta presenta esfuerzos residuales de compresión en su superficie. Asimismo, es posible que estas tensiones residuales puedan irse liberando durante la carga cíclica y, por tanto, los efectos de los esfuerzos residuales en la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas se consideren poco importantes.

En presencia de ambientes corrosivos, los esfuerzos residuales pueden provocar la fractura en materiales sin necesidad de que estén sometidos a cargas externas. Esto es particularmente severo cuando los mecanismos son corrosión bajo tensión y fragilización por hidrógeno, este último como se menciono en este trabajo anteriormente es un mecanismo del cual la tubería de conducción es susceptible a presentar durante su fabricación y reparación [1,2].

2.5.3. Medición de Esfuerzos Residuales en Soldadura

En general se han propuesto y utilizado muchas técnicas para medir las tensiones residuales en los metales. En la actualidad estas técnicas para medir las tensiones residuales, se dividen en los grupos siguientes:

- 1 Relajación de tensiones (*stress-relaxation*).
- 2 Difracción de rayos-x.
- 3 Ultrasonido.
- 4 Técnica de agrietamiento.

Estos grupos a su vez tienen diferentes campos de aplicación y utilizan diferentes elementos sensibles para la medición.

En las técnicas de relajación de tensiones, los esfuerzos residuales son determinados midiendo las deformaciones elásticas liberadas. Esto ocurre cuando los esfuerzos residuales son liberados mediante el corte de la muestra en pedazos o por la extracción de un pedazo de la muestra. En la mayoría de los casos se utilizan para medir la deformación liberada defórmómetros mecánicos o galgas extensométricas eléctricas (ver Figura 2.18). Existe una variedad de

técnicas que dependen del seccionamiento de las muestras para determinar los esfuerzos residuales. Algunas técnicas se aplican principalmente a cilindros, tuberías o sólidos tridimensionales.

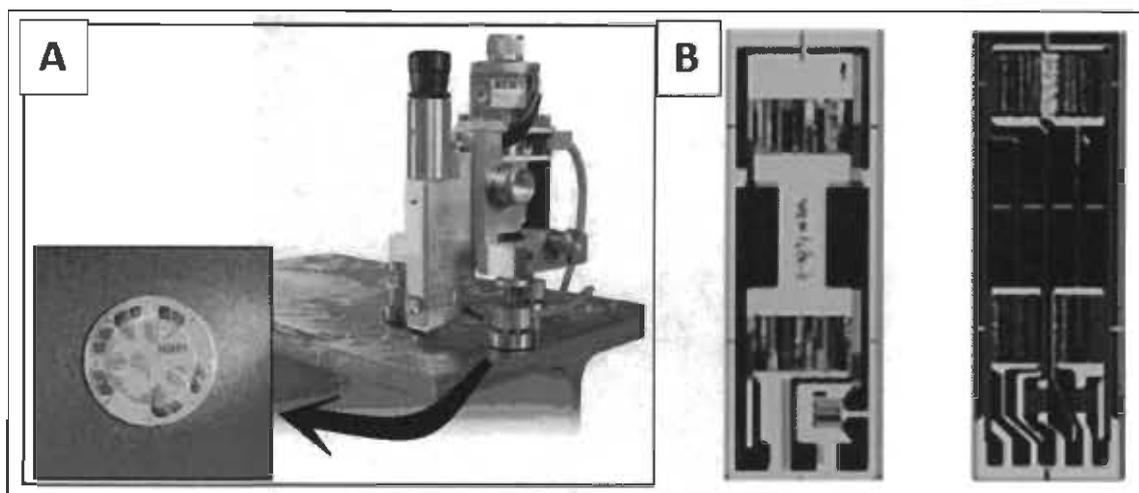


Figura 2.18. A) Equipo de mediación de esfuerzos residuales con galgas extensométricas de tipo receta, y B) Galgas Extensométricas para medición de esfuerzos residuales [28]

Las deformaciones elásticas en los metales que tienen estructuras cristalinas pueden ser determinadas por la medición de sus parámetros reticulares utilizando técnicas de difracción por rayos-x. Puesto que el parámetro reticular de un metal en estado no tensionado es conocido o puede ser determinado de forma separada, las deformaciones elásticas en el metal pueden ser determinadas no destructivamente sin maquinarse o barrenarse. En la actualidad se tienen disponibles dos técnicas: la de película de rayos-x y la del difractómetro por rayos-x. Con la técnica de difracción de rayos-x, la deformación superficial puede ser determinada en un área pequeña, a una profundidad y diámetro de 0,003 mm. Las técnicas de difracción de rayos-x son las únicas técnicas aplicables para medir tales esfuerzos residuales como los de cajas de bolas (rodamientos) y dientes de engranes y esfuerzos residuales superficiales posterior al maquinado o rectificado [25].

Sin embargo, estas técnicas por rayos-x tienen varias desventajas. Primero, son procesos más bien lentos. En cada punto de medición debe hacerse esta en dos direcciones requiriendo cada una de 15 a 30 minutos de tiempo de exposición para la técnica de película. Segundo, la medición no es muy precisa,

especialmente cuando se aplica a materiales tratados térmicamente en los cuales la estructura se distorsiona. Un equipo de rayos x, de medición de esfuerzos residuales se muestra en la siguiente figura.



Figura 2.19. Equipo de r-x para medición de esfuerzos residuales [28]

Se han hecho intentos de determinar los esfuerzos residuales en los metales mediante la medición de propiedades sensibles a los esfuerzos. Las técnicas propuestas de medición de esfuerzos incluyen los métodos ultrasónicos y el de dureza.

Las técnicas ultrasónicas (ver Figura 2.19) pueden utilizar las ondas ultrasónicas polarizadas y hacer uso del cambio inducido por esfuerzos en el ángulo de polarización de las ondas ultrasónicas polarizadas (de forma semejante a las técnicas fotoelásticas) o hacer uso de los cambios inducidos por esfuerzos en la absorción de ondas ultrasónicas es decir, atenuación ultrasónica. Ninguna de estas técnicas ha sido desarrollada mas allá de la etapa de laboratorio y ninguna ha sido utilizada con éxito para la medición de esfuerzos residuales en las construcciones soldadas.



Figura 2.20. Equipo de ultrasonido para la medición de esfuerzos residuales [29]

Se han desarrollado técnicas para el estudio de los esfuerzos residuales observando las grietas producidas por estos en las muestras. Las grietas pueden ser inducidas por el hidrógeno o por el esfuerzo corrosión (*stress-corrosion*). Las técnicas por agrietamiento son útiles para el estudio de los esfuerzos residuales en modelos de estructuras complejas los cuales tienen una distribución complicada de esfuerzos residuales como es el caso de la soldadura SMAW circunferencial de envolventes en tubería de conducción.

2.5.4. Métodos de alivio de los esfuerzos residuales en la soldadura

Como se explico en la sección anterior, los esfuerzos internos en una soldadura se originan en complejas interacciones térmicas y/o mecánicas. Por consiguiente, los métodos de alivio de esfuerzos residuales se basan justamente en:

1. Tratamientos térmicos
2. Tratamientos mecánicos.

Tratamientos térmicos

Este tratamiento es ampliamente utilizado en la industria, consiste en calentar los conjuntos soldados hasta una temperatura inferior a la de

transformación o cambio de estado en el material y mantenerlos en ella un tiempo suficientemente largo como para que la temperatura se uniformice en toda la pieza y puedan efectuarse los reajustes dimensionales necesarios para establecer el estado de equilibrio [25]. Se recomienda un calentamiento gradual uniforme de toda la pieza, un tiempo de mantenimiento a temperatura constante, que en el caso de los aceros ferríticos es alrededor de 600°C durante una hora por pulgada de espesor, seguido de un enfriamiento igualmente gradual y uniforme. Cuando es posible, todo el componente soldado es introducido en un horno, en caso contrario solamente se somete la unión a un calentamiento local como se ilustra en la figura 2.21.



Figura 2.21. Tratamiento térmico en unión de soldadura en un tanque cilíndrico (25)

Cuando el material es sometido a un calentamiento, se produce en él una disminución del límite elástico; como las tensiones residuales en los cordones de soldadura (especialmente las longitudinales) pueden alcanzar valores muy cercanos a éste, el nivel de las tensiones residuales se reducirá al redistribuirse durante el calentamiento, para llegar a un equilibrio de fuerzas. También es posible que se presenten mecanismos de termofluencia que relajen las tensiones durante el tratamiento térmico; sin embargo, para alcanzar un efecto importante se requieren permanencias prolongadas que no siempre son posibles en la práctica [26].

Para alcanzar óptimos resultados en el tratamiento térmico de alivio de tensiones, es importante ejecutar de manera correcta cada una de las etapas del tratamiento térmico: velocidad, temperatura y tiempo de calentamiento, y velocidad de enfriamiento. En la medida de lo posible, es necesario garantizar que el incremento o disminución de la temperatura sea lo más uniforme posible en el componente soldado con fin de no generar nuevas tensiones residuales.

Para concluir el alivio de tensiones por vía térmica tiene ventajas y desventajas porque para realizarlo hay que contar con instalaciones complejas y costosas, además, de su alto consumo de energía eléctrica, estando limitado el tamaño de piezas voluminosas. Hay que tener en cuenta el tipo de material para que no ocurra la fragilización del mismo o la corrosión intercrystalina y por consiguiente una disminución catastrófica de las propiedades mecánica del material con el consiguiente gasto del recurso.

Tratamientos mecánicos.

Este método es realizable cuando la pieza posee una suficiente reserva de ductilidad, es decir, exhibe capacidad de estirarse plásticamente. En este tratamiento, ocurre una redistribución de las tensiones residuales al aplicar fuerzas o tensiones externas, como se muestra en la siguiente figura, que es de una soldada a tope de dos placas [26].

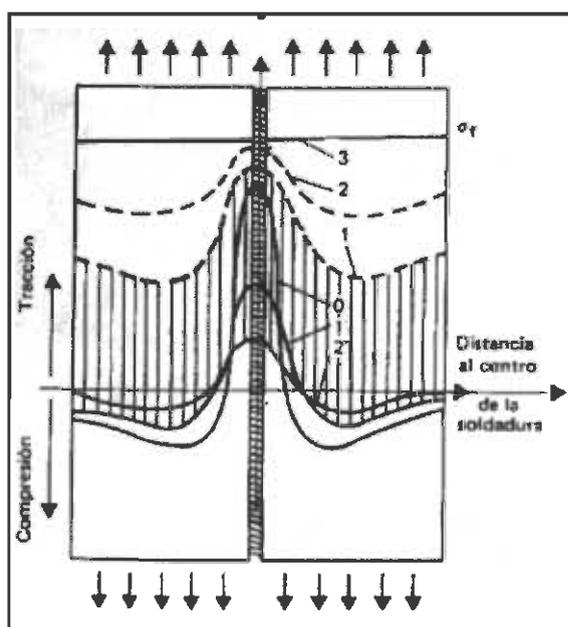


Figura 2.22. Alivio de esfuerzos residuales mediante tratamientos mecánicos (26)

Una forma de realizar este tratamiento, es a través de un martillado de la superficie (shot peening) el cual induce esfuerzos residuales de compresión, los cuales contrarrestan el efecto de los posibles esfuerzos residuales de tracción y mejoran la resistencia a la fatiga del componente. Este método consiste en golpear cada cordón con una maza pesada y golpes lentos, el empleo de una maza liviana y golpes rápidos endurece la superficie del metal, ya que no se logran deformaciones profundas, sino que fragiliza la cascara del metal sin aliviar la tensión. En esencia, desde que la soldadura se halla en estado de tracción, si el metal es desplazado plásticamente en dirección del espesor fluirá en el plano perpendicular con lo que se producirá un efectivo alivio de las tensiones longitudinales y transversales.

A pesar de su sencillez y efectividad no resulta un método de producción recomendable por la imposibilidad de cuantificar sus resultados y de asegurar la uniformidad y repetibilidad de los mismos siendo por lo tanto de muy difícil control.

Otra forma de aplicar este tratamiento de alivio de tensiones es aplicando vibración mecánica a la soldadura, mediante un vibrador de velocidad variable, provisto de un amplificador electrónico (Figura 2.23).



Figura 2.23. Equipo de vibración mecánica para alivio de esfuerzos residuales (29)

Desafortunadamente existe un total desconocimiento científico acerca de cómo trabaja. Se cree que la energía vibratoria introducida en la pieza reorganiza la estructura de la red cristalina con lo que se alivian los esfuerzos. La efectividad del método de alivio de tensiones por vibración puede ser diferente en vibraciones en metales suaves que en metales endurecidos.

Este método presenta diferentes ventajas a comparación de los métodos para alivio de esfuerzos por tratamiento térmico, estas ventajas son:

- El equipo es compacto y portátil, de este modo, puede moverse a cualquier parte de la planta de producción.
- Los costos de inversión, funcionamiento y mantenimiento son bajos.
- El proceso dura entre 15 y 30 minutos por ubicación, según el peso y configuración del componente o estructura.

- Es fácil de usar y no requiere la necesidad de extensas instrucciones para el operario.
- Se puede usar en una amplia gama de materiales.
- No tiene efectos negativos en el material.
- Las tolerancias de las piezas pueden mantenerse en límites imposibles o imprácticos de alcanzar con el tratamiento térmico.
- El proceso de estabilizado se puede llevar a cabo después y también durante el proceso de soldadura.

2.6. DISTORSIÓN DE COMPONENTES DE ACERO SOLDADAS

La distorsión en soldadura está constituida por las deformaciones que se producen en las piezas durante la soldadura, es decir, modificaciones en la geometría de las partes que son unidas por soldadura que sufren cambios dimensionales que es necesario en general controlar para que no excedan límites aceptables.

Durante el proceso de soldadura, el calentamiento y enfriamiento en el metal de aporte y el metal base adyacente a la soldadura no son uniformes, los cuales causan complejas deformaciones térmicas [26].

Los esfuerzos resultantes por las deformaciones producen fuerzas internas causando contracción del material, la cual se le conoce como distorsión de los elementos soldados.

2.6.1. Tipos de deformaciones en uniones soldadas [26]

Los tipos de deformaciones en soldadura son:

- Contracción (distorsión) transversal.
- Contracción (distorsión) longitudinal.
- Distorsión angular.

Contracción (distorsión) transversal

La contracción transversal es una reducción adimensional en una dirección perpendicular a la línea de soldadura, dicha reducción ocurre cuando el elemento soldado comienza a enfriarse.

La cantidad de contracción varía con:

- El grado de restricción en los miembros durante la soldadura y el enfriamiento (ocasionado por los sistemas mecánicos de clampeo).
- El área de la sección trasversal del metal soldado.
- El extenso flujo de calor el cual está dentro del metal base adyacente
- El número de pases empleados para realizar la soldadura y el ciclo de
- temperatura – tiempo el cual ocurre durante la deposición.

En la siguiente figura se muestra una soldadura a tope (similar a la soldadura longitudinal que lleva el envolvente en reparaciones de tubería de

conducción), junto con la dirección de las fuerzas de contracción transversal durante la soldadura

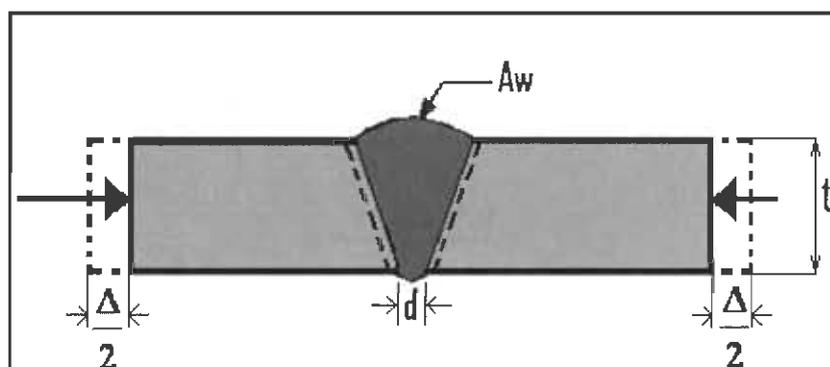


Figura 2.24. Dirección de las fuerzas de contracción transversal (30)

La contracción transversal viene siendo estudiada por muchos investigadores y ha propuesto varias fórmulas para estimar la contracción transversal sin restricción para aceros al carbono y aceros de baja aleación.

Spraragen y Ettinger propusieron la siguiente fórmula para el cálculo de la contracción transversal [30]:

$$\Delta = c \frac{A_w}{t} + 0.05d$$

Ec.2.1

La nomenclatura de símbolos es mostrada por la siguiente figura.

| |
|--|
| Δ : Contracción transversal (in) |
| d : Apertura de raíz (in) |
| t : Espesor de la placa (in) |
| A_w : Área de la sección transversal. (in ²) |
| c : constante: $c = \begin{cases} 0.18 \rightarrow t < 1 \\ 0.20 \rightarrow t \geq 1 \end{cases}$ |

Figura 2.25. Nomenclatura de símbolos de ecuación para cálculo de contracciones trasversales [30]

De acuerdo con esta ecuación, se puede inferir que la contracción transversal se incrementa con el incremento de A_w Para un espesor de placa t una efectiva

manera de reducir la contracción es reducir el área, esto puede ser llevado a cabo usando una doble V en lugar de una ranura simple V, o considerando otro tipo de junta, especialmente cuando el espesor de la placa es mayor a 1".

Spraragen y Ettinger también propusieron otra ecuación usando los parámetros de aporte de calor, espesor de la placa y la velocidad de avance de la soldadura [30].

$$\Delta = \frac{17.4 \times 10^{-3} H}{t}$$

Ec.2.2

Donde H representa (Figura 2.26):

| |
|--|
| <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="margin-right: 10px;">Parámetros de la soldadura</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;"> $\left. \begin{aligned} H &= \frac{VI}{v} \\ I &: \text{Corriente}(A) \\ V &: \text{Voltaje}(V) \\ v &: \text{Velocidad}(cm/min) \end{aligned} \right\}$ </div> </div> |
|--|

Figura 2.26. Parámetros de soldadura que influyen en la Ec.2.2 (30)

De esta ecuación se infiere que a medida que se incrementa el calor de aportación se incrementa la contracción transversal.

Otro punto importante que hay que mencionar es que cuando se suelda dos placas en soldadura a tope se puede producir una distorsión llamada "Distorsión Rotacional" debido al calor suministrado. Para la comprensión de la distorsión rotacional se muestra la siguiente figura.

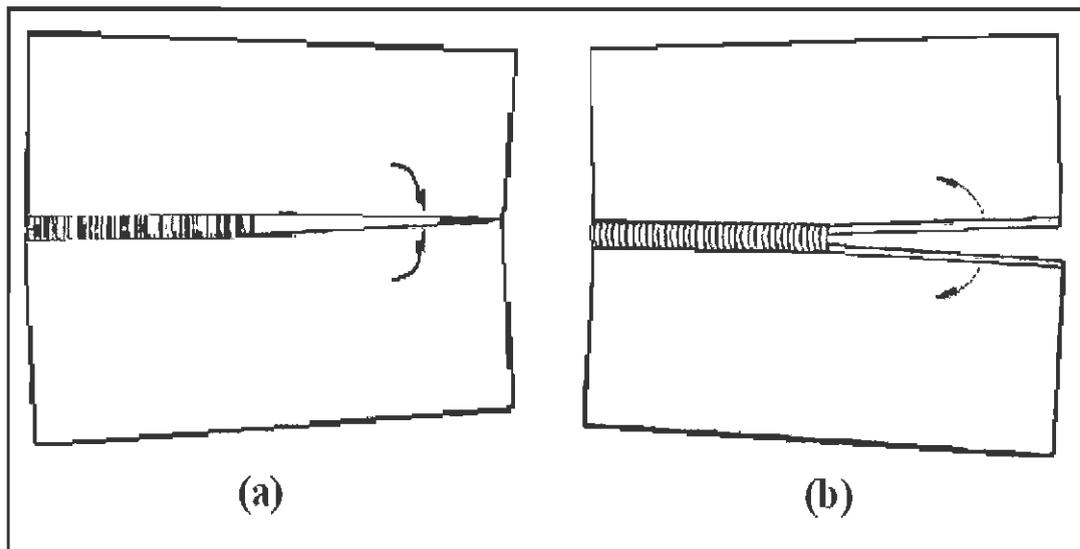


Figura 2.27. Efecto de la distorsión rotacional en soldaduras a tope [26]

Cuando dos placas libres son soldadas a tope, la porción no soldada de la junta cercana se cierra como se muestra en la Figura 2.27 (a), esto sucede cuando se utiliza el proceso SMAW. También dichas placas pueden abrirse como se muestra en la Figura 2.27 (b)

Para una soldadura de ángulo o de filete, como la que se emplea en la soldadura SMAW circunferencial de los envoltorios en la reparación de tubería de conducción, la ecuación propuesta por Spraragen y Ettinger se muestra en el siguiente esquema:

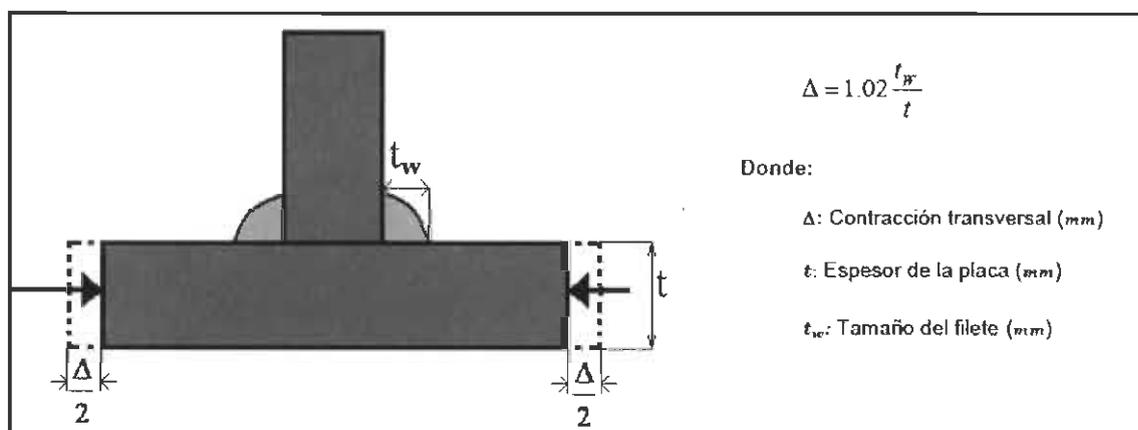


Figura 2.28. Esquema de la ecuación para el cálculo de contracción transversal en una soldadura de filete [30]

En el esquema anterior se puede apreciar que para evitar la contracción transversal se deber realizar la soldadura con un tamaño de filete mucho menor al espesor de la placa.

Contracción (distorsión) longitudinal.

Esta contracción ocurre paralela al cordón de la soldadura y tiende a reducir la anchura de la placa, en el eje de la soldadura como se muestra en la figura 2.29. Igualmente se han propuesto ecuaciones para medir esta distorsión longitudinal para elementos soldados en juntas a tope y a filete.

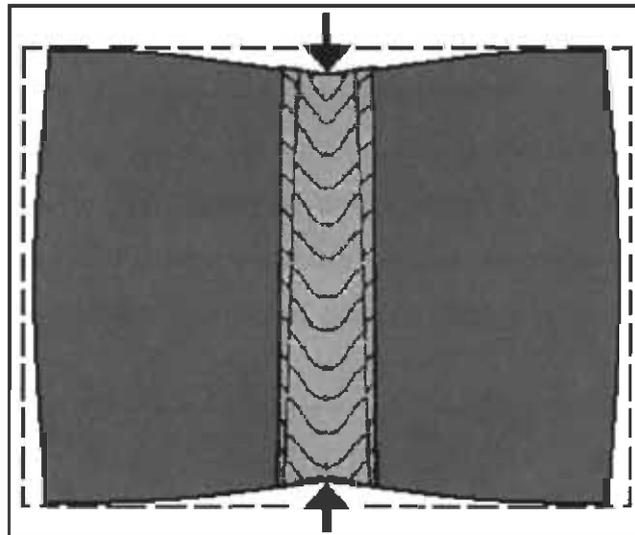


Figura 2.29. Contracción longitudinal en una placa soldada a tope [31]

Para la soldadura a tope, como la que se observa en la Figura 2.29, la ecuación para el cálculo de contracción longitudinal es la siguiente [30]:

$$\Delta = \frac{C_3 \pi}{t} \times 10^{-7}$$

Ec. 2.3

Donde:

Δ : Contracción longitudinal (in, mm)
 C_f : 12 y 305 cuando L y t son en pulgadas y en mm respectivamente
 I : Corriente de soldadura (A)
 L : Longitud de la soldadura (in, mm)
 t : Espesor de la placa (in, mm)

Figura 2.30. Nomenclatura de la ecuación 2.3

Por lo que la Ec. 2.3, tiene que ver con la corriente, longitud de soldadura y el espesor de la placa. De la Ec.2.3 también se puede decir que la cantidad de contracción longitudinal es directamente proporcional a la longitud de soldadura depositada, una reducción de esta contracción puede ser obtenida usando soldadura intermitente, siempre y cuando sea posible.

En la soldadura de filete, la contracción longitudinal (también llamada contracción longitudinal por flexión en soldaduras de filete) es ocasionada por los esfuerzos de flexión, inducidos por las fuerzas de compresión longitudinal de la soldadura los cuales no coinciden con el eje neutral de la pieza soldada (Figura 2.31)

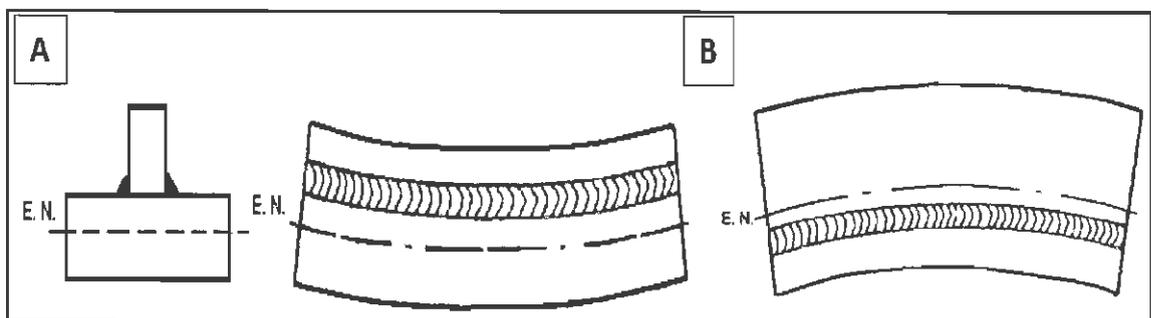


Figura 2.31. A) Distorsión por efecto de soldadura por encima del eje neutro, y B) Distorsión por efecto de soldadura por debajo del eje neutro [31]

La ecuación para el cálculo de la contracción por flexión en soldaduras de filete, es la siguiente [30]:

$$\Delta = \frac{0.005 A_w d L^2}{I}$$

Ec. 2.4

Donde:

Δ : Contracción longitudinal (in.)
 A_w : Área de la sección transversal. (in²)
 L : Longitud de la viga. (in.)
 d : Distancia entre el eje neutral y eje de acción de la fuerza de contracción. (in.)
 I : Momento de inercia de la junta alrededor del eje neutral.

Figura 2.32. Nomenclatura de la ecuación 2.4

En esta ecuación se asume que la fuerza de contracción es proporcional al área de la sección transversal de la soldadura, y la cantidad de metal soldado por unidad de longitud muestra un importante rol en el control de la distorsión angular debido al factor que la fuerza de contracción es proporcional a A_w . por lo que algún intento de reducir la cantidad de metal en la soldadura ayudaría a minimizar la distorsión.

Distorsión Angular

La distorsión angular es un cambio angular que ocurre debido a una contracción térmica no uniforme a través del espesor de las placas soldadas, la figura (Figura 2.33 A) siguiente muestra un esquema de la contracción angular en una soldadura a tope.

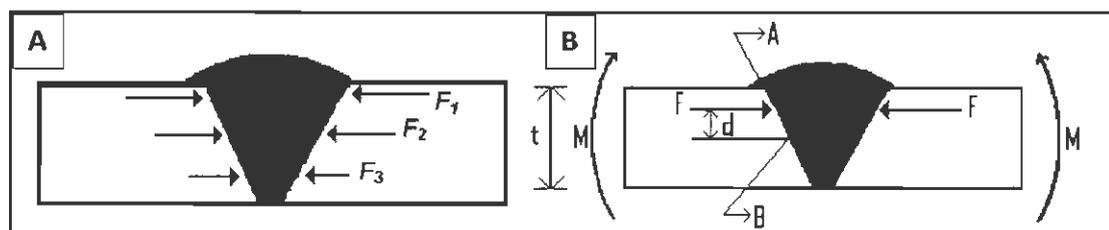


Figura 2.33. Fuerzas de contracción angular en una soldadura a tope [32]

El cambio angular depende de muchos factores, como son: la forma y dimensiones de la junta, el espesor de la placa y el procedimiento de soldadura [26].

No hay fórmulas exactas para predecir este tipo de distorsión, pero un entendimiento del mecanismo que la origina, ayudaría a minimizar y en algunas situaciones eliminar el cambio angular de las placas soldadas.

En el caso de una junta simple V tal como se muestra en la Figura 2.33 B, el resultado de la fuerza de contracción la cual se asume que pasa a través del centroide de la soldadura A, no coincide con el centroide del elemento B creando un momento M el cual tira o ala el extremo de la placa hacia arriba. Posteriormente, al enfriarse el elemento soldado, la distorsión provocaría el levantamiento de las placas tal como se muestra en la siguiente figura.

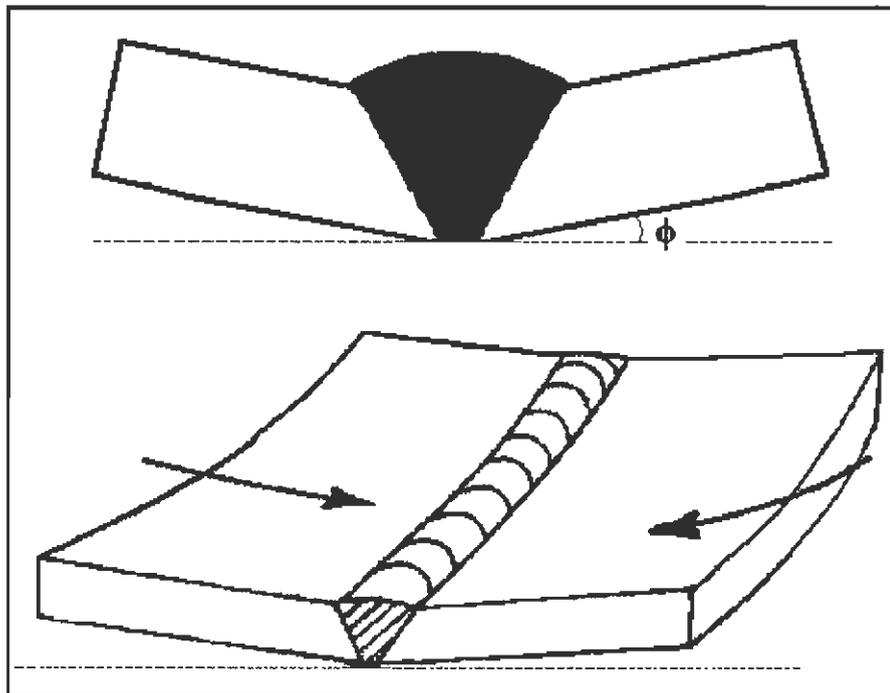


Figura 2.34. Distorsión angular en unas placas unidas a tope [31]

En la Soldadura a filete ocurre un fenómeno de distorsión similar al de distorsión angular de una soldadura a tope, la contracción térmica no uniforme a través del espesor del ala crea un momento M sobre el eje neutral del ala, el cual produce un cambio angular durante la soldadura a filete (Figura 2.34).

El cambio angular depende principalmente del tamaño del filete, el espesor del ala y el procedimiento de soldadura.

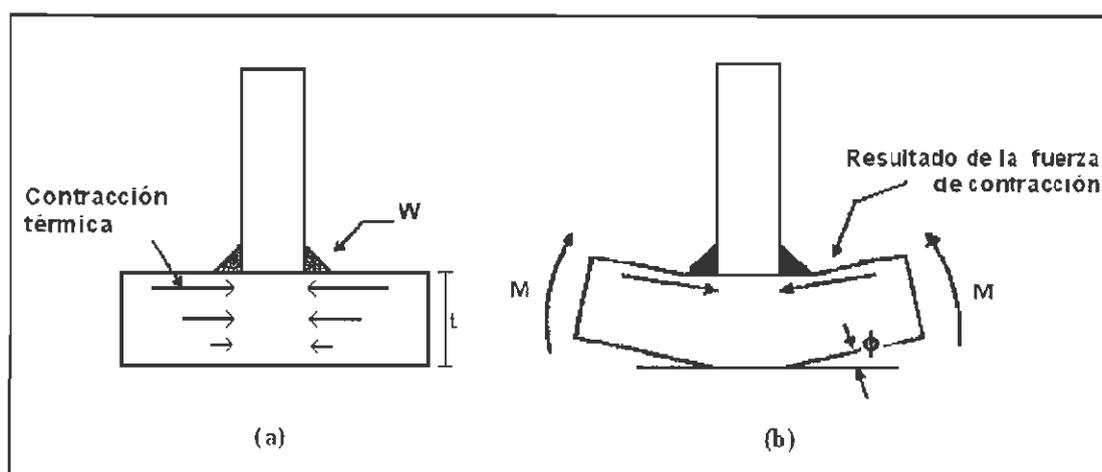


Figura 2.35. Contracción angular en una soldadura a tope [32]

En este tipo de distorsión las fórmulas no son muy exactas para calcular la cantidad de distorsión angular causada por soldadura a filete, sin embargo algunas ecuaciones desarrolladas bajo condiciones particulares como la mostrada a continuación pueden ayudar a determinar aproximadamente la distorsión de los elementos soldados.

$$\Delta = \frac{0.02W(w^{1.3})}{t^2}$$

Ec. 2.5\

Donde:

| |
|--|
| Δ : Deflexión en el borde del ala. (in) |
| W : Ancho del ala (in) |
| w : Tamaño del filete (in) |
| t : Espesor del ala (in) |

Figura 2.36 Nomenclatura para la ecuación 2.5

Además del ancho y el espesor del ala, uno de los parámetros de control más importantes en el grado de distorsión angular resultante, es el peso del metal o electrodo depositado W . La siguiente grafica muestra el efecto de este parámetro a diferentes espesores de ala en soldaduras de filete de placas de acero.

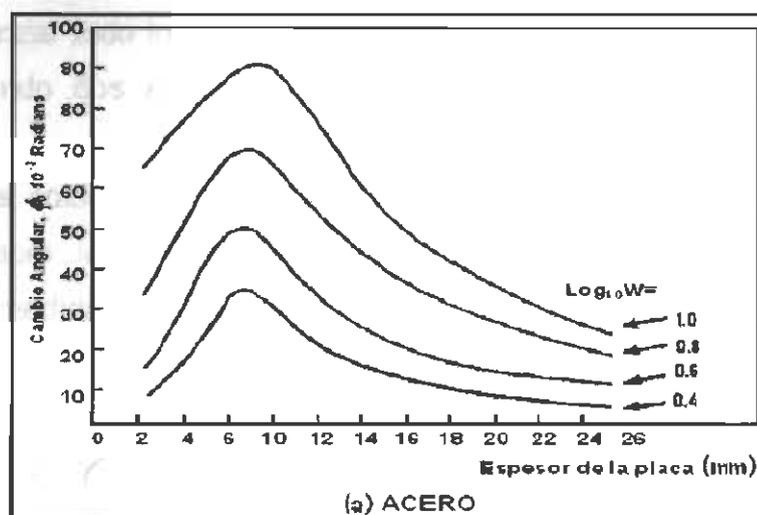


Figura 2.37 Efecto del espesor de la placa (t) y del peso del metal soldado por unidad de longitud (w) para la distorsión angular en una soldadura de filete no restringida [33].

En la figura 2.37 se infiere que el peso del metal soldado es directamente proporcional a la distorsión angular de las placas soldadas, también se puede inferir que lo contrario ocurre con el espesores de las placas (t) sometidas a soldadura, los cuales son inversamente proporcionales al grado de distracción angular resultante.

2.6.2. Control de distorsiones en soldaduras

Es posible evitar o disminuir la distorsión térmica tomando en cuenta el conjunto de reglas básicas para disminución de distorsiones mostrado a continuación:

- Utilizar el mínimo volumen de junta posible para reducir la cantidad de material depositado.
- Depositar material en forma simétrica el material de soldadura con respecto al eje neutro de la junta, recurriendo a una preparación asimétrica y repelado de raíz de ser necesario.
- Utilizar una progresión general de soldadura desde la zona más restringida hacia la menos restringida.

- Simetrizar todo lo posible la deposición de las soldaduras. Por ejemplo, utilizando dos soldadores simultáneamente en lados opuestos de la pieza.
- En las soldaduras de filete, utilizar el tamaño mínimo necesario para satisfacer los requerimientos de diseño, es decir no utilizar filetes sobremedida.
- Preposicionar las piezas para compensar la distorsión que se producirá durante la soldadura.
- Si es necesario, utilizar dispositivos de sujeción para facilitar la presentación de las partes a soldar y para limitar la deformación.

Sin embargo, la presencia de distorsión es casi inevitable en un proceso de soldadura, no obstante es posible minimizarla optimizando el diseño de la unión y mediante una ejecución planificada de la soldadura.

En la literatura se encontraron tres diferentes métodos de minimizar la distorsión térmica que son [26,27,30-33]:

- Con el montaje de los elementos que se soldaran.
- Mediante la modificación en el procedimiento de soldadura.
- Mediante el cambio en la secuencia de soldadura.

A continuación, se entrara más en detalle en cada uno de los principios que involucran estos métodos [26,27,30-33].

Con el montaje de los elementos que se soldaran

Con este método la minimización de la distorsión se puede conseguir situando las placas que se van a soldar y embridarlas mediante mecanismos de sujeción mecánica. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente el embridamiento de una soldadura de filete en "T".

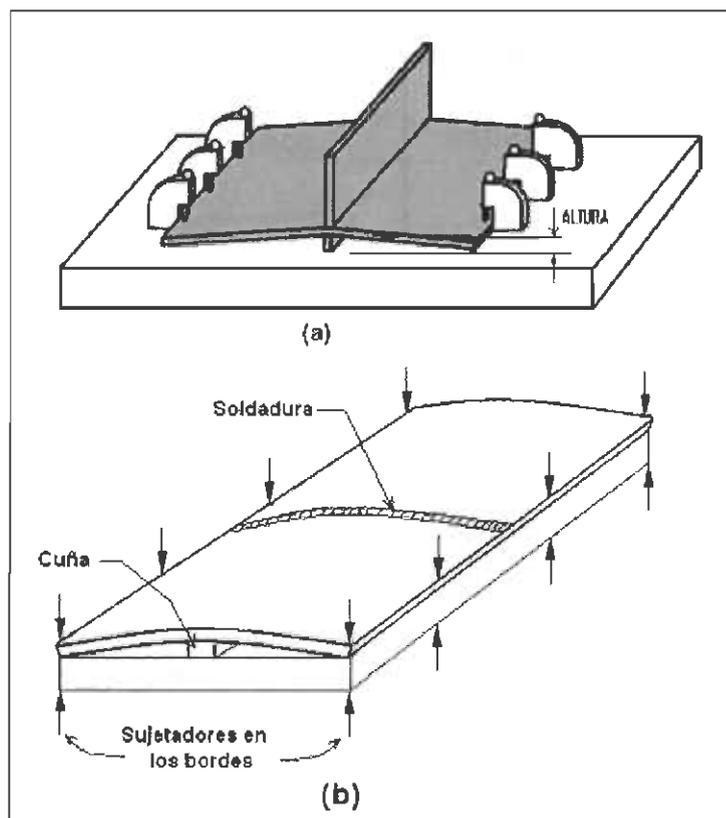


Figura 2.38 Esquema de placas a soldar en "T", embridadas antes de la soldadura [34]

En la figura 2.38 se observa que inclusive las placas antes de ser soldadas se pre-deforman mediante cargas del mecanismo de sujeción mecánica, esto se efectúa con el objetivo que la deformación previa contrarreste las distorsiones que se generaran durante la soldadura. Para el diseño de un mecanismo de sujeción de este tipo, es necesario contar con conocimientos previos del comportamiento de distorsión que sufrirán las placas durante la soldadura.

Otra técnica usada para el control de distorsión en juntas a tope es la mostrada en la Figura 2.38 (a): Sujetadores son colocados para que la placa no se levante. En la Figura 2.38 (b): La junta a tope es sujeta con un yunque de igual espesor de la separación de raíz y en la Figura 2.38 (c) y (d) se soldan soportes para evitar que se levanten ni se contraigan las placas.

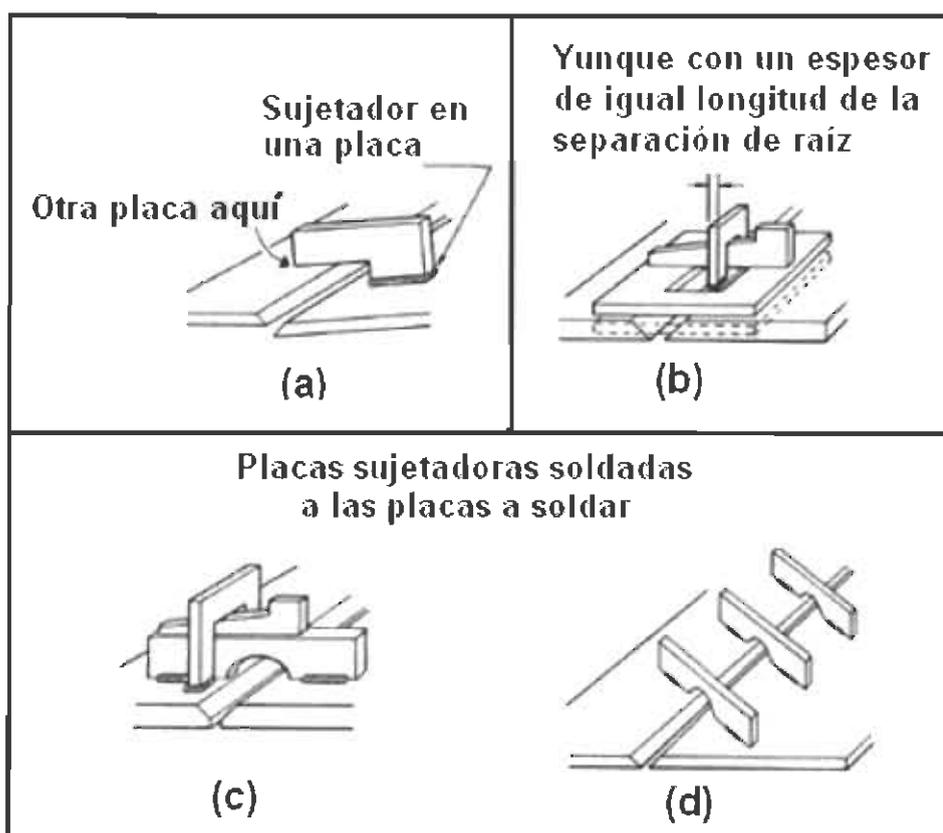


Figura 2.39 Sujetadores mecánicos utilizados para contrarrestar las distorsiones [34]

Mediante la modificación en el procedimiento de soldadura

Existen diversas formas de modificar el procedimiento de soldadura para minimizar el grado de distorsiones en los componentes soldados, uno de ellos es completando la unión con el mínimo número de pasadas posible, lo cual implica que se debe utilizar el electrodo, varilla o alambre con el máximo diámetro permisible. Asimismo, se ha comprobado que soldaduras hechas con una sola pasada tienen menores niveles de distorsión o de energía elástica almacenada (es decir, esfuerzos residuales) que la misma unión realizada en múltiples pasadas. Un esquema de disminución de pasadas de soldadura en una unión a tope con bisel en ambas placas.

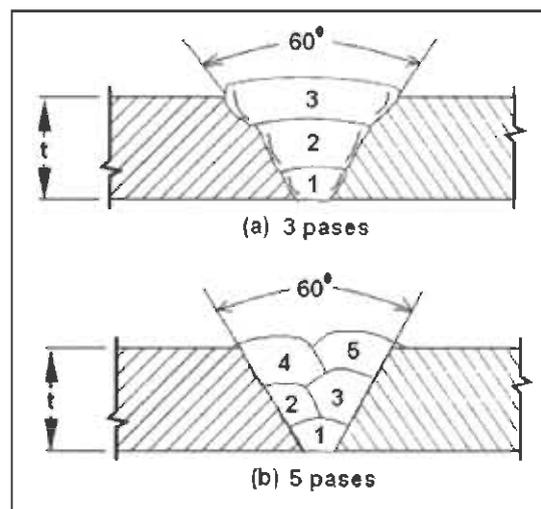


Figura 2.40 Esquema de la disminución de pasadas de soldadura en una unión a tope [34]

Otras formas de modificar el procedimiento para minimizar la distorsión son:

- Realizar la soldadura a una velocidad tal que se pueda reducir el calor aportado.
- Comenzar soldando las uniones que provoquen la contracción máxima.
- Precalentar las piezas para evitar que se enfríen rápidamente, de esta forma se permite a las piezas que se adapten a los cambios de volumen producidos por el calor, reduciéndose las tensiones y deformaciones.
- Durante el proceso de soldadura avanzar de forma simétrica, de modo que cada pasada contrarrestare las deformaciones producidas por la anterior. La siguiente figura muestra un ejemplo de simetría en la secuencia de soldadura, con el objetivo de disminuir las distorsiones.

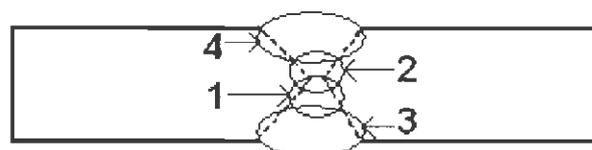


Figura 2.41 Simetría en la secuencia del procedimiento de soldadura para minimizar las distorsiones [34]

El contraste entre usar una secuencia simétrica o no, dentro del procedimiento de soldadura, se observa en la figura 2.42.

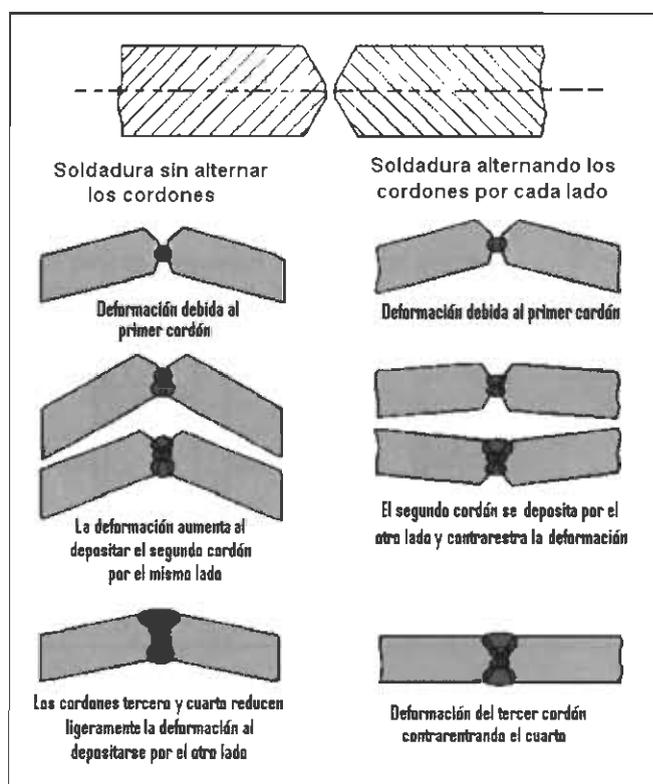


Figura 2.42 Contraste de la distorsión resultante respecto al uso o no de simetría en la secuencia de soldadura [31]

Mediante el cambio en la secuencia de soldadura

La secuencia de soldadura es el orden en que se efectúan los cordones y las pasadas de soldadura. Se pueden utilizar secuencias que minimicen la deformación.

Observando los ejemplos en la Figura 2.43: Lo recomendable es que se suelde desde dentro hacia fuera; primero las soldaduras a tope y después a solape; primero las cortas y después las largas; primero las transversales, luego las longitudinales. Con el análisis de la bibliografía se infiere que para el caso de la soldadura de tubería de conducción, se soldaran primero las longitudinales y luego las circunferenciales.

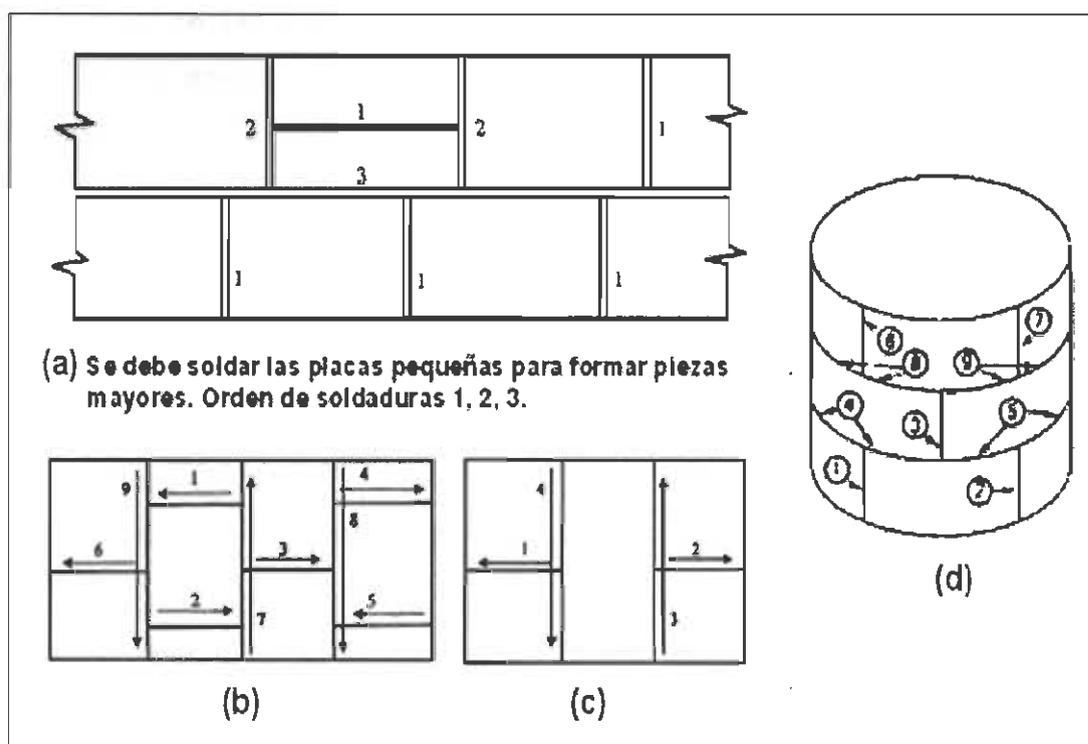


Figura 2.43 Esquemas de soldadura realizadas con una secuencia para disminuir las distorsiones [27]

Dentro de las recomendaciones de la aplicación de una secuencia para disminución de distorsiones se encuentran las siguientes:

- Se soldarán primero las piezas más pequeñas para formar piezas de tamaño parecido a la mayor.
- Las uniones contiguas se realizaran en sentido contrario.
- Ninguna unión terminará en otra ya realizada.
- Se debe soldar comenzando por el centro y terminando en los extremos.

Además de las consideraciones mencionadas anteriormente para soldar uniones en ángulo con secuencia de soldaduras se debe considerar lo siguiente:

- Colocar refuerzos angulares antes de soldar cuando sea necesario para evitar deformaciones angulares.
- Soldar del centro hacia los extremos libres.
- Si la pieza es de gran espesor, utilizar el paso de peregrino.
- En la figura 2.44 se ha indicado una secuencia, pudiéndose utilizar otras, por ejemplo soldar del centro hacia los extremos y soldar con dos soldadores al mismo tiempo, uno por cada lado si las placas son de gran espesor.

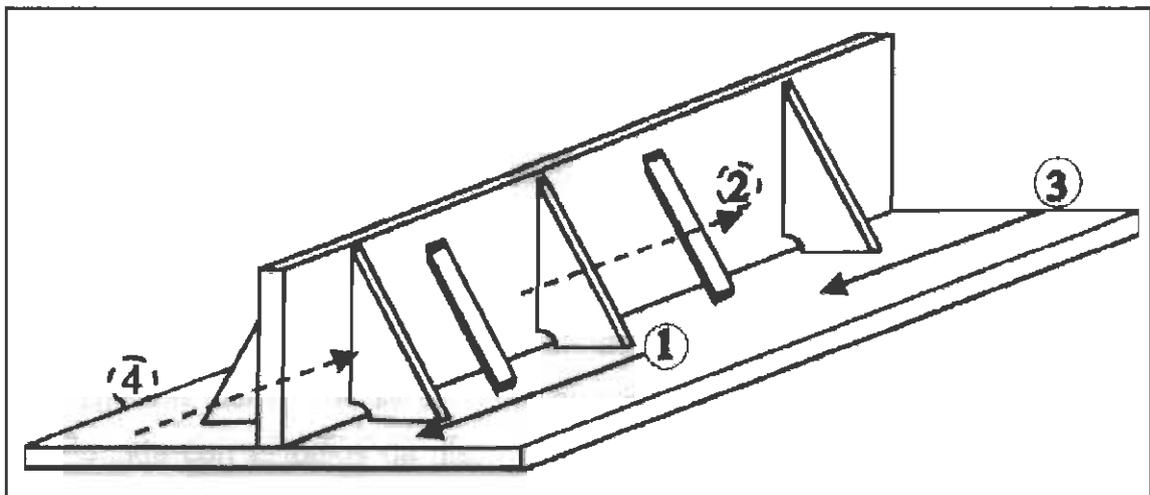


Figura 2.44 Esquema de unión en ángulo con secuencia de soldaduras [27]

Nota: Existen métodos muy estudiados de secuencia de soldaduras para aplicaciones específicas, como el de secuencia de paso del peregrino, secuencia de soldadura a saltos y el de soldaduras intermitentes, etc. En este trabajo no se abordarán debido a que son para aplicaciones muy específicas.

3.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA

La complejidad en los fenómenos ocurridos durante la soldadura de envolventes en reparaciones en tubería de conducción en servicio con el proceso de soldadura SMAW, da lugar a la posibilidad de encontrar una gran cantidad de oportunidades en el desarrollo de líneas de investigación.

Este trabajo se enfoca en el estudio sobre las causas y el efecto de las distorsiones térmicas en la reparación de tubería de conducción en servicio mediante envolventes metálicas bipartidas con el proceso SMAW. Este tema de estudio es muy específico, por lo que durante la revisión bibliográfica se encontró muy poca o limitada información relacionada a esta línea de investigación, por lo que se optó por estudiar de forma general la bibliografía relacionada con estudios de distorsión térmica y esfuerzos residuales en otro tipo de componentes soldados como se presentó en el capítulo anterior. Para el complemento de la información bibliográfica presentada en capítulos anteriores, en este capítulo se incluye el análisis a detalle de un caso de estudio en particular, que es la referencia encontrada que tiene mayor similitud a este trabajo.

4.

CASO DE ESTUDIO

Como caso de estudio se selecciono el trabajo presentado por M.A. Wahab, P.N. Sabapathy, y M.J. Painter, cuyo título es "El inicio de la falla de insuficiencia de pared, durante la reparación en servicio con soldadura de tuberías de gas" [35] el cual habla principalmente del empleo de un modelo numérico para predecir el inicio de falla de insuficiencia de pared durante la reparación de soldadura de filete circunferencial y longitudinal.

El modelo presentado en este trabajo es utilizado con el objetivo de encontrar las condiciones de soldadura óptimas, para asegurar que la reparación con soldadura de tubería de gas de alta presión en servicio, se lleve a cabo con un patrón adecuado de seguridad. Este modelo específicamente proporciona predicciones de los ciclos térmicos para así obtener una estimación de la zona afectada térmicamente, la microdureza y detectar posibles zonas propensas a agrietamiento.

Los autores mencionan una nueva descripción matemática para representar la fuente de potencia de soldadura por arco manual, la cual en la simulación por elementos finitos del proceso de soldadura, tiene una mayor aproximación que las fuentes utilizadas en otros trabajos. A continuación se muestra una figura (figura 4.1) comparativa entre las dos distribuciones de densidad de potencia de las dos fuentes.

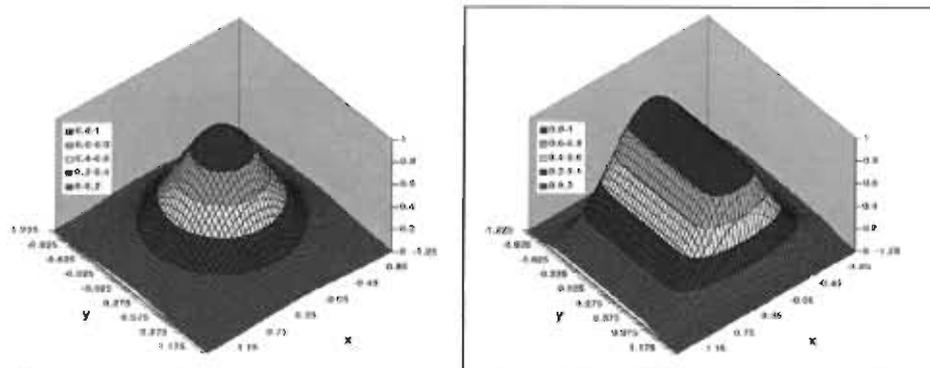


Figura 4.1. Comparación en la distribución de la densidad de potencia en fuentes de arco manual [35]

Los autores mencionan que el modelo desarrollado puede ser utilizado en diferentes tipos de reparaciones como se observan en la siguiente figura (figura 4.2).

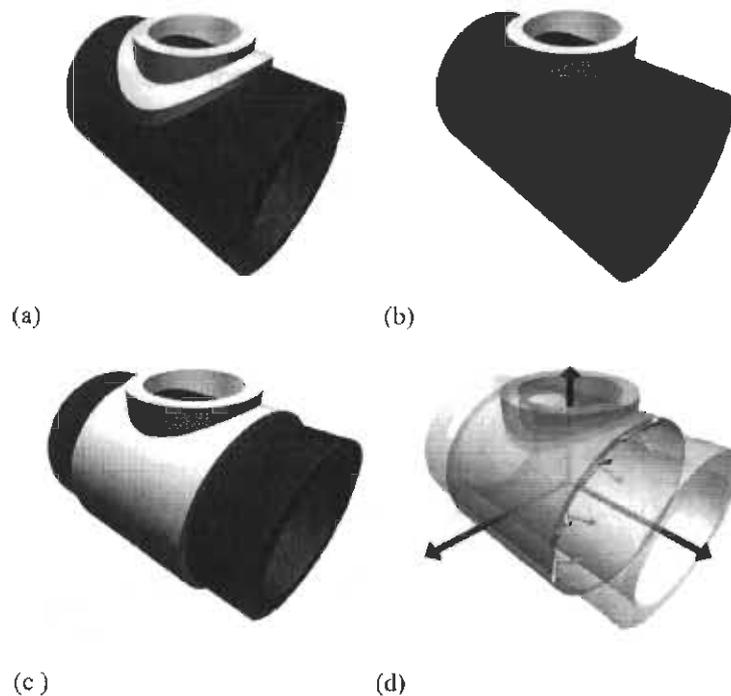
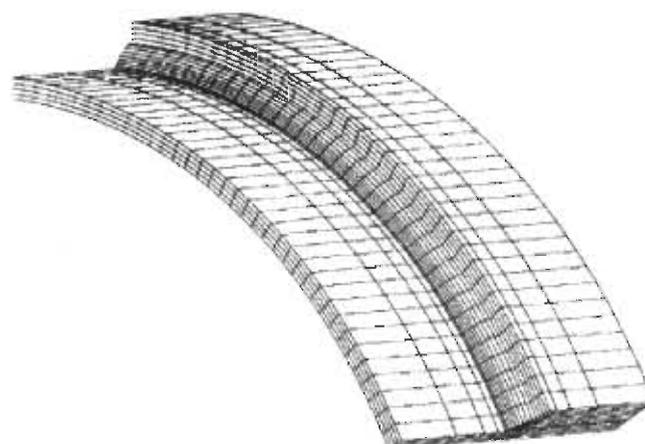


Figura 4.2. Distintos tipos de reparaciones donde se puede aplicar el modelo [35]

La siguiente figura muestra el mallado que se utiliza en la geometría de reparación con soldadura de filete circunferencial para el análisis térmico transitorio.



(a)

Figura 4.3. Mallado en reparación de soldadura de filete circular [35]

La simulación es realizada en el software NISA, en ella se utiliza una fuente de potencia en movimiento como la de la figura 4.1, en el modelo se considera el flujo de calor por conducción y convección, las pérdidas por radiación se asumen que son insignificantes.

En el mallado se utiliza un mallado más fino en la trayectoria de soldadura de la fuente de potencia, y se utiliza elementos lineales de 8 nodos en toda la malla.

La figura 4.4 se muestra una fotografía de la geometría simulación de soldadura circular.

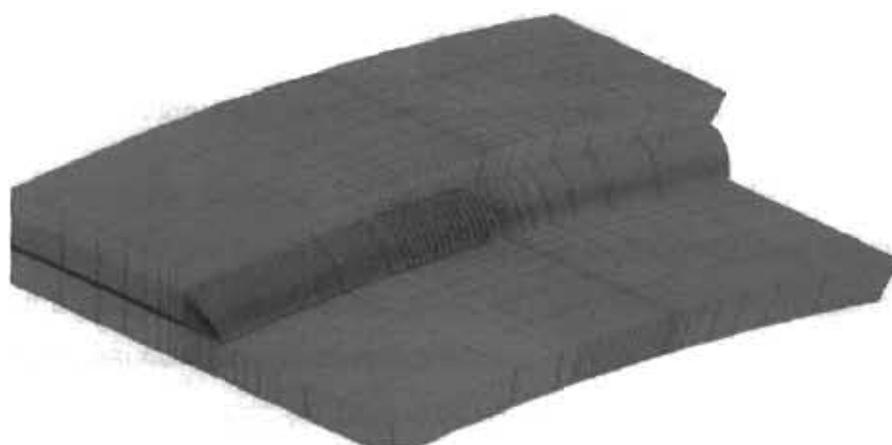


Figura 4.4. Geometría del modelo de soldadura de filete circular [35]

La figura 4.5 muestra la simulación por el método de elementos finitos en el software NISA.

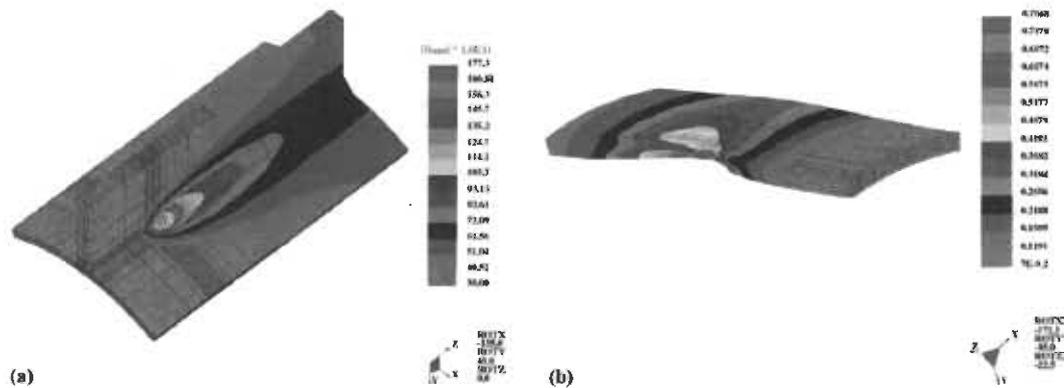


Figura 4.5. Simulación por el método de elementos finitos

Validación

Los resultados experimentales y de la simulación en un corte transversal de la pieza son mostrados en la siguiente figura.

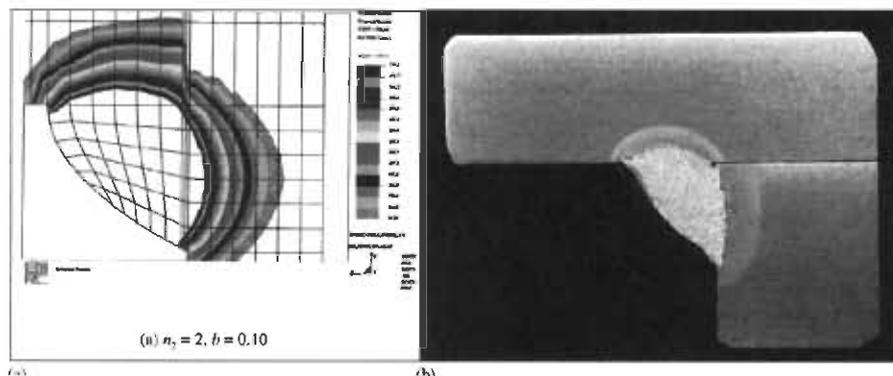


Figura 4.6. Validación de resultados de la simulación

Como se puede observar en la figura 4.6, los resultados del modelo de simulación se acercan mucho a los resultados experimentales, claramente se observa una relación satisfactoria en la forma y tamaño de la zona afectada térmicamente así como de la zona fundida.

Por lo que los autores mencionan que es posible encontrar una aproximación mediante el método de elementos finitos de una soldadura de filete circunferencial de reparación de tubería en servicio. Los autores también encuentran unos gráficos para predecir numéricamente la penetración de

soldadura, variando el parámetro b (longitud gaussiana de la fuente de potencia) de la fuente de potencia.

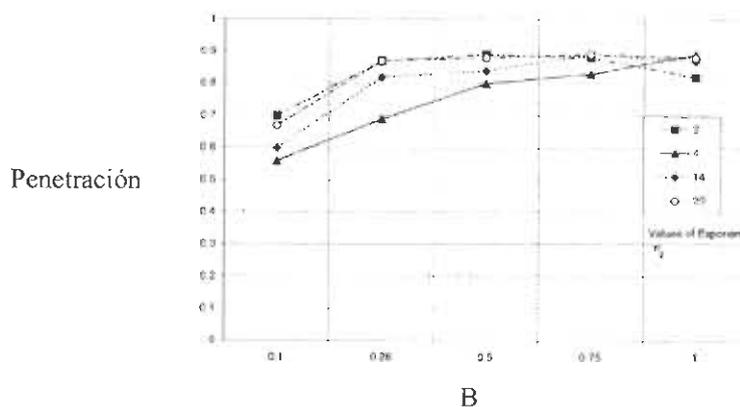


Figura 4.7. Longitud gaussiana contra penetración

Por lo que después del análisis de este trabajo, en conclusión se puede decir que los modelos matemáticos o de elementos finitos resultan ser una herramienta muy útil para predecir la aplicación y el desempeño de las reparaciones con soldadura de tuberías de gas en servicio en servicio.

5.

CONCLUSIONES

Como resultado del estudio bibliográfico se concluye:

A pesar de la limitada bibliografía o estado del arte referente al estudio del efecto y las causas de las distorsiones y esfuerzos residuales en la reparación en servicio de tubería de conducción con envolventes soldadas, se encontró que con el estudio del comportamiento de estos fenómenos en otro tipo de componentes o aplicaciones, es posible el inferir los orígenes de estas y a su vez proponer áreas de oportunidad para la disminución de los efectos generados en la reparación de soldadura y en la zona adyacente.

Se infiere que las causas de los esfuerzos residuales y distorsiones son:

- La gran cantidad de calor suministrado puntualmente con la soldadura crea calentamientos y enfriamientos no uniformes, lo cual ocasiona expansiones y contracciones respectivamente, si a esto le sumas que la reparación se está realizando en una tubería de gas en servicio, el grado de no uniformidad será aun mayor debido a que la tubería de gas actuara como una fuente rápida de disipación de calor.
- Otra posible causa es que se tenga excediendo el grado de calor suministrado en la soldadura, lo cual es causado por una equivocada configuración de parámetros de soldadura (velocidad de soldadura muy baja o amperaje muy alto).
- Un exceso de material depositado.

- Además los modelos matemáticos o de elementos finitos resultan ser una herramienta muy útil para predecir la aplicación y el desempeño de las reparaciones con soldadura de tuberías de gas en servicio en servicio.

6.

RECOMENDACIONES

Derivado del estudio realizado durante este trabajo, algunas soluciones propuestas para disminuir estos fenómenos serían:

- Optimizar los parámetros de soldadura principalmente para garantizar el suministro de calor adecuado.
- El alivio de esfuerzos con tratamiento mecánico, debido que un tratamiento térmico implica un considerable consumo de energía, tiempo y además sería muy difícil de realizar en campo.
- Otra posible solución sería el desarrollo de un mecanismo de sujeción mecánica eficiente, para el embridar el envolvente con el tubo.

Además de las recomendaciones antes mencionadas, lo más conveniente sería el desarrollo de un trabajo de investigación en el que se utilice una metodología que contenga un desarrollo experimental en laboratorio y en campo, de esta se facilitaría el encontrar una solución adecuada para estos fenómenos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. Comité de normalización de petróleos mexicanos organismos subsidiarios (2007), Norma: NRF-187-PEMEX-2007, "*Mantenimiento a sistemas de tubería de proceso en instalaciones marinas*".
- [2]. Comité de normalización de petróleos mexicanos organismos subsidiarios (2009), Norma: Norma: NRF-227-PEMEX-2009, "*Evaluación de la integridad mecánica de tuberías de proceso y recipientes a presión en instalaciones marinas*".
- [3]. Sindo Kou (2003), *Welding Metallurgy*, John Willey and Sons.
- [4]. American Welding Society, (2005). *Standard: Safety in welding, cutting and allied process*, annex D, ANSI Z49.1.
- [5]. Miller® (2010), *Guidelines For Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*, 155 095 B.
- [6]. American Welding Society (2008), *Welding Handbook "Welding Processes"*, 9th Edition, Vol. 3, Part 2.
- [7]. Página de internet: <http://lasser-vrouw.blogspot.com>
- [8]. Wisconsin Department of Administration, (2007), *Weld Filler Metal Selection Guideline For SMAW Of Various Metal Combinations*.
- [9]. American Welding Society, (2004), Standard: AWS A 5.1/A 5.1M, *Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding*.
- [10]. American Welding Society, (1992), Standard: ANSI/AWS A 5.4-92, *Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*.
- [11]. American Welding Society, (1996), Standard: AWS A 5.5-96, *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*.
- [12]. Klas Weman, (2003), *Welding Processes Handbook*, 1st edition, ISBN: 978-0849317736

- [13]. REMI BATISSE, (2008), *REVIEW OF GAS TRANSMISSION PIPELINE REPAIR METHODS*, Safety, Reliability and Risks Associated with Water Oil and Gas Pipelines, 335–349
- [14]. ASME B31.8 (2007), "*Gas Transmission and Distribution Piping Systems*".
- [15]. Comité de normalización de petróleos mexicanos organismos subsidiarios (2007), Norma: Norma: NRF-001-PEMEX-2007, "*Tubería de acero para recolección y transporte de hidrocarburos*"
- [16]. API Specification 5L. *Specification for Line Pipe*. Forty-second edition, January 2000 American Petroleum Institute.
- [17]. Página de internet: <http://www.pep.pemex.com/AnuEst2006/index.htm>
- [18]. NACE INTERNACIONAL, (2003); *Pipeline Integrity Management Seminar*, Houston, TX.
- [19]. Andrew Palmer and Associates, (2004); *THE ASSESSMENT OF CORROSION IN PIPELINES – GUIDANCE IN THE PIPELINE DEFECT ASSESSMENT MANUAL (PDAM)*; Pipeline Pigging and Integrity Management Conference.
- [20]. NRF-030-PEMEX-2006 - Diseño, Construcción, Inspección y Mantenimiento de Ductos Terrestres para Transporte y Recolección de Hidrocarburos.
- [21]. ASME B31G-1991(actualized in 2004) Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping.
- [22]. NRF-026-PEMEX-2008. *Protección con recubrimientos anticorrosivos para tuberías enterradas y / o sumergidas*.
- [23]. Instituto Politécnico Nacional, *Soldadura para reparaciones en la región marina*, Centro de investigación y desarrollo de integridad mecánica.
- [24]. NRF-039-PEMEX-2008. DISPAROS EN POZOS PETROLEROS.
- [25]. Jorge García Jacobino (2007), *Tensiones Residuales en la Soldadura. Métodos para su Atenuación*. Tesis de ingeniería mecánica.

- [26]. Masubuchi, K., (1980), *Analysis of welded structures: Residual stresses, distortion, and their consequences*, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [27]. L. A. de Vedia y H. G. Svoboda (2004), *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura*, Quinta Edición.
- [28]. Página de venta de componentes electrónicos de España en internet: <http://www.infoab.uclm.es/labelec/Solar/Componentes/SDEFORMACION.h>
- [29]. Página de internet: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/ResenyaProducto.asp?R=18019>.
- [30]. G. Verhaeghe, (1999) , *Predictive formulae for weld distortion: a critical review*, Woodhead Publishing, ISBN: 9781855734449.
- [31]. HERNANDEZ R. GERMAN, CESOL (2004), *Manual Del Soldador*, Doceava Edición, Madrid.
- [32]. J. PUCHAICELA, (1998), *Control of Distortion of Welded Steel Structures*, Welding Journal
- [33]. L. CYNTHIA, O' BRIEN A. (2001), *Welding Handbook*, Welding Science and Technology, Ninth Edition, Volume 1.
- [34]. Página de internet: Art. en linea <http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/content/distortion.asp>
- [35]. M.A. Wahab, P.N. Sabapathy, M.J. Painter, (2002), *The onset of pipewall failure during "in-service" welding of gas pipelines*, Journal of Materials Processing Technology 168 414–422

LISTADO DE TABLAS

| Número | Tablas | Página |
|--------|--|--------|
| 2.1 | Indicación de los Dígitos uno y dos electro del proceso SMAW | 14 |
| 2.2 | Tipo de corriente usada y recubrimiento para cada uno de los calores del cuarto dígito. | 14 |
| 2.3 | Normativa para la clasificación de electrodos. | 15 |
| 2.4 | Clasificación según API 5L considerando si el tubo fue o no soldado durante su fabricación | 15 |
| 2.5 | Especificación para electrodos de acero de baja aleación | 16 |
| 2.6 | Rango de amperaje requerido para soldar electrodos comerciales | 19 |
| 2.7 | Esquema de Composición química del gas amargo | 28 |
| 2.8 | Características de los tipos de envoltentes | 33 |
| 2.9 | Defectos que se pueden reparar con envoltentes tipo A | 34 |

LISTADO DE FIGURAS

| Número | Figuras | Página |
|--------|---|--------|
| 2.1 | Clasificación de los procesos de soldadura por la AWS | 9 |
| 2.2 | Características y funciones de la escoria | 10 |
| 2.3 | Circuito eléctrico en el proceso de Soldadura SMAW | 11 |
| 2.4 | Sistema de Identificación de electrodos de acuerdo a la norma AWS A 5.1 | 13 |
| 2.5 | Influencia del tamaño del arco | 20 |
| 2.6 | Angulo del electrodo en una soldadura con posición plana | 22 |
| 2.7 | Angulo del electrodo en una junta en "T" | 23 |
| 2.8 | Tubería de conducción o transporte de gas | 24 |
| 2.9 | Requisitos de tubería conductora dependiendo del uso. | 25 |
| 2.10 | Distribución por tuberías de conducción de gas diariamente en México | 27 |
| 2.11 | Unión circunferencial de envolvente con el proceso SAW | 32 |
| 2.12 | Soldadura en envolvente durante su instalación | 32 |
| 2.13 | Factores que influyen en la generación de esfuerzos residuales en la soldadura | 37 |
| 2.14 | Estados transitorios y finales durante la soldadura | 37 |
| 2.15 | Distribución de esfuerzos residuales longitudinales en una placa debido al proceso de soldadura | 40 |
| 2.16 | Esfuerzos residuales transversales en placas sujetadas con mecanismos de clampeo | 41 |
| 2.17 | Distribución de esfuerzos residuales longitudinales | 43 |
| 2.18 | A) Equipo de mediación de esfuerzos residuales con | 45 |

| | | |
|------|---|----|
| | galgas extensométricas de tipo receta y B) Galgas Extensométricas por medición de esfuerzos residuales. | |
| 2.19 | Equipo de r-x para medición de esfuerzos residuales | 46 |
| 2.20 | Equipo de ultrasonido para la medición de esfuerzos residuales | 47 |
| 2.21 | Tratamiento térmico en una unión soldadura en un tanque cilíndrico. | 48 |
| 2.22 | Alivio de esfuerzos residuales mediante tratamiento mecánicos | 49 |
| 2.23 | Equipo de vibración mecánica para alivio de esfuerzos residuales | 50 |
| 2.24 | Dirección de las fuerzas de contracción transversal | 53 |
| 2.25 | Nomenclatura de símbolos de ecuación para cálculo de contracciones transversales | 54 |
| 2.26 | Parámetros de soldadura que influyen en el Ec.22 | 54 |
| 2.27 | Efecto de la distorsión rotacional en soldaduras tope | 55 |
| 2.28 | Esquema de la ecuación para el cálculo transversal en una soldadura de filete | 56 |
| 2.29 | Contracción longitudinal en una placa soldada a tope | 56 |
| 2.30 | Nomenclatura de la ecuación 2.3 | 57 |
| 2.31 | A) Distorsión por efecto de soldadura por encima del eje neutro, y B) Distorsión por efecto de soldadura por debajo del eje neutro. | 57 |
| 2.32 | Nomenclatura de la ecuación 2.4 | 58 |
| 2.33 | Fuerzas de contracción angular en una soldadura tope | 58 |
| 2.34 | Distorsión angular en unas placas unidas a tope | 59 |
| 2.35 | Contracción angular en una soldadura a tope | 60 |
| 2.36 | Nomenclatura para la ecuación 2.5 | 60 |
| 2.37 | Efecto del espesor de la placa (t) y del peso del metal soldado por unidad de longitud (w) para la distorsión angular en una soldadura de filete no restringida | 61 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.38 | Esquemas de placas a soldar en "T", embridadas antes de la soldadura | 63 |
| 2.39 | Sujetadores mecánicos utilizados para contrarrestar las distorsiones | 64 |
| 2.40 | Esquema de la disminución de pasadas de soldadura en una unión a tope | 65 |
| 2.41 | Simetría en la secuencia del procedimiento de soldadura para minimizar distorsiones | 65 |
| 2.42 | Contraste de la distorsión resultante respectivo al uso o no de simetría en la secuencia de soldadura. | 66 |
| 2.43 | Esquemas de soldadura realizadas con una secuencia para disminuir las distorsiones | 67 |
| 2.44 | Esquema de unión en ángulo con secuencia de soldaduras | 68 |
| 4.1 | Comparación en la distribución de la densidad de potencia en fuentes de arco manual | 70 |
| 4.2 | Distintos tipos de reparaciones donde se puede aplicar el modelo | 71 |
| 4.3 | Mallado en reparación de soldadura de filete circunferencial | 71 |
| 4.4 | Geometría del modelo de soldadura de filete circunferencial | 72 |
| 4.5 | Simulación por el método de elementos finitos | 72 |
| 4.6 | Validación de resultados de la simulación | 73 |
| 4.7 | Longitud gaussiana contra penetración | 73 |

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Ing. Jesús Alberto Pineda Gómez, candidato a especialista en el programa de especialidad de Tecnología de la Soldadura Industrial, en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.

Nombre de la tesis: Estudio del efecto de la distorsión en la instalación de envolventes metálicas de acero al carbono por el proceso SMAW en gasoductos que transportan gas amargo

Campo profesional: Mantenimiento a ductos de transporte y distribución de hidrocarburos.

Fecha de nacimiento: 25 de mayo de 1956.

Nombre de los padres: Padre: Jesús Pineda Ferra.

Madre: Ángela Gómez Rodríguez.

Títulos y grados obtenidos:

Profesional: Licenciatura en Ingeniería Civil (1974 – 1979) en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (E. S. I. A.) del Instituto Politécnico Nacional.

Maestría en Gerencia de Proyectos de Ductos (1997 – 1998) en la Universidad de las Américas de Puebla.

Experiencia profesional:

1. CONSTRUCTORA METRO, S. A. de C. V. (1980 – 1981) Construcción de la ampliación de la Estación La Raza del Metro de la Ciudad de México.