

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**IMPACTO DE LAS DISTORSIONES GENERADAS DURANTE EL
PROCESO DE EXPANSIÓN EN LA FABRICACIÓN DE TUBERÍAS DE
CONDUCCIÓN SOLDADAS CON DOBLE ARCO SUMERGIDO**

POR

ING. VÍCTOR MANUEL VENTURA SOBREVILLA

MONOGRAFÍA

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

Saltillo Coahuila, México

Febrero 2008

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**Impacto de las distorsiones generadas durante el proceso de expansión
en la fabricación de tuberías de conducción soldadas con doble arco
sumergido**

POR

Víctor Manuel Ventura Sobrevilla

MONOGRAFÍA

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

Saltillo Coahuila 30 de Agosto de 2007

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

Gerencia de Desarrollo del Factor Humano

División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía "**Impacto de las distorsiones generadas durante el proceso de expansión en la fabricación de tuberías de conducción soldadas con doble arco sumergido**", realizada por el alumno Víctor Manuel Ventura Sobrevilla sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



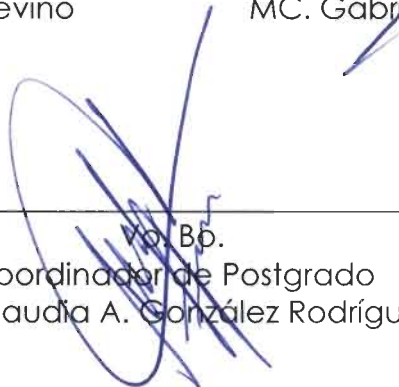
Tutor Académico
Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés



Tutor en Planta
Ing. José Eduardo Frías Treviño



Asesor
MC. Gabriel García Cerecero



vo. Bp.
Coordinador de Postgrado
MC Claudia A. González Rodríguez

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme la oportunidad de prepararme día con día, así como a mi familia por inculcarme los buenos valores en mi educación.

Agradezco también a todos aquellos investigadores que facilitaron el desarrollo de esta monografía con sus aportaciones bibliográficas de igual manera a mis tutores y asesores que me guiaron.

También quiero agradecer a la licenciada Nayeli Varea por su apoyo en el desarrollo de esta monografía.

A todos ellos muchas gracias por su tiempo y apoyo.

PROLOGO

Este trabajo monográfico muestra un análisis sobre el impacto de los esfuerzos residuales en las propiedades de una tubería de conducción para ambiente de gas amargo.

La susceptibilidad a la corrosión es uno de los principales problemas que afectan a las tuberías y esta susceptibilidad aumenta cuando las deformaciones originadas por el proceso de manufactura generan grandes cantidades de esfuerzos residuales, los cuales inician los mecanismos de corrosión.

La soldadura de doble arco sumergido es el principal portador de esfuerzos residuales, sin embargo; la presencia de estos esfuerzos son reducidos significativamente por el proceso de expansión mecánica. Esta disminución de los esfuerzos residuales reduce la susceptibilidad a fractura por corrosión bajo esfuerzos.

Existen otras técnicas por la cuales se puede reducir la susceptibilidad a fractura ya sea mediante la disminución de los esfuerzos residuales o con el recubrimiento interno de la tubería, evitando así el contacto entre el gas amargo y el metal.

INDICE GENERAL

1	Síntesis.....	01
2	Introducción.....	03
3	Objetivo.....	05
4	Justificación.....	06
5	Antecedentes.....	07
6	Procesos de manufactura de tubería de conducción.....	09
7	Soldadura de Doble Arco Sumergido.....	13
8	Proceso de expansión mecánica.....	20
9	Esfuerzos residuales.....	22
10	Esfuerzos residuales presentes en el proceso de Manufactura de la Tubería de Conducción.....	34
11	Corrosión.....	41
12	Impacto de los Esfuerzos residuales en facturas por corrosión bajo esfuerzos en pH neutral de tuberías de acero.....	47
13	Conclusión y Recomendaciones.....	58
14	Bibliografía.....	61
15	Listados de tablas y figuras.....	63
16	Resumen Autobiográfico.....	65

1.

SÍNTESIS

Los procesos de manufactura siempre traen consigo cambios heterogéneos en el material, debido a distorsiones provocadas mecánica y/o térmicamente, estas distorsiones tienen gran impacto en las propiedades del material ya que generan esfuerzos residuales que, sumados a las condiciones de servicio del material, provocan fallas por diversos mecanismos de fractura.[1]

En esta monografía se hablara acerca del impacto que tienen las distorsiones generadas por el proceso de soldadura en uniones soldadas de tuberías de conducción, explicando los mecanismos generados por estas distorsiones y su interacción.

El reacondo de la microestructura genera un cambio en los esfuerzos residuales de tensión y compresión. Dependiendo la magnitud de estos y de su combinación con el ambiente amargo, se iniciará un mecanismo de corrosión.

Se han llevado a cabo diversos estudios desde la primera identificación de tuberías con fracturas por corrosión bajo esfuerzos en

Canadá, los cuales han aportado información relevante para la comprensión de estos mecanismos. [2]

2

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera en México tiene una gran importancia ya que es la principal aportación al Producto interno bruto nacional, de ahí la relevancia en la mejora de los procesos de la institución, ya sean administrativos, de producción, o de servicio. Concretamente este trabajo esta enfocado en la conducción del crudo. [3]

La vía de transporte mas económica para el petróleo sigue siendo las tuberías de conducción, más sin embargo estas tuberías pueden presentar problemas en servicio, causando grandes perdidas económicas y sobretodo ecológicas. A lo largo del tiempo se han mejorado estas tuberías, aumentando sus propiedades mecánicas, ya sea por el uso de nuevos materiales, el aumento en el espesor, y técnicas nuevas de manufactura.

Cuando nos referimos a la mejora de las tuberías no solo nos referimos a la mejora de las propiedades, si no también a que estas mejoras no impliquen altos costos, teniendo un equilibrio en el costo-beneficio.

En los últimos años ha tomado gran relevancia la mejora en las propiedades debido a que los nuevos pozos de extracción, presentan altos niveles de ácido sulfhídrico en el crudo, lo que disminuye la vida en servicio de las tuberías.

ET

3.

OBJETIVO

El objetivo de esta monografía es conocer el impacto de los esfuerzos residuales generados durante el proceso de soldadura con la Susceptibilidad a Fractura por Corrosión Bajo Esfuerzos (SSC). Tomando en cuenta el ambiente amargo con el que las tuberías de conducción se encuentran en servicio.

Para conocer el impacto del proceso de manufactura de la tubería se evaluarán los esfuerzos residuales generados y se compararán con lo reportado en la literatura.

4.

ANEXOS

JUSTIFICACIÓN

Debido a la importancia de la industria petrolera en México, el uso de tuberías de conducción es prioritario para el manejo del petróleo y sus derivados. El conocimiento de las propiedades mecánicas, así como el de los mecanismos generados por la combinación de esfuerzos residuales y ambiente amargo, nos ayudan a mejorar el desempeño de las tuberías y disminuir los costos por fallas además de evitar tragedias ecológicas propiciadas por el derramamiento de crudo.[1,3]

Hoy en día la vida en servicio de una tubería de conducción es de 10 años cuando antes era de 20, debido a que el contenido de ácido sulfhídrico ha aumentado. [1]

5.

ANTECEDENTES

En el pasado la obtención de petróleo era mas fácil para las industrias ya que los yacimientos no presentaban grandes niveles de acido sulfhídrico (H_2S) y se encontraban a menor distancia del suelo. Sin embargo hoy en día la sobreexplotación de esos yacimientos ha llevado a la búsqueda de nuevos pozos, los cuales se encuentran a mayores niveles de profundidad y con mayores concentraciones de acido sulfhídrico. [3,4]

Las propiedades mecánicas de una tubería de conducción de gas amargo deben de tener un mínimo de 52ksi (359 MPa) de punto de cedencia y poder mantener estas propiedades a lo largo de su vida en servicio, la corrosión es el principal factor que disminuye estas propiedades. [1]

La mejora de las propiedades mecánicas no solo depende de la composición química y dimensión de la tubería de conducción, si no también del proceso de manufactura ya que en este van involucrados los esfuerzos residuales y tratamientos térmicos.

En el proceso de manufactura se realiza la transformación de una placa de acero a una tubería, pero esta transformación trae consigo deformaciones térmicas y mecánicas inherentes del proceso. Debido a que no podemos evitar estas deformaciones, lo que se ha buscado es minimizar el impacto en las propiedades del material

La industria del petróleo en México es muy importante ya que sigue siendo la principal fuente de recursos del país.

Tubacero es una empresa Mexicana dedicada a la manufactura de tuberías de conducción que cuenta con tres procesos diferentes, los cuales son: Formado continuo, Costura por resistencia eléctrica (ERW) y Doble Arco Sumergido (DSAW). [5]

En el proceso DSAW el material es sometido a deformaciones por causa de procesos mecánicos y térmicos, por lo cual, en este trabajo se busca conocer el impacto de estas deformaciones en las propiedades del material.

6.

PROCESO DE MANUFACTURA DE TUBERÍA DE CONDUCCIÓN

El material utilizado para la tubería de conducción es un acero API 5L X52 al hierro-manganeso (ver tabla 1) con un punto de cedencia de 52 ksi (359 MPa). El acero viene en forma de placa, la cual entran a la línea de producción para ser transformada en tubería. [5]

TABLA 1.- Composición química de Acero API X 52[5]

Mn	Si	Cu	C	Nb	Al	Ni	P	Cr	Mo	S	Ti	V
0.93	0.273	0.26	0.07	0.038	0.031	0.02	0.017	0.01	0.004	0.004	0.003	0.003

En la tabla superior se muestra la composición química del acero API 5L X52 en la cual podemos observar un alto contenido de manganeso.

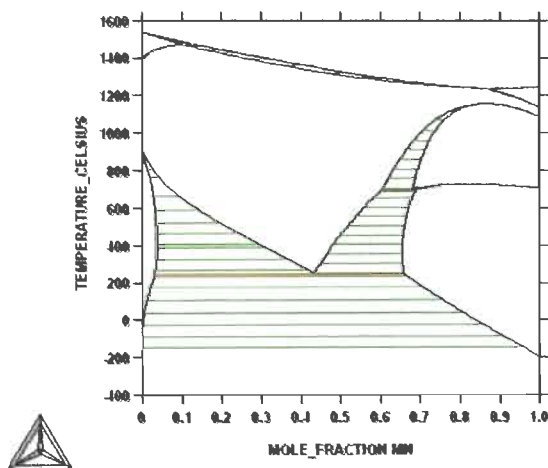


FIGURA 1.- Diagrama Binario Fe Mn. [6]

En términos generales el proceso se puede dividir en tres etapas: formado, soldadura y acabado.

Durante el proceso de formado las placas de acero son sometidas a prensas para obtener una forma cilíndrica, para después ser soldadas por medio de resistencia eléctrica.

El proceso de soldadura por resistencia eléctrica solamente es usado para mantener la forma de tubería ya que posteriormente es soldada con doble arco sumergido. [5]

La tubería es soldada inicialmente por su diámetro interior en el proceso de soldadura por doble arco sumergido (SAW) y después por su diámetro exterior asegurando una buena unión y penetración.

En el acabado la tubería es expandida mecánicamente para recuperar dimensiones y disminuir los esfuerzos residuales provocados por el calor inducido del doble arco sumergido, ya que este provoca un

efecto banana en la tubería. Una vez expandida mecánicamente la tubería es sometida a diferentes pruebas y a un proceso de recubrimiento interior. [5]

En las tres etapas del proceso de manufactura son generados esfuerzos residuales en la tubería de conducción, los cuales afectaran sus propiedades mecánicas. Ver el diagrama de flujo de proceso en la figura 2.

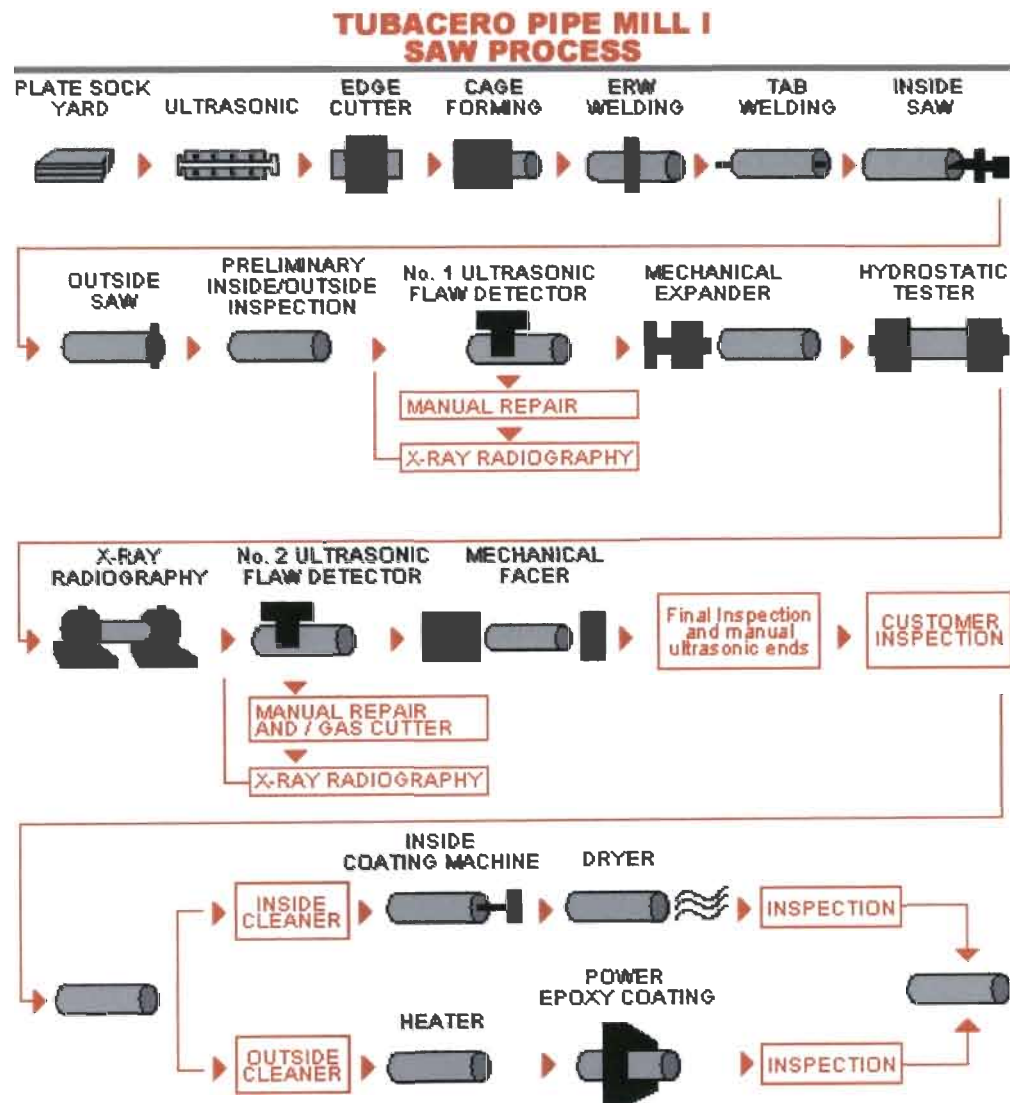


FIGURA 2.- Diagrama de Producción de Tubería. [5]

En el diagrama de procesos podemos ver primeramente el ingreso de la placa de API X 52, hacia un formado, para obtener una forma cilíndrica que después es soldada con resistencia eléctrica para mantener la forma. Posteriormente se hacen dos cordones de soldadura con doble arco sumergido, el primero en la cara interior de la tubería y el segundo en la cara exterior. En este proceso de soldadura el calor deforma la tubería por lo cual en el siguiente proceso se expandirá mecánicamente con el objetivo de recuperar la forma y reducir los esfuerzos residuales.

Micro estructura

Las micro estructura dominante de un acero API 5L X52 es la ferrita-perlita con un esfuerzo crítico de 1008 MPa, ferrita ultra fina con 1190 MPa de Sc (esfuerzo crítico) y ferrita acicular con 1260 MPa de Sc. Siendo la ferrita acicular la que tiene mayor resistencia al SSC (Sulfide stress corrosion). [21]

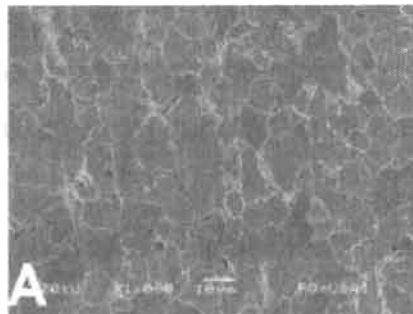


FIGURA 2.1- Micro estructura de un acero API X 52. Consiste en granos perlíticos dentro de una matriz ferrítica. [21]

7.

SOLDADURA DE DOBLE ARCO SUMERGIDO

El proceso de soldadura por doble arco sumergido (SAW), es un proceso en el cual el metal base y el metal de aporte (electrodo) coalescen por medio de uno o varios arcos eléctricos. Este proceso no lleva presión y utiliza un fundente granular, el cual es depositado para dar estabilidad al arco eléctrico y proteger el charco de soldadura (Ver figura 3). [7]

El fundente granular es de gran importancia ya que puede modificar las propiedades químicas y mecánicas de la unión.

Durante este proceso el electrodo consumible genera un arco de soldadura entre el metal base y éste, dentro del fundente granular.

En el proceso, el fundente granular es fundido después de haber generado una coalescencia entre el metal base y el metal de aporte.

La soldadura por arco sumergido puede usar corriente alterna o directa y alcanzar corrientes de hasta 2000 amperes, además de asegurar una buena velocidad de depósito. (figura. 4)

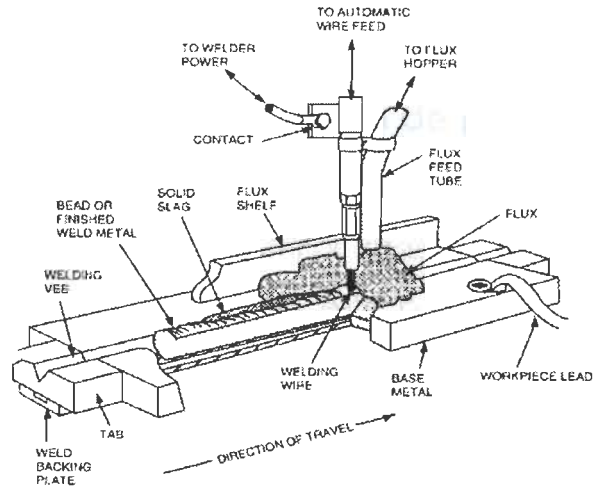


FIGURA 3.- Proceso SAW [8]

Las principales variables en este proceso son:

1) Amperaje de soldadura

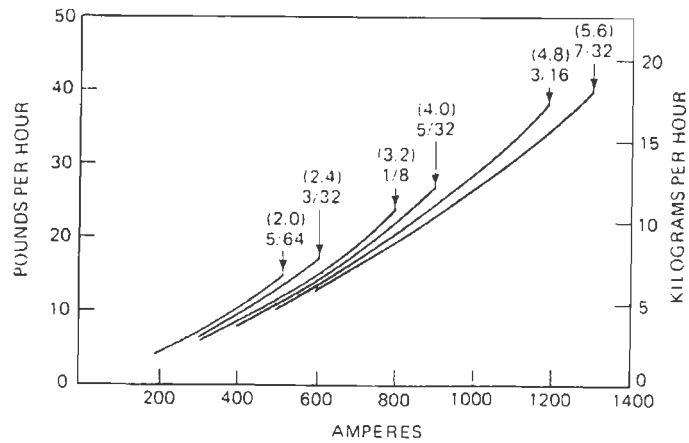


FIGURA 4.- Efecto del Amperaje en SAW. (8)

A un mayor nivel de amperaje tenemos una mayor tasa de depósito en el cordón de la soldadura como se observa en la figura 4. [8]

2) Tipo de fúndete y distribución de partículas.

El fundente es un material granular que cubre el área de soldadura, la alimentación de este puede ser por dos métodos, el primero por gravedad y el segundo por aire a presión. El fundente es la principal característica del proceso SAW que aunque le impide ser versátil brinda protección al charco de soldadura, dándole una mayor penetración y mejorando el acabado del cordón. Los componentes del material granular pueden ser de diversos materiales, los cuales al combinarse con el charco mejoran las propiedades mecánicas del material.

La composición química y las propiedades mecánicas son mejoradas debido al fundente, ya que al fundirse se mezcla con el charco de soldadura, añadiendo diversos elementos químicos. [8]

3) Voltaje de soldadura

La principal función del voltaje es controlar la forma del cordón en su sección transversal y su apariencia exterior. En la figura 5 se observa que a mayor voltaje la longitud de arco aumenta, afectando la penetración del cordón. [8]

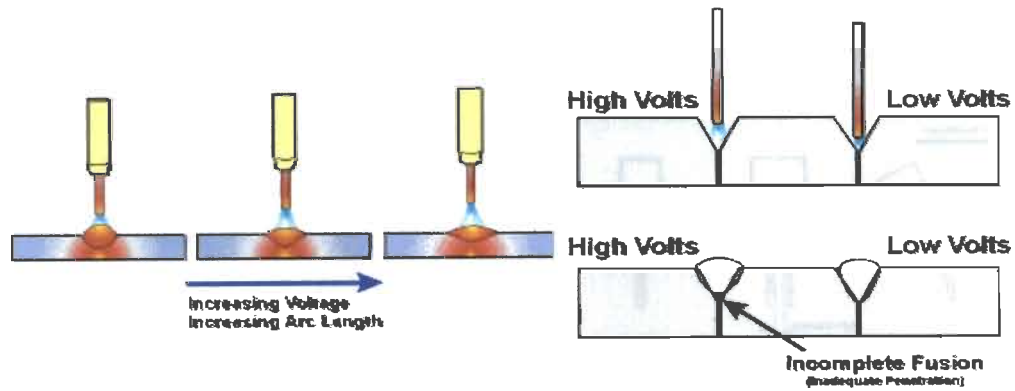


FIGURA 5.- Efecto del voltaje en SAW. [8]

4) Velocidad de soldadura

La velocidad de avance es una de las variables mas importantes ya que a velocidades altas la penetración decrece y la probabilidad de porosidad y cordones no uniformes aumenta. En la figura 6 se observa el efecto de la velocidad con respecto la penetración.

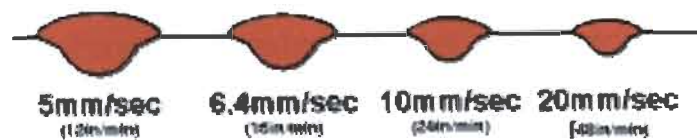


FIGURA 6.- Efecto de la velocidad de avance en SAW. [8]

5) Electrodo

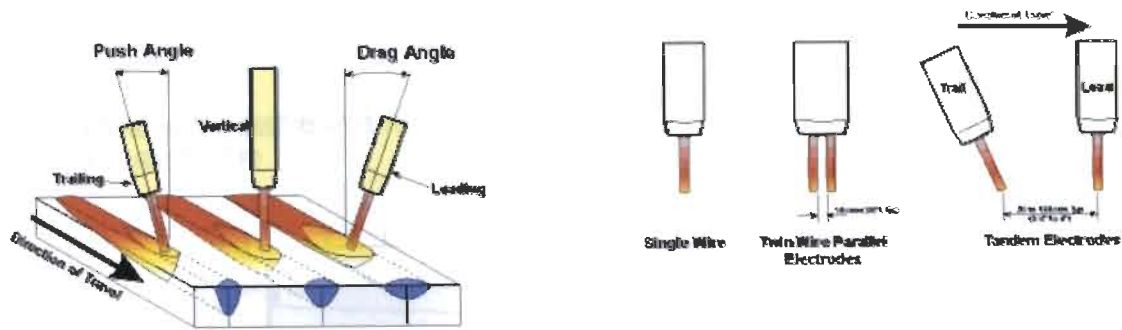


FIGURA 7- Efecto del electrodo en SAW. [8]

El electrodo puede ser de diversas morfologías y composiciones, por ejemplo un electrodo de diámetro pequeño da una mayor densidad de corriente con lo que aumenta la tasa de deposición.

También la extensión del electrodo que es la distancia entre la punta del electrodo y el metal base afectan el cordón de soldadura ya que si esta distancia aumenta, el amperaje cae con lo que se produce una baja penetración y un cordón mas estrecho. Una regla técnica para determinar la distancia de extensión del electrodo es que esta sea 8 veces el diámetro del electrodo.

La composición química del electrodo consumible utilizado en el proceso de soldadura de la tubería es la siguiente

TABLA 2.- Composición Química del Electrodo. [9]

Mn	Si	Mo	Cu	C	Nb	Al	P	Ni	S	Cr	V	Ti
2.55	0.903	0.494	0.46	0.18	0.038	0.031	0.026	0.02	0.013	0.01	0.003	0.003

La diferencia entre la línea de solidificación de un acero API 5L X52 y la coalescencia con electrodo es la siguiente.

THERMO-CALC (2007.08.07:15.11) :
DATABASE:TCFE2

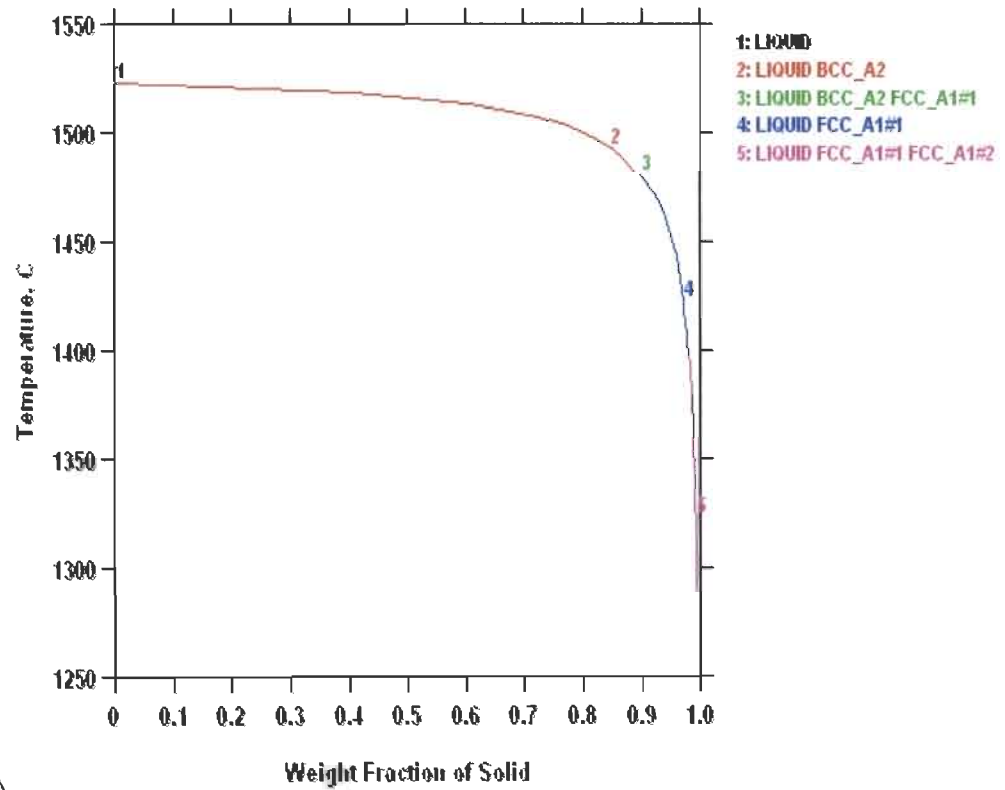


FIGURA 8.- Solidificación API X52. [6]

THERMO-CALC (2007.08.07:15.03) :
DATABASE:TCFE2

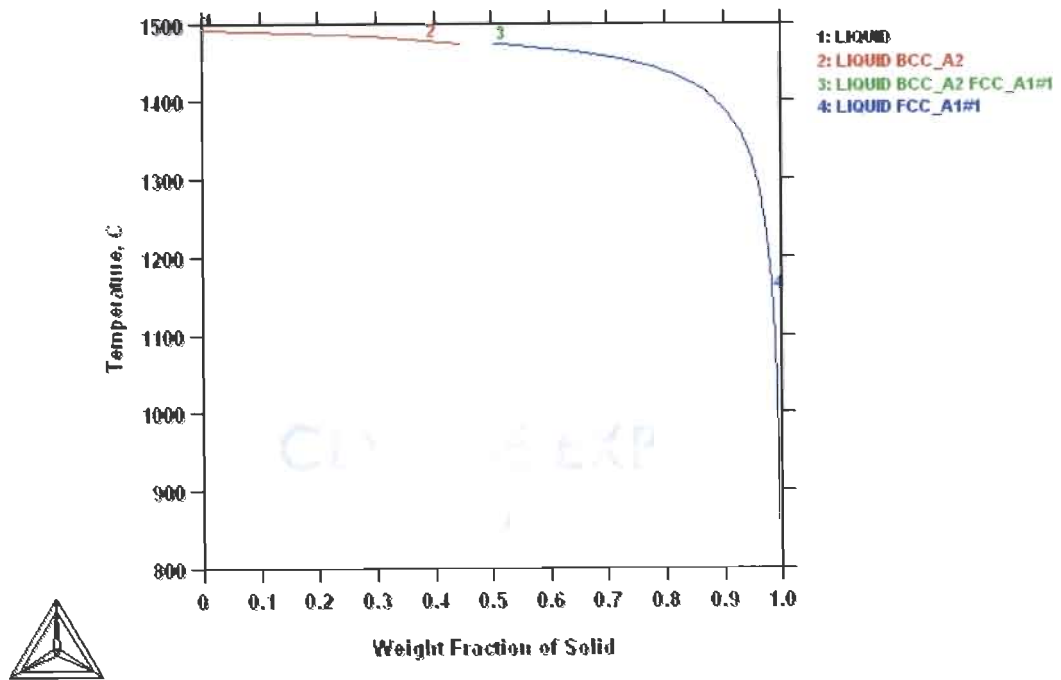


FIGURA 9.- Solidificación API X52 y Electrodo. [6]

Es importante saber que después del proceso de soldadura del diámetro interno de la tubería de conducción y el diámetro externo, el calor ingresado provoca una deformación térmica que distorsiona la tubería llevándola a una forma de banana para lo cual este proceso es seguido por una expansión mecánica. [5]

8.

PROCESO DE EXPANSIÓN MECÁNICA

En el proceso de expansión mecánica la tubería de conducción puede ser expandida de 0.3 % a 1.5 %. Con este proceso se busca darle una dimensión final a la tubería, recuperar la forma lineal (eliminar el efecto banana) y reducir los esfuerzos residuales provocados por la deformación térmica. [5]

La maquina de expansión mecánica esta compuesta por un pistón principal, un sistema hidráulico, sistema eléctrico, sistema de lubricación y mandril expansor. [10]

Para determinar la presión interna necesaria para expandir la tubería se utiliza la ecuación 8.1:

$$P=2St/D \quad (8.1)$$

Donde:

P= Presión interna necesaria para expandir

S= Limite elástico nominal del acero + 20000 Psi

t= Es el espesor nominal de la tubería en pulgadas

D= Diámetro nominal de la tubería en pulgadas.

La fuerza necesaria para expandir la tubería desde el interior se obtiene con la formula 8.2:

$$F_e = P (3.1416) (D) (L) \quad (8.2)$$

Donde:

F_e : Fuerza interna libre

D : Diámetro nominal de la tubería en pulgadas

L : Longitud a expandir.

La fuerza de tracción mecánica para expandir se puede deducir con la formula 8.3:

$$F_t = F_e (\tan \alpha) \quad (8.3)$$

Donde:

F_t : Fuerza de tracción en la flecha

α : Angulo del cono afectado por el coeficiente de fricción. (8,10)

Con las medidas de la tubería empleada en Tubacero y la información del acero API podemos obtener la fuerza y presión necesaria para expandir. Ejemplo:

TABLA 3.- Datos de la tubería para obtener la Fuerza de tracción en la flecha. [10]

Diámetro	Longitud	YS + 20 Ksi	Espesor	Angulo
D=63 in	L=25 in	S=72 000 Psi	t=.750 in	$\alpha=8^\circ$

* $\alpha=8^\circ$ (4° generados por la inclinación del cono y 4° por la fricción)

$$P = 2(52000 + 20000 \text{ Lb/in}^2) (.750 \text{ in}) / 36 \text{ in} = 3000 \text{ Psi}$$

$$F_e = 3000 \text{ Psi} (3.1416) (36 \text{ in}) (25 \text{ in}) = 8482320 \text{ Libian} = 3851 \text{ ton. métricas}$$

$$F_t = 3851 \text{ ton. métricas} (\tan 8^\circ) = 541 \text{ ton. métricas}$$

9.

ESFUERZOS RESIDUALES

Un esfuerzo residual es una compresión o tensión que existe en un material sin la presencia de una carga exterior (fuerza aplicada, desplazamiento de un gradiente de temperatura). La clasificación de los esfuerzos esta en base de la posición donde se encuentren localizados. [11]

I Macro esfuerzos.

Son los esfuerzos encontrados a través de una red de granos del material. En la figura III se muestran con el numero I romano. [11]

II Micro esfuerzos.

Varían dentro del grano y están relacionados con las micro estructuras en bandas, la textura en la superficie y las regiones con diferentes micro estructuras. En la figura 10 se muestran con el numero II romano. [11,20]

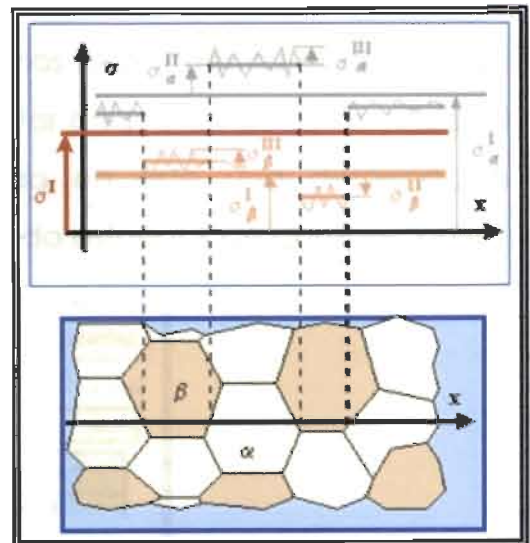


FIGURA 10.- Esfuerzos Residuales.[11]

III Submicro esfuerzos.

Son los que se presentan en una escala atómica y están relacionados con la segregación química a los límites del grano y pequeñas fases coherentes en aceros micro aleados. En la figura 10 se muestran con el numero III romano. [11,20]

Producción de Esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales son generados por deformaciones plásticas heterogéneas, contracciones térmicas y transformaciones de fases inducidas, todo esto debido a los procesos de manufactura. Cuando un material esta sujeto a una carga inelástica, esta dirige una distribución de esfuerzos los cuales se reacomodan cuando la carga ya no es aplicada. La diferencia entre la distribución de los esfuerzos y su reacomodo dan como resultado los esfuerzos residuales. [12]

Como ejemplo de este tipo de procesos se encuentra el granallado (shot peening) el cual consiste en proyectar pequeñas bolas de material contra la superficie de otro induciendo en este una deformación plástica en las capas superiores. Generando esfuerzos de compresión

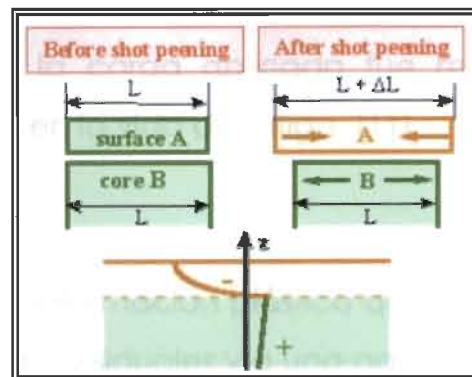


FIGURA 11- Granallado (Shot Peening). [11]

Efectos de los esfuerzos residuales.

Generalmente los esfuerzos residuales de compresión tienen un efecto benéfico en la vida de fatiga y en los esfuerzos por corrosión debido a que retrasan la iniciación y propagación de grietas. Por el contrario los esfuerzos de tensión reducen las propiedades mecánicas del material.

En el rango elástico los esfuerzos solo pueden ser añadidos por esfuerzos aplicados como cargas estáticas. [11]

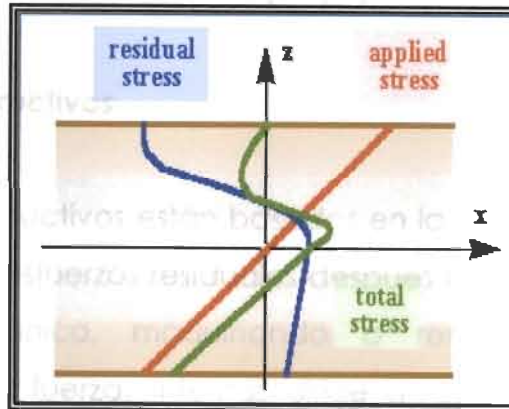


FIGURA 12.- Esfuerzos Totales. [11]

Por esta razón la compresión permite reducir los niveles de esfuerzos en las áreas donde la carga aplicada fue mayor esto dirige a un aparente incremento en la vida de fatiga. [11]

Cuando el total de los esfuerzos supera el punto actual de cedencia, el material sufre una deformación plástica que dirige a un cambio en el campo de los esfuerzos residuales y a una adaptación de la estructura a la carga aplicada.

En el caso de las cargas cíclicas, el inicio y propagación de grietas puede iniciarse a niveles más bajos del punto de cedencia. Esto debido a una redistribución de los esfuerzos residuales tomando parte una readaptación de la estructura a la carga aplicada. [13]

Evaluación de los esfuerzos residuales

A lo largo de varias décadas se han creado diversos métodos para evaluar cuantitativamente y cualitativamente los esfuerzos residuales, estos en general se dividen en destructivos y no destructivos.

Métodos Destructivos

Los Métodos Destructivos están basados en la destrucción del estado de equilibrio de los esfuerzos residuales después del seccionamiento del componente mecánico, maquinando o removiendo capas. La redistribución de las fuerzas internas dirige a las tensiones locales, las cuales son medidas para evaluar el campo de los esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales son deducidos de una medición de la tensión usando la teoría elástica (Aproximación analítica, cálculo del elemento finito). Estas técnicas solo son sensitivas a los esfuerzos macroscópicos. [11]

Ejemplo de estos métodos son:

- Orificio ciego (The hole drilling method).
- Mesnager-Sachs
- Ring Slitting Técnica de Crampton para medir esfuerzos circunferenciales.

- Método por secciones (The sectioning method).

Orificio Ciego (The hole drilling method).

Este método está basado en el alivio de tensiones mediante la perforación de un agujero para posteriormente medir las deformaciones provocadas por este. Este método es considerado semidestructivo.

Método Mesnager-Sachs.

Consiste en agujerar, por fuera del centro de un cilindro, pequeñas capas sucesivas y medir los cambios en la longitud y el diámetro de la porción remanente de cada agujero. [14]

Sachs propuso las siguientes expresiones para determinar los esfuerzos radiales, circunferenciales y longitudinales en cilindros huecos.

Donde:

$$\sigma_l = E^l \left[(A_0 - A_b) \frac{d\lambda}{dA_b} - \lambda \right] \quad (9.1)$$

$$\sigma_c = E^l \left[(A_0 - A_b) \frac{d\theta}{dA_b} - \frac{\theta(A_0 - A_b)}{2A_b} \right] \quad (9.2)$$

$$\sigma_r = E^l \left[\frac{\theta(A_0 - A_b)}{2A_b} \right] \quad (9.3)$$

Con

$$\lambda = \varepsilon_l + \nu \varepsilon_t \quad (9.4)$$

$$\theta = \varepsilon_l + \nu \varepsilon_t \quad (9.5)$$

Y

$$E^l = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (9.6)$$

TABLA 4. Método Mesnager- Sachs. [14]

E	Modulo elástico
A_0	Área transversal original
A_b	Porción de Área agujerada por fuera del cilindro
ϵ_l	Tensión longitudinal
ϵ_c	Tensión circunferencial
ν	Coefficiente de Poisson

Este método asume tres cosas básicas:

1. La teoría elástica aplica para esfuerzos en tubería sujeta a presión interna y externa.
2. La distribución de esfuerzos es asimétrica y constante a lo largo de la longitud del tubo.
3. La capa removida del material esta acompañada de un igual y homogéneo cambio en los esfuerzos longitudinales.

Ring Slitting Técnica de Crampton para medir esfuerzos circunferenciales. [14]

Para obtener lo esfuerzos circunferenciales se utiliza la siguiente formula, la cual esta basada en la técnica de rajar la tubería longitudinalmente y después medir los cambios del diámetro.

Por lo tanto los esfuerzos circunferenciales están expresados en términos del espesor de la pared t , Diámetro final D_1 y Diámetro inicial D_0

$$\sigma_c = E^1 t \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (9.7)$$

Donde:

TABLA 5. Técnica Crampton para medir esfuerzos circunferenciales. [14]

E	Modulo elástico
A_0	Área transversal original
A_b	Porción de Área agujerada por fuera del cilindro
ϵ_l	Tensión longitudinal
ϵ_c	Tensión circunferencial
ν	Coefficiente de Poisson
L	Longitud del tubo(Debe de cumplir la satisfacción geométrica: $L/D_0 \geq 1.7$

La medición de los esfuerzos se realiza por medio de la técnica de corte la cual minimiza el campo de los esfuerzos residuales causando una deformación que puede ser medida para calcular el esfuerzo residual de arco anterior. En esta técnica el corte es hecho en una dirección axial y mide el cambio en el diámetro o la circunferencia. Esta técnica solo puede determinar los esfuerzos de arco.

Los esfuerzos promedio en términos de cambio en el diámetro de un arco es dado por $\sigma = Et(1/D_0 - 1/D_f)$. Donde D_0 , D_f son los diámetros originales y finales de la pared, t es el espesor, y E es el modulo de young. El esfuerzo máximo calculado de la técnica ring-slitting esta basado en la idea de que la distribución de esfuerzo es lineal y elástica.

Metodo por secciones (The sectioning method).

Mide los esfuerzos residuales de la superficie, al comparar el cambio en la curvatura del espécimen después de haber sido pulido .02mm por pulido electroquímico. Es destructivo, rápido y confiable.

Métodos No Destructivos.

Estos métodos están basados en la relación entre los esfuerzos residuales y los parámetros físicos-cristalográficos. Las técnicas ultrasónicas, los métodos magnéticos y la difracción de neutrones son ejemplo de métodos no destructivos. [11]

Técnicas ultrasónicas.

Estas técnicas están basadas en la variación de la velocidad de las ondas ultrasónicas, las cuales pueden ser relacionadas con la magnitud y dirección de los esfuerzos residuales. [11]

Métodos Magnéticos.

Relacionan la interacción entre magnetismo y tensión elástica en materiales ferromagnéticos. Se dividen principalmente en técnicas activas y técnicas pasivas. Dentro de las técnicas activas la aplicación del campo magnético mide las variaciones en los parámetros de

campo mientras que en las técnicas pasivas mide la fuerza del campo magnético en la superficie del material. [11]

Las permeabilidad, histéresis y emisión magnética de Barkhausen, son métodos de las técnicas activas.

Los métodos ultrasónicos y magnéticos son sensibles a los tres tipos de esfuerzos residuales pero no distinguen entre ellos.

Método de difracción de neutrones y rayos X.

Este método esta basado en el uso de los espacios enrejados como gauge de tensión.

Esto permite estudiar y separar los tres tipos de esfuerzos residuales.

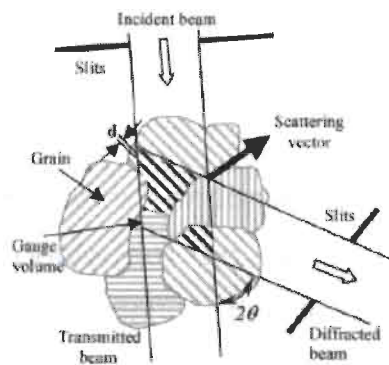


FIGURA 13. Principios de la técnica de difracción de neutrones mostrando la deflexión de un cristal plano d . (16)

Medición De Esfuerzos Residuales En Tuberías De Conducción Por Medio De Difracción De Neutrones. [5,12]

Michael Law [5,9] en su experimentación utilizó 8 ejemplares de una tubería de conducción midiendo sus esfuerzos residuales por medio de

difracción de neutrones y comparo los resultados con la técnica ring slitting. Los esfuerzos residuales cambiaron en los ejemplares que presentaban un recubrimiento.

El material a utilizar fue un API X70 sin recubrimiento en tres diversos espesores en forma de tira y un API X65 con y sin recubrimiento.

Las mediciones fueron hechas sin cortar completamente el aro de la tubería de conducción para preservar el campo de esfuerzos aunque la liberación de esfuerzos elásticos en el corte de aro puede ser estimada.

El escáner a través del espesor fue llevado a cabo en 5 profundidades y muestreado en dos posiciones diferentes.

Se aplico una fuerza adicional, llevando los esfuerzos radiales a cero en todos los puntos, debido a la limitación del espesor y la falta de material homogéneo o los efectos de calor localizados, como ocurre en las soldaduras. [12]

Dentro de los resultados encontrados los ejemplos de tiras desenrolladas fueron analizados en cinco posiciones a través del espesor, los componentes del esfuerzo axial fueron mayores en magnitud, otros espesores tuvieron resultados similares. Las posiciones positivas denotan la pared exterior de la tubería.

Muchos de los campos de esfuerzos vienen del enrollamiento y desenrollamiento de las tiras de acero. El proceso de enrollamiento comprime la cara interna de la tira enrollada (esto llega a ser la pared exterior de la tubería de conducción) y estira la cara exterior de la tubería.

Cuando se dobla la tira es doblada en la forma de una tubería la superficie exterior tiene esfuerzos de tensión y la pared interior tiene esfuerzos compresivos impuestos. Esto genera una distribución lineal de los esfuerzos siendo los esfuerzos axiales mayores en magnitud. (12)

Difracción de neutrones contra ring slitting

El máximo esfuerzo calculado por difracción de neutrones fue mayor que los calculados por los cortes del aro; esto podría tener la implicación de mayores esfuerzos en algunas localizaciones no mencionadas en ring slitting test. [12]

Por medio de difracción de neutrones se pudo obtener una medición de los esfuerzos axiales.

Efecto de las tuberías recubiertas

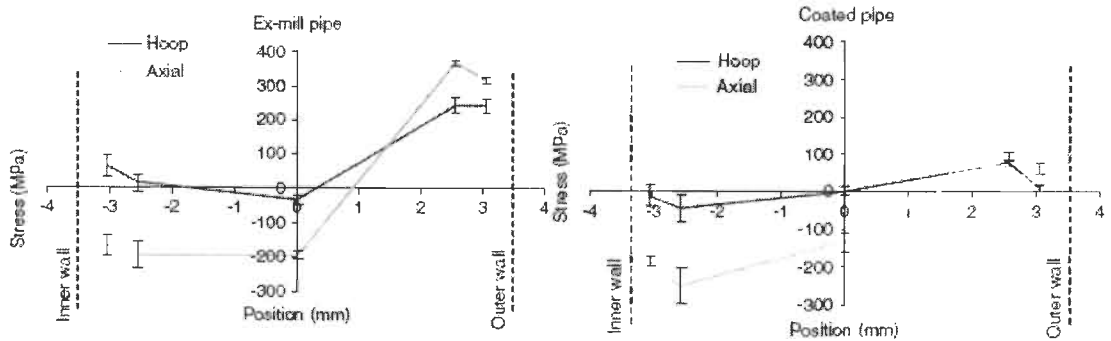


FIGURA 14. Comparación de los esfuerzos residuales entre una tubería con recubrimiento y otra sin recubrimiento. [17]

Se encuentra una reducción de los esfuerzos axiales y de arco en la superficie exterior, esto dedico al recubrimiento de la tubería.

Efecto del tratamiento térmico.

Los resultados del tratamiento térmico asociados con el cubrimiento de procesos cambiaron significativamente el esfuerzo residual en la pared exterior con reducciones de 82% y 96 % para los esfuerzos axiales y de arco. Esta reducción en los esfuerzos residuales disminuye significativamente la ocurrencia de fracturas por corrosión. [17]

10.

ESFUERZOS RESIDUALES PRESENTES EN EL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN.

Como se había mencionado antes, las etapas de formado, soldadura y acabado, generan esfuerzos residuales en la tubería de conducción los cuales disminuyen las propiedades mecánicas de esta.

Estos efectos pueden variar considerablemente por cambios en el proceso de manufactura, desde el orden en el que se aplican los cordones de soldadura, hasta el pre y el post tratamiento. [18]

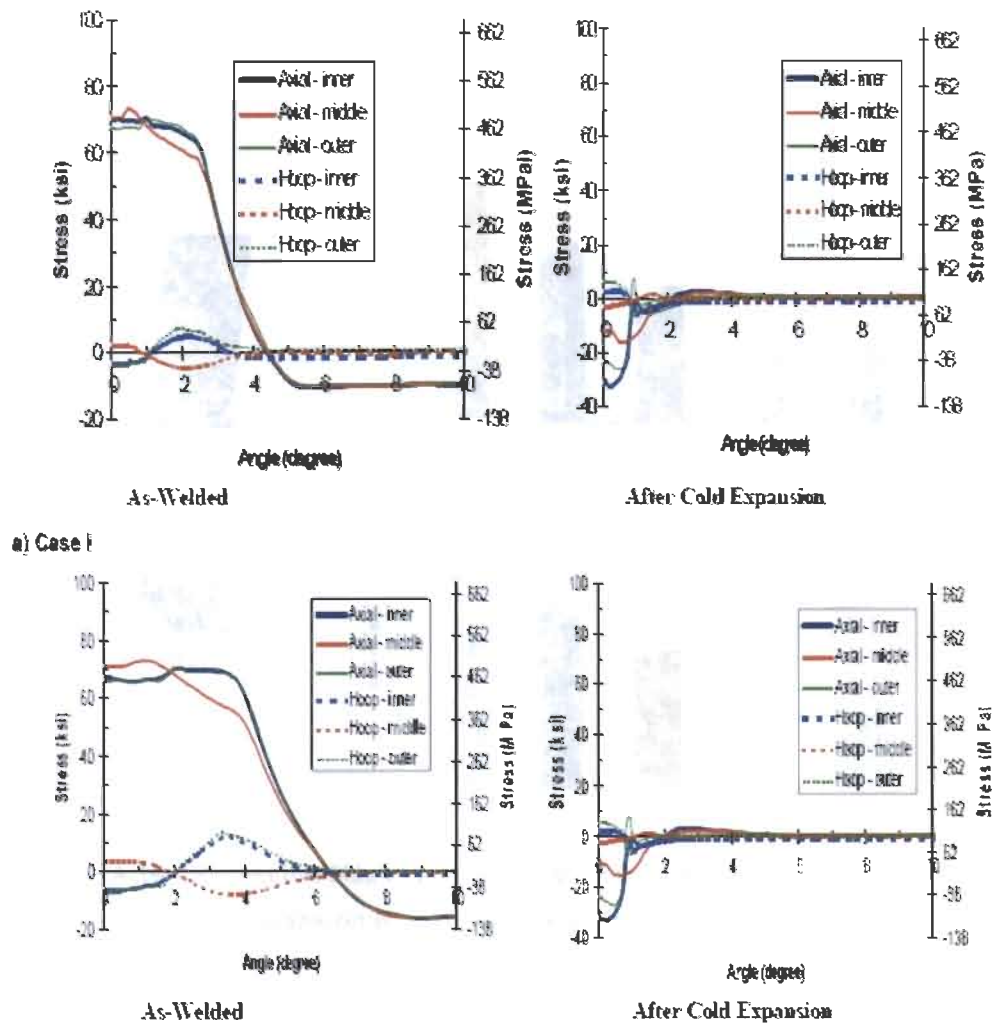


FIGURA 15.- Efecto de la expansión en Frío sobre el Esfuerzo Residual. [18]

En la figura 15 se observa como los esfuerzos axiales (líneas continuas) disminuyen considerablemente después del proceso de expansión mecánica. Estos esfuerzos fueron generados en un principio por una deformación térmica derivada del proceso de soldadura.

Los esfuerzos circunferenciales (líneas punteadas) están presentes en menor grado pero también muestran una considerable disminución después del proceso de expansión. [18]

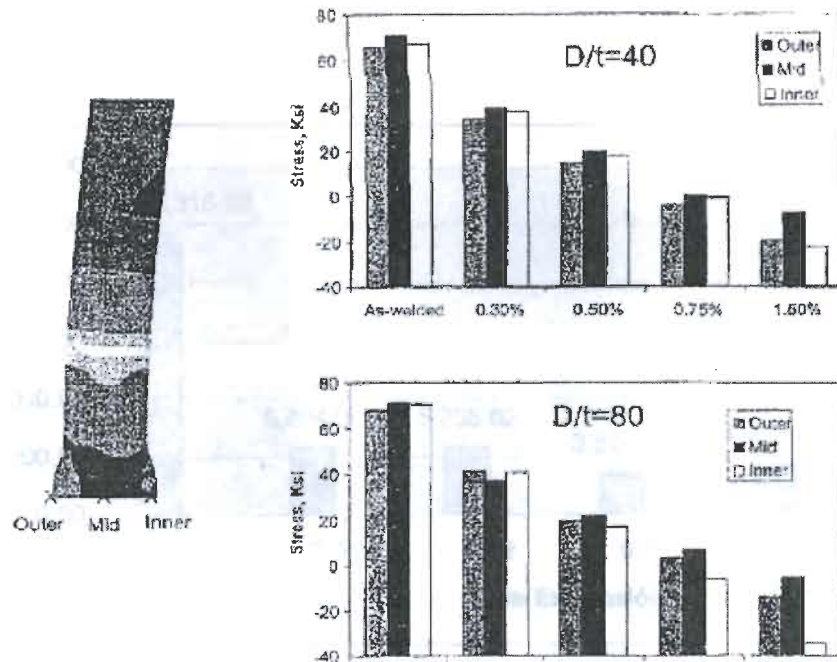


FIGURA 16.- Reducción Máxima del Esfuerzo Residual como Función del Nivel de Expansión Radial (Porcentaje del diámetro). [11]

En la figura 16 se muestran los diferentes niveles de esfuerzos residuales presentes en una tubería de conducción generados por diversos niveles de expansión mecánica. Estos fueron medidos en tres diferentes puntos del espesor de la tubería. En el primer grupo de barras se tiene un nivel de 70 Ksi que fueron obtenidos después del proceso de soldadura con doble arco, en contraste con el ultimo grupo de barras que presentan un nivel de -10 a -30 después de expandir la tubería en un 1.50%. [11]

En base a esta grafica podemos decir que en un rango de expansión de 0.33% a 1.50%, el mayor grado de expansión 1.50% presenta niveles menores de esfuerzos residuales, esto debido a la carga aplicada por el

proceso de expansión y el alivio de los esfuerzos que ya estaban presentes en la tubería después de haber sido soldada. Además de observar que en su mayoría, los esfuerzos residuales son mayores en el centro del espesor. [11]

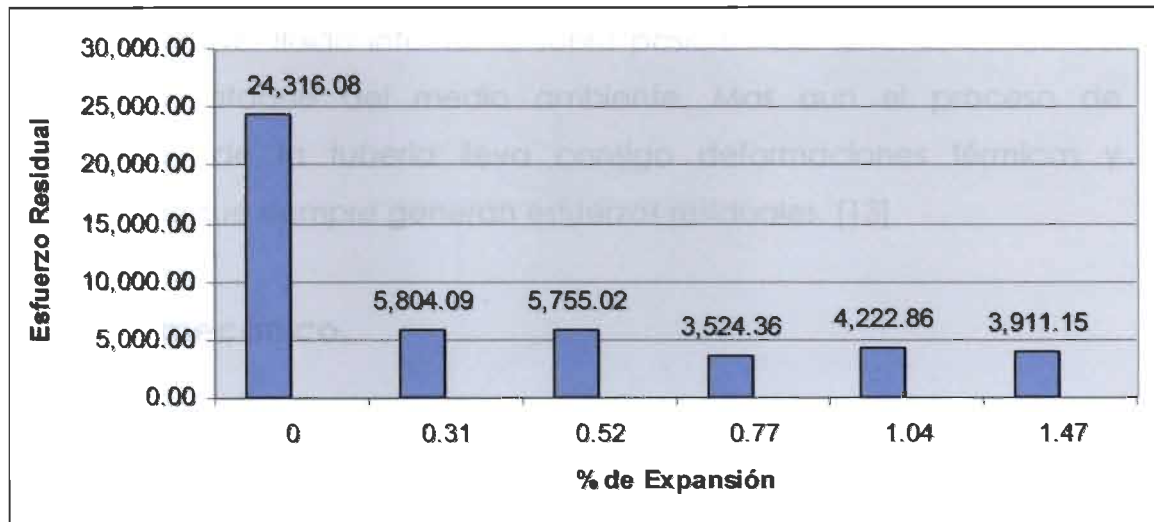


FIGURA 17.- Esfuerzos residuales presentes en diferentes grados de expansión (Psi).

En .77% de expansión se presenta el mínimo nivel de esfuerzos residuales que es de 3,524.36 Psi como podemos verlo en la figura 17. Esta cantidad de esfuerzos es mucho menor que los presentes en una expansión de 3,911.15 Psi. [11]

Efecto de los esfuerzos residuales en la calidad de confianza de una tubería de conducción en servicio.

La confianza basada en cargas de efectos residuales, aplicada para gasoductos subterráneos bajo una carretera y con o sin corrosión activa, nos da un mayor nivel de certeza de la susceptibilidad a fractura. Se ha encontrado que los esfuerzos residuales incrementan grandemente la

probabilidad de falla especialmente en la etapa temprana de la vida del gasoducto. (13)

Las tuberías de conducción están sujetas a grandes esfuerzos debido a la presión del fluido interno, la sobre posición del terreno, tráfico del suelo y el ataque del medio ambiente. Mas aun el proceso de fabricación de la tubería lleva consigo deformaciones térmicas y mecánicas que siempre generan esfuerzos residuales. [13]

Modelo mecánico.

Las tuberías de conducción de espesor pequeño están principalmente bajo efectos de esfuerzos longitudinales y circunferenciales (14), estos esfuerzos pueden ser obtenidos por medio de la ecuación de von Mises aplicada a esfuerzos aparecidos:

$$\sigma_{equiv} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_l^2 - \sigma_c \sigma_l}$$

Donde:

σ_{equiv} Es el esfuerzo equivalente de Von Mises

σ_c Esfuerzos circunferenciales

σ_l Esfuerzos longitudinales

Modelo de tubería sin corrosión

Los esfuerzos longitudinales y los esfuerzos circunferenciales son determinados por la superposición de 4 esfuerzos principales. [14]

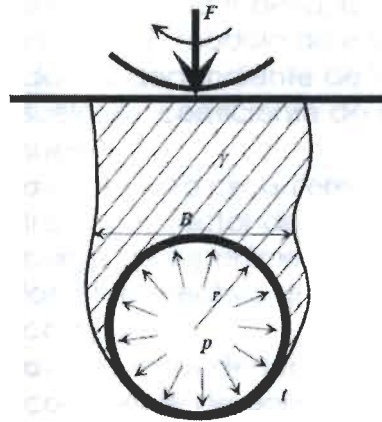


FIGURA 18.- Modelo de Tubería en Servicio

$$\sigma_c = \sigma_{Pc} + \sigma_{Sc} + \sigma_{resc}$$

$$\sigma_l = \sigma_{Pl} + \sigma_{Sl} + \sigma_{resl}$$

Donde:

σ_{Pl} y σ_{Pc} son esfuerzos debidos a la presión interna

σ_{Sl} y σ_{Sc} son debido a la carga del suelo.

σ_{resl} y σ_{resc} son esfuerzos de doblez y esfuerzos residuales

La obtención de estas formulas es dada en la tabla 4

TABLA 6.- Componentes de esfuerzos en tuberías de conducción. [14]

Componentes de esfuerzos	Descripción de los parámetros
$\sigma_{pc} = pr/t$	σ_{pc} , esfuerzos circunferencial interno debido a; p , presión interna; r , radio interno de la tubería; t , espesor de la pared de la tubería.
$\sigma_{sc} = \frac{6k_m C_d \gamma B^2 E t r}{(E t^3 + 24 k_d p r^3)}$	σ_{sc} , esfuerzos de doblez circunferencial debido a la sobre capa del suelo; B , anchura de la zanja a nivel superior de la tubería; C_d , coeficiente de presión de la tierra; E , modulo de elasticidad; k_m , coeficiente de doblez dependiente de la carga y la reacción del suelo; k_d , coeficiente de deflexión; γ , densidad del suelo.
$\sigma_{tc} = \frac{6k_m l_c C_L \gamma F E t r}{(L_c (E t^3 + 24 k_d p r^3))}$	σ_{tc} , esfuerzo circunferencial debido a las cargas de trafico; l_c , factor de impacto; C_L , coeficiente de carga de superficie; F , carga de rueda superficial; L_c , longitud efectiva de la tubería en la cual la carga es computada.
$\sigma_{pl} = \nu p r / t$	σ_{pl} , esfuerzos de tensión longitudinal resultados del coeficiente de poisson ν .
$\sigma_{sl} = \alpha E \Delta \theta$	σ_{sl} , esfuerzos longitudinales térmicos debidos a la variación de temperatura; α , coeficiente de expansión térmica; $\Delta \theta$, variación de la temperatura
$\sigma_{ll} = E r \chi$	σ_{ll} , esfuerzos longitudinales debido a las cargas a las cargas externas de doblez; χ , curvatura longitudinal de la tubería doblada

11.

CORROSIÓN

La corrosión metálica es un deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Siempre que la corrosión esta originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades del material. Se calcula que cada pocos segundos se disuelven 5 toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanometros o picometros de corrosión localizada. [13,14]

Dentro del proceso electroquímico de la corrosión se establece una corriente de electrones debido a una diferencia de potenciales entre un punto y otro. En este mecanismo, la especie que cede electrones se llama ánodo y la que los recibe cátodo, presentándose oxidación en el ánodo y reducción en el cátodo.

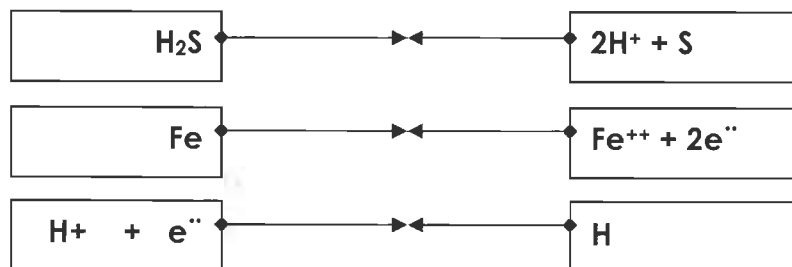
Para que exista corrosión electroquímica además del ánodo y del cátodo debe de haber un electrolito 8. Donde habrá una transmisión de electrones de ánodo a cátodo por medio de cargas eléctricas y de

iones en el electrolito. A esta corrosión también se le suele llamar corrosión húmeda.

El gas amargo es un ambiente que propicia la corrosión debido a su composición química H_2S . Se considera gas amargo cuando el H_2S excede 0.32 atm (0.05 psi). La presión parcial es determinada por la concentración de H_2S y la presión en la línea de la tubería.

La reacción química presente en el gas amargo para la generación de hidrogeno, ocurre de la siguiente manera:

Ionización del H_2S en solución acuosa: [10]



Fractura por esfuerzos de corrosión (SCC).

La fractura por esfuerzo de corrosión es definida como la interacción entre; un esfuerzo de tensión y un ambiente acuoso sobre una superficie metálica susceptible, que inicia y propaga fracturas.

Existen dos formas de SCC para aceros suaves que están enterrados.

La primera se propaga intergranularmente y es asociada con una concentración alcalina electrolítica que tiene contacto con la superficie

del acero. El control de este mecanismo es posible reduciendo la temperatura de la tubería y controlando el rango de potencial electroquímico de la tubería.

La segunda es tSCC (transgranular) que se propaga transgranularmente y es asociada con un electrolito diluido en un pH neutral en contacto con la superficie del acero. [2]

Algunas teorías sobre las características de este mecanismo son:

- Un rol de la disolución del hidrogeno en el realce del extremo de la fractura.
- Una propagación discontinua de la fractura de un punto más allá del extremo de la fractura.
- Un posible crecimiento sinérgico por fatiga y corrosión.

Modelo de corrosión para tuberías de conducción en servicio.

[14]

La formula general y práctica para obtener la perdida de espesor por corrosión es la siguiente:

$$t_c = kT^n$$

Donde:

t_c Es la capa de espesor corroído

k, n Son constantes de corrosión con desviación de .066-.037 para k y .53-.14 para n

T Es el tiempo transcurrido

Para el estudio de los esfuerzos circunferenciales se toma en cuenta el espesor real por lo tanto las ecuaciones 8.1, 8.2, 8.3 del modelo sin corrosión cambian de la siguiente forma:

$$\sigma_{pc} = \frac{pr}{t - kT^n}$$

$$\sigma_{sc} = \frac{6k_m C_d \gamma B^2 E r (t - kT^n)}{E(t - kT^n)^3 + 24k_d p r^3}$$

$$\sigma_{\zeta} = \frac{6k_m I_c C_L \gamma F E r (t - kT^n)}{L_c (E(t - kT^n)^3 + 24k_d p r^3)}$$

Para los esfuerzos longitudinales que tan bien se ven afectados por el cambio en el espesor de la tubería, las ecuaciones se cambiarán reemplazando el espesor t por $t - kT^n$.

Los parámetros más sensitivos para la generación de esfuerzos en tuberías de conducción en servicio son:

- Presión de gas
- Fuerza de cedencia
- Radio interno
- Espesor
- Esfuerzos residuales

El factor más importante de estas variables es la presión de gas ya que incrementa de manera significativa los esfuerzos residuales.

Cuando se incrementa la presión la sensibilidad a esfuerzos residuales varía. Originándose un reacomodo de los esfuerzos.

El incremento de presión incrementa drásticamente la probabilidad de falla, por lo que es sensible al coeficiente de variación de presión del gas. En este caso si la varianza incrementa la presión debe ser disminuida para mantener los niveles de seguridad.

La tasa de corrosión produce un gran incremento en la probabilidad de falla especialmente en la etapa temprana del gaseoducto.

La relajación de los esfuerzos residuales incrementa marginalmente la seguridad del gaseoducto el cual tiende a balancear las fuerzas perdidas, de este modo los esfuerzos residuales pueden ser vistos como una reserva de fuerza para ser desechadas con el tiempo.

Para grandes tasas de corrosión la influencia de los esfuerzos residuales a un tiempo expuesto es de 20 años.

La probabilidad de falla es mas confiable cuando los esfuerzos residuales son considerados en el modelo.

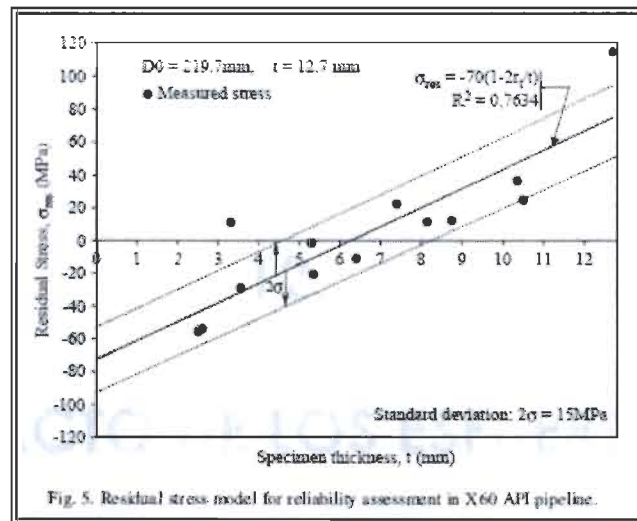


FIGURA 19.- Modelo de Esfuerzos Residuales para la confiabilidad de un acero API. [14]

12.

IMPACTO DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES EN FRACTURAS POR CORROSIÓN BAJO ESFUERZOS EN PH NEUTRAL DE TUBERÍAS DE ACERO.

OCURRENCIA DE PICADURAS Y FRACTURAS.

En esta investigación G. Van Boven valoró por medio de difracción de neutrones 12 especímenes de una tubería API 5LX-65 en servicio en múltiples puntos a lo largo de la longitud y a través de la profundidad de su espesor. [2,13]

Los especímenes fueron expuestos después a una combinación de esfuerzos cíclicos aplicados por varios periodos de tiempo y a un pH neutral en un ambiente acuoso del suelo para después buscar una

relación entre la aparición de micro picaduras e inicios de fractura con los esfuerzos residuales encontrados.

Esta investigación se llevo a cabo para conocer la relación entre los esfuerzos residuales y los mecanismos de fractura por esfuerzos de corrosión transgranular (tSCC).

Material y método de experimentación.

El material usado fue un acero API 5LX-65 (Grado 448 MPa) que presento una fractura por SCC, del cual se obtuvieron 4 placas. Su punto de cedencia fue de 480 MPa. Y su último punto de tensión fue de 607 MPa. [2,13]

Con un proceso de doblado, se enderezaron las secciones de tubería obteniendo 4 placas, a las cuales se les removió el espesor para recuperar la forma plana quedando un espesor final de 3.4 mm, Después se obtuvieron la probetas por medio del proceso de corte EDM (Maquinado de descarga eléctrica) con 7mm de ancho y 32mm de largo. Por ultimo se le dio un pulido con acabado de arena 400.

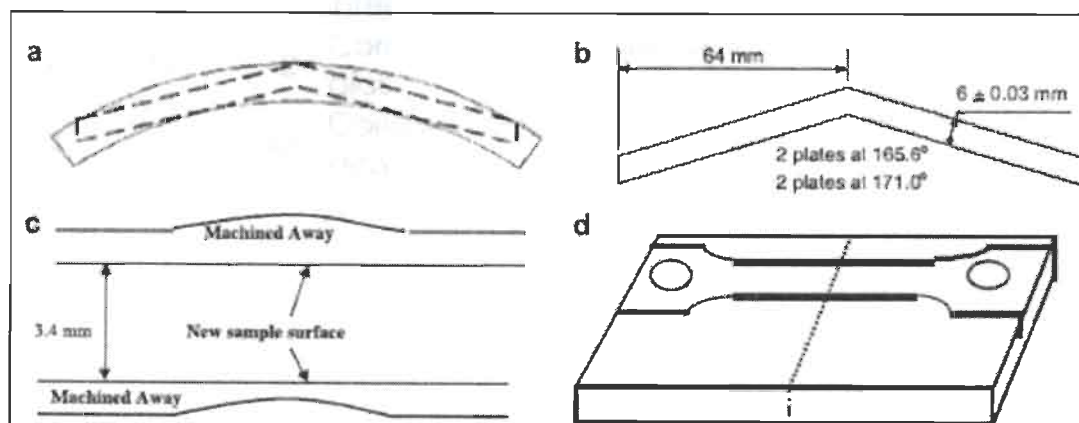


FIGURA. 20. Diseño de probetas a partir de 4 secciones de una tubería en servicio. [2,13]

De cada placa se obtuvieron 3 especímenes dando un total de 12.

Dos placas tuvieron un ángulo inicial de 165.6° y las otras dos tuvieron un ángulo inicial de 171.0° .

Los 12 especímenes se distribuyeron de la siguiente manera

TABLA 7.- Tabla de Especímenes. [2,13]

Lista de especímenes			
Placa	Angulo	ID	Procedimiento de experimentación
1	165.6	11	Ensayo destructivo para curvas stress-strain
1	165.6	12	No usada, maquinada fuera de especificación
1	165.6	13	Dif. neutrones y corrosión bajo cargas cíclicas 2631 h
2	165.6	21	Dif. neutrones y corrosión bajo cargas cíclicas 2631 h
2	165.6	22	corrosión bajo cargas cíclicas 2631 h
2	165.6	23	corrosión bajo cargas cíclicas de tensión inferiores 12 días
3	171	31	corrosión bajo cargas cíclicas 2631 h
3	171	32	Dif. Neutrones y corrosión bajo cargas cíclicas inferiores 12 d
3	171	33	Dif. Neutrones y corrosión bajo cargas cíclicas inferiores 12 d
4	171	41	Dif. Neutrones y corrosión bajo cargas cíclicas inferiores 12 d
4	171	42	Corrosión bajo cargas cíclicas de tensión inferiores 12 días
4	171	43	Corrosión bajo cargas cíclicas de tensión inferiores 12 días

Medición de los esfuerzos residuales por difracción. [2,13]

Un espécimen de cada placa fue medido por difracción de neutrones además de otro que fue sometido a esfuerzos cíclicos. Obteniendo los siguientes resultados.

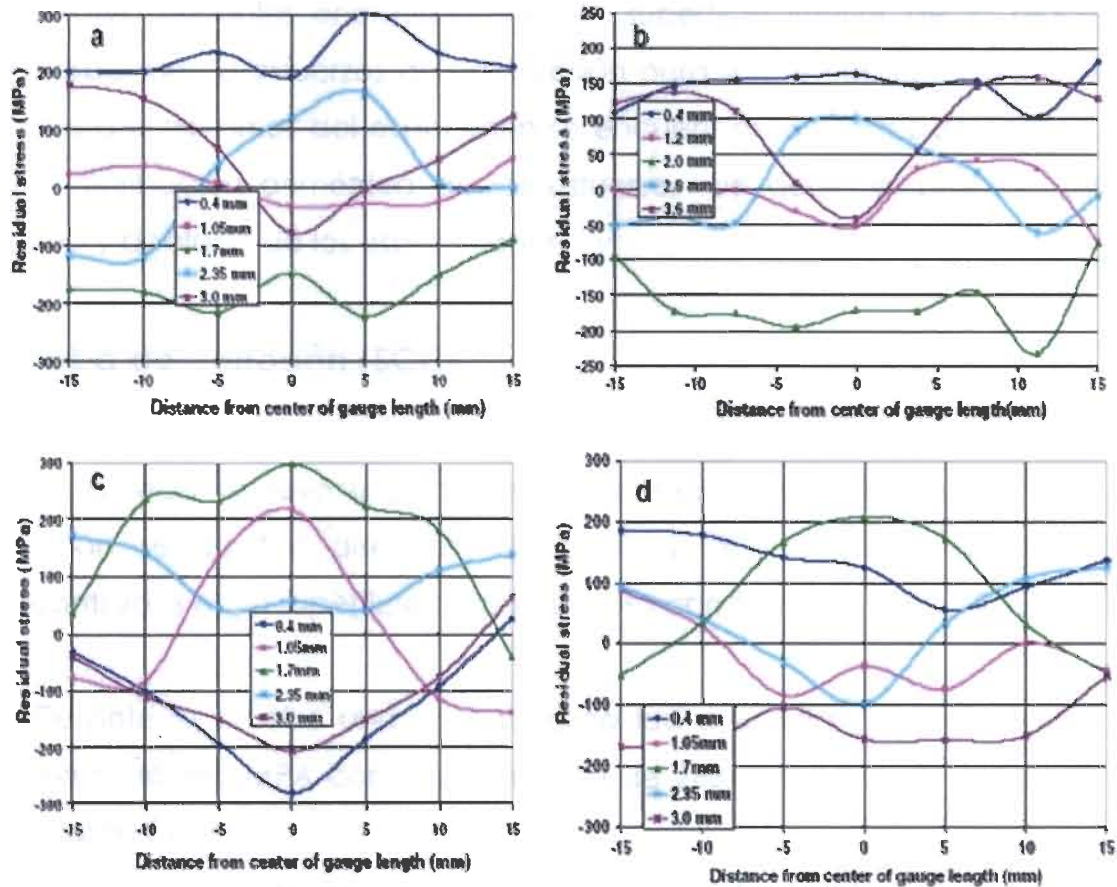


FIGURA 21.- Distribución de Esfuerzos Residuales. [2,13]

La dirección axial es equivalente a la dirección circunferencial de la tubería de conducción original.

Como el espesor de los especímenes fue de 3.4 mm, la línea .4 y 3.4 representan los esfuerzos residuales del espécimen a 0.4 mm de la

superficie mientras que la línea 1.7 representa refleja los esfuerzos residuales en el centro.

Las medidas de tensión de la superficie del espécimen fueron de un rango de 200 a 300 MPa de esfuerzos residuales. En contraste los esfuerzos residuales encontrados en la superficie interior de la placa corresponden a esfuerzos de compresión pero solo en el centro ya que en los dos extremos del espécimen se encuentran esfuerzos de tensión. Esta distribución asimétrica de los esfuerzos se debió al proceso de pulido y doblado de los especímenes.

Prueba de corrosión (SCC).

La prueba se llevó a cabo en una celda sellada de plexigas y la solución usada fue diseñada en base a los electrolitos del suelo encontrados en la superficie de una tubería con fallas de tSCC. [2,13]

Durante la prueba una carga cíclica fue aplicada con un esfuerzo máximo de 448 MPa con una duración de 2631 horas en las cuales se aplicaron 517 ciclos.

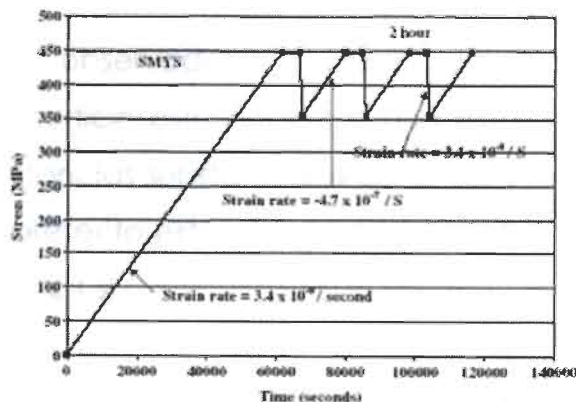


FIGURA 22.- Carga Cíclica aplicada. (2,13)

Al final de la prueba se realizó una inspección a través de la sección transversal del espécimen y se obtuvo una velocidad de crecimiento de fracturas dividiendo la fractura mas profunda en el punto mas critico entre el tiempo de prueba.

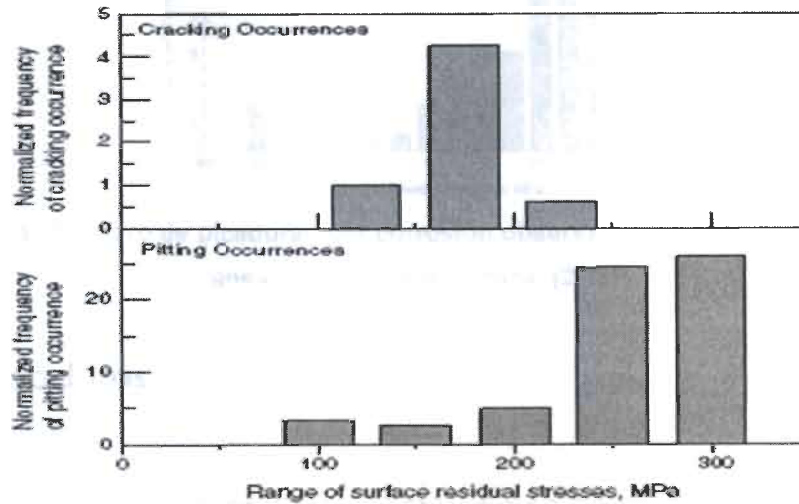


FIGURA 23.- Frecuencia de micropicaduras contra agrietamiento. [2]

Picadura por corrosión.

Las picaduras observadas no fueron aleatorias y ocurrieron en racimos en la superficie esto debido a una evidente acción galvanica que ocurrió a distancias substanciales de la cara del espécimen, donde la otra cara no presento este efecto debido a que fue sellada con una capa de aislante.[2,13]

Las picaduras fueron encontradas ocasionalmente en las regiones con esfuerzos de compresión.

La ocurrencia de picaduras fueron mayormente localizadas en las áreas con altos esfuerzos residuales, lo que sugiere que los altos esfuerzos residuales son anódicos con respecto a las áreas con niveles más bajos.

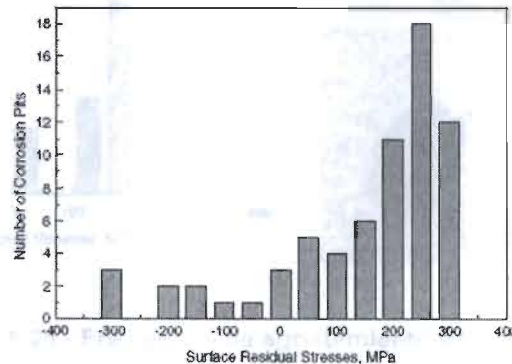


FIGURA 24.- Numero de picaduras por corrosión observados en 4 especímenes de ensayos bajo carga cíclica. [2,13]

Micro picaduras.

Las micro picaduras no son grietas originadas por un mecanismo de fractura, si no que son desarrolladas por picaduras profundas o defectos de grietas, cuya morfología es de un "cono" o de "balón", en algunos casos el "balón" aparece en medio de la grieta llegando a ser la grieta más fina al extremo.[2,13]

Las micro picaduras no aparecen necesariamente en las regiones con los mayores esfuerzos residuales, lo que sugiere que los esfuerzos residuales no el único factor a controlar para evitar tSCC.

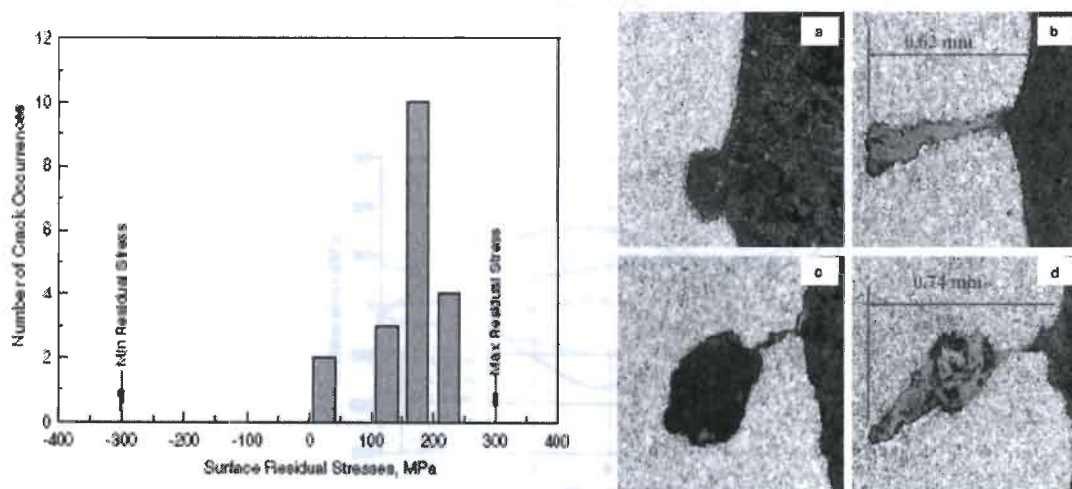


FIGURA 25.- Frecuencia de agrietamiento y forma. [2,13]

Aceleración de SCC bajo cargas cíclicas.

Un total de 5 especímenes de prueba fueron sujetos a 12 días de carga cíclica bajo las condiciones más agresivas obteniendo una mayor ocurrencia de fracturas en los rangos de 150 a 200 MPa. [2,13]

Diferencias visuales existen entre las áreas de la superficie con esfuerzos residuales compresivos y esfuerzos residuales de tensión. Mientras que en las áreas con esfuerzos residuales de tensión se presentó una apariencia oscura y estriada. En las áreas con esfuerzos residuales de compresión se presentó una apariencia más clara, con depósitos uniformes. Lo que sugiere la diferencia de potencial electroquímico entre las dos superficies. [2,13]

Aceleración de SCC en especímenes con esfuerzos residuales modificados.

Las cargas cíclicas posteriores al proceso de recubrimiento de las tuberías pueden dañar la protección de estas modificando los esfuerzos residuales durante la fabricación.

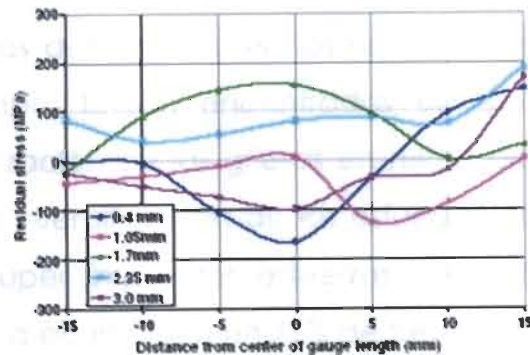


FIGURA 26- Esfuerzos Residuales Axiales medidos en el espécimen 32. [2,13]

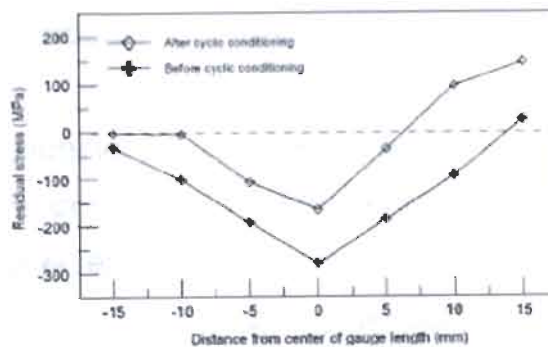


FIGURA 27.- Redistribución de esfuerzos axiales después de carga cíclica. [2,13]

La formación de micro picaduras en una profundidad no mayor a 200 micrómetros ocurrió preferentemente en áreas donde los esfuerzos de tensión fueron mayores (300 MPa). [2,13]

Pequeñas picaduras ocurrieron en superficies con esfuerzos residuales de compresión. Esto sugiere la presencia de una interacción catódica y

anódica, en donde las áreas con esfuerzos residuales de compresión llegan a ser catódicas para las áreas con esfuerzos residuales de tensión.

Todas las fracturas detectadas, en los especímenes de pruebas de largo y corto tiempo, fueron encontradas en el fondo de micro picaduras. La localización de las grietas en micro picaduras puede ser relacionada con la intensificación de los esfuerzos causados por micro picaduras y los súper impuestos esfuerzos residuales de tensión. La iniciación de fractura ocurrió con un 71% de frecuencia en áreas donde los esfuerzos residuales estuvieron en el rango de 150-200 MPa. Ningún inicio de fractura fue encontrado en picaduras localizadas en la superficie con esfuerzos residuales de compresión o en superficies con los más altos esfuerzos residuales de tensión (300 MPa).[2,13]

La diferente frecuencia de ocurrencia de picaduras contra fracturas (grietas), cuando es comparada contra el nivel absoluto de esfuerzos residuales puede ser el resultado de la exposición de SCC a condiciones de esfuerzos cíclicos así como a la dirección de profundidad del gradiente de esfuerzos residuales. [2,13]

Las grietas formadas durante las pruebas de largo tiempo a SCC, experimentaron una forma blunting causada por la severa disolución lateral y la deformación de creep. La disolución lateral y la deformación creep ocurrieron a una discreta profundidad donde la velocidad de agrietamiento cayó por debajo de la tasa de disolución anódica, debido a la reducción de los esfuerzos residuales de tensión en la dirección de crecimiento. [2,13]

La tasa de crecimiento de SCC determinada es comparable con la que se encuentra en la tuberías de conducción en servicio. Para los especímenes de prueba de largo tiempo la tasa de crecimiento incremento con el incremento de los esfuerzos residuales, mientras que en los especímenes de corto tiempo el umbral de los esfuerzos residuales se mira necesario para la iniciación de grietas. [2,13]

Ha sido mostrado que las fracturas por esfuerzos de corrosión generadas en ambiente acuoso de ph neutral pueden ser rápidamente debilitados debido a la deformación plástica y /o una extensiva disolución anódica.

Como resultado un gradiente de esfuerzo de residual de tensión positivo es necesario para continuar el crecimiento de las fracturas por esfuerzos de corrosión en tuberías de acero expuestos a estos ambientes de ph. Los esfuerzos residuales de tensión representan un largo mecanismo de manejo de fuerzas para fractura de nucleacion y corta fractura de tensión para un estado de baja tensión o un estado compresivo. El cambio es esfuerzos residuales pueden ocurrir en un milímetro de superficie, resultando en una larga proporción de fracturas por esfuerzos de corrosión. [2,13]

13.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El impacto del proceso de manufactura en las tuberías de conducción son determinantes para las propiedades mecánicas y su susceptibilidad a las fracturas por corrosión.

El proceso SAW es de gran importancia ya que garantiza un cordón de soldadura con la menor cantidad de defectos debido al fundente protector y una buena penetración, disminuyendo el problema de falta de fusión. Sin embargo el calor inducido a la tubería de conducción provoca una gran cantidad de esfuerzos residuales ocasionados por la deformación térmica, que es visible por su efecto "banana" en la tubería.

Los esfuerzos residuales presentes en una tubería API 5L X52 de 24" de diámetro y un espesor de $\frac{3}{4}$ " y una longitud de 12" alcanzan niveles de hasta 23,316.08 Psi después de un proceso de doble arco sumergido con dos cordones, uno en la superficie interna y otro en la superficie externa. Presentándose en mayor grado los esfuerzos axiales.

El proceso de expansión mecánica garantiza una reducción en los esfuerzos y una recuperación en la dimensiones de la tubería. La reducción en estos esfuerzos fue de 5804.09 Psi en una expansión de .31% hasta de 3,524.36 en una expansión de .77%.

Los efectos residuales presentes en la tubería de conducción, interactúan como ánodo y cátodo, formando una red electrolítica, que sumada al ambiente de gas amargo comienza la liberación de hidrogeno.

Este hidrogeno atómico se difunde a través del acero y se recombina para formar moléculas, las cuales incrementan la presión interna y originan agrietamiento.

Entre mayor sean los esfuerzos residuales, mas rápido se desarrollara el mecanismo de fractura por corrosión, de aquí la importancia en la reducción de los esfuerzos.

Las tuberías con recubrimiento dan una protección contra el ambiente amargo, reduciendo la posibilidad de fractura. Sin embargo el manejo de las tuberías desde su embarque hasta su manipulación en campo, fisura, en algunos zonas, el recubrimiento y provoca una localización de la corrosión.

La relación entre fracturas por corrosión y esfuerzos residuales no esta completamente comprendida aun, ya que a mayores niveles de esfuerzos (300Mpa) se ha encontrado micro picaduras mientras que en niveles de 150 - 200 Mpa se ha detectado el 71% de los inicios de fractura.

Las micropicaduras se forman a una profundidad no mayor que 200 μm ocurriendo preferentemente en áreas donde los esfuerzos residuales de tensión son mayores. Mientras que el agrietamiento solo se desarrolla en el fondo picaduras localizadas en regiones con esfuerzos residuales moderados

Un gradiente con altos niveles de esfuerzos residuales positivos es necesario para generar un agrietamiento en las tuberías de acero para conducción expuestas a un pH neutral. Este gradiente representa una gran fuerza mecánica dirigida para iniciar la nucleación de agrietamientos.

Se recomienda el uso en el futuro de la norma NACE TM 0177 método A y D para valorar la susceptibilidad a fractura por corrosión en los diversos niveles de expansión mecánica. Además de determinar la permeabilidad de hidrogeno en acero API 5L X52.

14.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) NACE Standard MR 0175-2000
- 2) W.Chen a,*, G. Van Boven a,1, R. Rogge b. The role of residual stress in neutral pH stress corrosion cracking of pipeline steels – Part II: Crack dormancy. Acta Materialia 55 (2007) 43-53, 26 July 2006, available online 17 October 2006.
- 3) <http://www.pemex.com/index>
- 4) W.B. Middlebrooks a,, D.L. Harrod a, and R.E. Gold b. Residual stresses associated with the hydraulic expansion of steam generator tubing into tubesheets. Nuclear Engineering and Design 143 (1993) 159-169 North Holland, Received 1 March 1993.
- 5) <http://www.tubacero.com>
- 6) Thermocalc software
- 7) Sindo Kou Welding metallurgy
- 8) COMIMSA DSAW
- 9) <http://www.lincolnelectric.com.mx>
- 10) Benito Arellano, Efecto de los esfuerzos residuales en el proceso de manufactura de una tubería de conducción.
- 11) http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.php
- 12) Michael Law. Neutron residual stress measurements in linepipe. Physica B 385-386 (2006) 900 – 903.

- 13) G. Van Boven a,1, W. CHEN a,*, r. Rogge b, The role of residual stress in neutral pH SCC of pipeline steels Part I Pitting and cracking occurrence. *Acta Materialia* 55 (2007) 29 – 42
- 14) A. Amirat a,, A. Mohamed-Chateauneuf b,*, K. Chaoui a. Reliability assessment of underground pipelines under the combined effect of active corrosion and residual stress. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83 (2006) 107-117, 30 November 2005.
- 15) John W.H. Price a,*, Anna Paradowska a,, Suraj Joshi a,, Trevor Finlayson b. Residual stresses measurement by neutron diffraction and theoretical estimation in a single weld bead. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83 (2006) 381-387.
- 16) Jijin Xu, Ligong Chen, Chunzen Ni. Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 7 November 2006
- 17) <http://en.wikipedia.org/wiki/Wiki>
- 18) NACE Standard TM0177-96
- 19) Anna Paradowska a,, John W.H. Price a, Raafat Ibrahim a, Trevor Finlayson b A neutron diffraction study of residual stress due to welding. *Journal of Materials Processing Technology* 164-165 (2005) 1099 - 1105.
- 20) Masahito Mochizuki *,1. Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress-corrosion cracking. *Nuclear Engineering and Design* 237 (2007) 107 - 123, 8 May 2006

15.

Descripción
 TABLA 1.- Diagrama Mho
 TABLA 2.- Diagrama de T
 TABLA 3.- Procedimiento
 TABLA 4.-
 TABLA 5.-
 TABLA 6.-
 TABLA 7.-

LISTADOS DE TABLAS Y FIGURAS

LISTADO DE TABLAS

Descripción	Pagina
TABLA 1.- Composición química de Acero API X 52-12.....	12
TABLA 2.- Composición Química del Electrodo-17.....	18
TABLA 3.- Datos de la tubería de conducción para obtener Fuerza de tracción.....	21
TABLA 4.- Modelo Meschnager Sachs.....	23
TABLA 5.- Técnica de Crapton.....	24
TABLA 6.- Componentes de Esfuerzos.....	36
TABLA 7.- Tabla de Especimenes.....	44

LISTADO DE FIGURAS

Descripción	Página
FIGURA 1.- Diagrama Binario Fe Mn.....	10
FIGURA 2.- Diagrama de Producción de Tubería.....	11
FIGURA 3.- Proceso SAW.....	14
FIGURA 4.- Efecto del Amperaje en SAW.....	14
FIGURA 5.- Efecto del voltaje en SAW.....	16
FIGURA 6.- Efecto de la velocidad de avance en SAW.....	16
FIGURA 7.- Efecto del electrodo en SAW.....	17
FIGURA 8.- Solidificación API X52.....	18
FIGURA 9.- Solidificación API X52 y Electrodo.....	19
FIGURA 10.- Esfuerzos Residuales.....	22
FIGURA 11.- Shot Penning.....	23
FIGURA 12.- Esfuerzos Totales.....	24
FIGURA 13.- Principio de la técnica de difracción de neutrones.....	30
FIGURA 14.- Comparación de esfuerzos de tubería sin y con recubrimiento.....	32
FIGURA 15.- Efecto de la expansión en Frío sobre el Esfuerzo Residual.....	35
FIGURA 16.- Reducción Máxima del Esfuerzo Residual como Función del Nivel de Expansión Radial (Porcentaje del diámetro).....	36
FIGURA 17.- Esfuerzos residuales presentes en diferentes grados de expansión (Psi)...	37
FIGURA 18.- Modelo de Tubería en Servicio.....	39
FIGURA 19.- Modelo de Esfuerzos Residuales para la confiabilidad de un acero API.	46
FIGURA 20.- Diseño de probetas a partir de 4 secciones de una tubería en servicio..	48
FIGURA 21.- Distribución de Esfuerzos Residuales.....	50
FIGURA 22.- Carga Cíclica aplicada.....	51
FIGURA 23.- Frecuencia de micropicaduras contra agrietamiento.....	52
FIGURA 24.- Numero de picaduras por corrosión observados.....	53
FIGURA 25.- Frecuencia de agrietamiento y forma.....	54
FIGURA 26.- Esfuerzos Residuales Axiales.....	55
FIGURA 27.- Redistribución de esfuerzos axiales después de carga cíclica.....	55

16.

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Nombre: Víctor Manuel Ventura Sobrevilla

Estudios:

- Ingeniero Industrial y de Sistemas 2001-2005
Facultad de Sistemas U. A. de C.
- Especialidad en Tecnologías de la Soldadura Industrial 2006-2007
COMIMSA