

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**LA TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL: SU PAPEL EN EL  
DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS PARA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE  
HIDROCARBUROS API 5L POR EL PROCESO SAW**

**POR**

**ING. ADRIÁN ENRIQUE MONROY MADRID**

**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**



**LA TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL: SU PAPEL EN EL  
DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS PARA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE  
HIDROCARBUROS API 5L POR EL PROCESO SAW**

**POR**

**ING. ADRIÁN ENRIQUE MONROY MADRID**

**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**

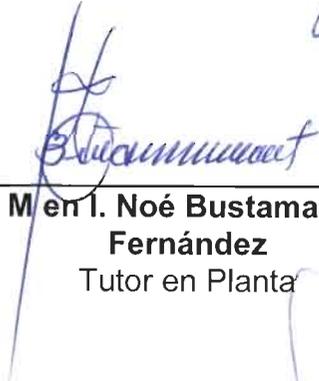
Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía “**LA TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL: SU PAPEL EN EL DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS PARA TUBERIA DE CONDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS API 5L POR EL PROCESO SAW**”, realizada por el alumno **ADRIÁN ENRIQUE MONROY MADRID** con número de matrícula **09ES-087**, sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



---

**Dr. Felipe Arturo Reyes  
Valdés**  
Tutor Académico



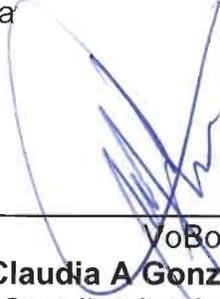
---

**M en I. Noé Bustamante  
Fernández**  
Tutor en Planta



---

**Dr. Felipe de Jesús García  
Vázquez**  
Asesor



---

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

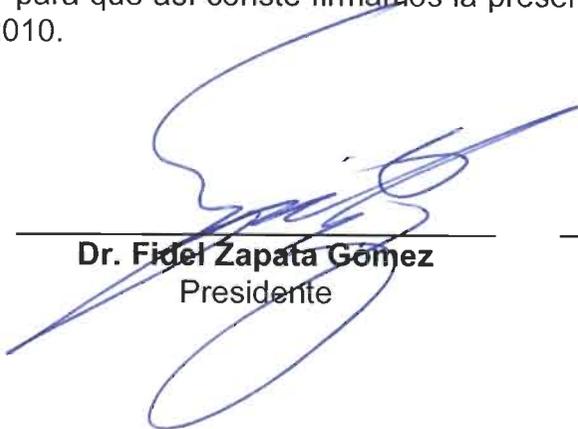
**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**

**Gerencia de Desarrollo Humano**

**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de Especialización del alumno **ADRIÁN ENRIQUE MONROY MADRID**, una vez leída y revisada la Monografía titulada "**LA TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL: SU PAPEL EN EL DISEÑO DE UNIONES SOLDADAS PARA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE HIDROCARBUROS API 5L POR EL PROCESO SAW**", aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

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



**Dr. Fidel Zapata Gómez**  
Presidente



**MC. Víctor Hugo López  
Cortez**  
Secretario



**Dr. Felipe Arturo Reyes  
Valdés**  
Vocal

# ÍNDICE GENERAL

<b>Síntesis</b>	1
<b>Capítulo 1: Introducción</b>	3
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2 Objetivo General	4
1.3 Objetivos Especificos	4
1.4 Justificación	4
1.5 Alcance	5
<b>Capítulo 2: Estado del Arte</b>	6
2.1 Tubería de Conducción	6
2.2 Especificación API 5L	8
2.3 Proceso de Fabricación de tubos API	9
2.4 Clasificación tuberías de Conducción	10
2.5 Defectos de Fabricación	10
2.6 Características del Gas Transportado	10
2.7 Gas Dulce	12
2.8 Gas Amargo	12
2.9 Proceso de Soldadura por Arco Sumergido	13
2.9.1 Principios de Funcionamiento	14
2.9.2 Métodos de aplicación del proceso SAW	16
2.9.3 Método Automático	16
2.9.4 Método semiautomático o mecanizado	16
2.9.5 Soldado por máquina	16
2.9.6 Equipo utilizado en el proceso SAW	16
2.9.7 Materiales soldados con proceso SAW	19
2.9.8 Variables de operación	20
2.10 Criterios de consideración para diseño de líneas de	22

conducción de hidrocarburos	
2.10.1 Grados de Resistencia	23
2.10.2 Resistencia a la fractura	23
2.10.3 Pruebas de Dureza	23
2.10.4 Examen no destructivo	24
2.10.5 Examen no destructivo en costuras	24
2.10.6 Pruebas de presión	24
2.10.7 Soldabilidad	24
2.10.8 Accesorios de la Tubería	24
2.11 Tratamientos Térmicos	26
2.11.1 1 Metalurgia de la soldadura en estado sólido	27
2.11.2 Ciclo térmico de las juntas soldadas	27
2.11.3 Cambios dimensionales	30
2.11.4 Esfuerzos residuales	32
2.12 Transformaciones de fase del acero durante el proceso de soldadura	33
2.12.1 Efectos indeseables del ciclo térmico de la soldadura	36
2.12.2 Esfuerzos residuales	37
2.12.3 Modificación de la estructura metalográfica	41
2.13 Efectos secundarios por efecto térmico de proceso	42
2.13.1 Absorción de gases por la soldadura	42
2.13.2 Deshidrogenado	43
2.13.3 Fisuración por recalentamiento	44
2.13.4 Revenido o Tratamientos térmicos postsoldadura	45
2.14 Energía calorífica necesaria, durante la soldadura en servicio de tuberías para el transporte de petróleo	46

2.15	Consideraciones mecánicas para el diseño de uniones soldadas de tuberías por proceso SAW	50
2.15.1	Las variables relacionadas con las uniones soldadas	50
2.15.2	Degradación de la tenacidad al impacto durante el envejecimiento acelerado de soldadura en acero microaleado	51
<b>Capítulo 3:</b>	<b>Discusión y Análisis de la Bibliografía</b>	<b>54</b>
<b>Capítulo 4:</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>56</b>
	<b>Recomendaciones</b>	<b>58</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>
	<b>Listado de Tablas</b>	<b>61</b>
	<b>Listado de Figuras</b>	<b>62</b>
	<b>Resumen Autobiográfico</b>	<b>63</b>

# SÍNTESIS

Durante algunos años, el término “soldadura” evocaba al arte de unir metales mediante aplicación de calor y adherir las partes a unir por aplicación de un aporte fundido, más no se denotaba una ciencia metalúrgica en sus inicios, o de tecnología de procesos.

Sin embargo, de hace cerca de 15 años, la tecnología de la soldadura ha estado evolucionando con una conjunción de diversas ciencias de la ingeniería, que hacen de ésta un equilibrio entre arte, ciencia y tecnología para el desarrollo de nuevas técnicas de unión de metales.

En lo que respecta a la formación de recursos humanos, también ha tenido una evolución que; en los últimos años, ha avanzado de prisa, de tal forma que no solo se preparan a los soldadores, mediante certificaciones nacionales e internacionales, además existen las ingenierías en soldadura, diplomados, maestrías y doctorados en tecnología de unión de materiales.

En este trabajo, se muestra un aspecto general de las diferentes disciplinas que un especialista en tecnología de la soldadura industrial, en el sector de la conducción de hidrocarburos, tubería de línea, ya sea para la unión circunferencial de tubos o la reparación de estos; así mismo se explica paso a paso el aporte de disciplinas como metalurgia, procesos, física de materiales, manejo de códigos, tratamientos térmicos, técnicas de reparación; todo con aplicación a la industria del petróleo.

Se puede ver que el especialista en tecnología de la soldadura industrial, debe de contar con un conocimiento mayor al considerado básico, de las disciplinas mencionadas, de tal manera que tiene la capacidad de diseñar, evaluar y supervisar actividades de tecnologías de unión.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN.

### 1.1. Planteamiento del problema.

Las tuberías de conducción de hidrocarburos se componen de tramos de 12 m, unidos circunferencialmente por procesos de soldadura por fusión, principalmente el de arco sumergido (Submerged Arc Welding, SAW). Los fluidos que transportan pueden ser tanto dulces ( $\text{CO}_2$ ) como amargos ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Las soldaduras son pequeñas zonas que, de acuerdo a la longitud total de las líneas (más de 40 km) se consideran como discontinuidades, las cuales son zonas preferenciales con alta energía, en donde llevan a cabo mecanismos de fallas, tanto mecánicas como químicas, teniendo una alta incidencia con respecto a las causas totales de fallas en líneas de conducción API 5L.

El hecho es que no se tiene conceptualizado el papel del Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial, para el diseño de estas uniones soldadas y así, considerar desde la fabricación las condiciones de proceso, y tratamientos posteriores, para obtener soldaduras sanas y con el menor riesgo de falla; así mismo, se requiere de que este especialista, contemple las diferentes opciones de herramientas mecánicas, metalúrgicas, de proceso y matemáticas, que tiene a su disposición para optimizar su trabajo.

## **1.2. Objetivo general**

Establecer el papel del Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial en el diseño de uniones soldadas, las herramientas mecánicas, metalúrgicas, matemáticas así como la normativa y consideraciones adecuadas para establecer las condiciones de proceso adecuadas para minimizar la incidencia de fallas en las zonas de unión longitudinal de tuberías de conducción API 5L.

## **1.3. Objetivos específicos**

1. Establecer la importancia de la participación del Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial en el equipo de ingenieros para el diseño de líneas de conducción de hidrocarburos API 5L.
2. Estudiar el proceso SAW y el impacto de sus variables en las uniones soldadas, así como el control de estas para el diseño de juntas.
3. Indicar las herramientas mecánicas, metalúrgicas y matemáticas para el óptimo diseño de estas uniones.
4. Estudio de la normativa aplicable para las uniones soldadas en líneas de tubería de conducción de hidrocarburos.
5. Conocimiento de las herramientas de modelación para el cálculo de esfuerzos en uniones soldadas

## **1.4. Justificación**

La tubería para la construcción de los ductos de transporte de hidrocarburos amargos y dulces son fabricados bajo especificaciones API (American Petroleum Institute), lográndose la unión en los procesos de fabricación mediante juntas soldadas aplicando comúnmente el proceso de soldadura SAW (Sumerged Arc Welding); siendo esta una de las más comunes en la fabricación de la tubería de conducción.

Durante su vida útil, los ductos de transporte son sometidos a condiciones de presión y de temperatura, lo que hace imprescindible mediante la ingeniería de diseño, determinar las especificaciones para el proceso de soldadura, de tal manera de obtener juntas circunferenciales que soporten los valores máximos de presión y temperatura de operación.

Durante los procesos de fabricación de la tubería, se forman equipos multidisciplinarios de ingenieros mecánicos, civiles principalmente, sin embargo no esta bien establecida la importancia de la inclusión de ingenieros metalúrgicos, en materiales e ingenieros especialistas en tecnología de la soldadura, lo que hace que no se contemplen detalles importantes de la soldadura, lo que hace que sea alta la probabilidad de fallas en estas zonas de unión.

#### **1.5. Alcance.**

Realizar un estudio del estado del arte, para determinar el papel del especialista en tecnología de la soldadura industrial y las herramientas y conocimientos que aporta en el diseño de uniones soldadas, por el proceso SAW, para el diseño de líneas de conducción de hidrocarburos API 5L.

# CAPÍTULO 2

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Tubería de Conducción [4]

El continuo crecimiento de la producción de petróleo y un mayor uso de gas naturalmente, han provocado la demanda de tuberías para el transporte de petróleo y gas natural que ha ido aumentando de manera significativa. Los nuevos gasoductos en tierra utilizados en su construcción con tubos de alta resistencia, de gran diámetro requieren de especificaciones altamente concretas para que cuando estén en funcionamiento soporten las altas presiones y temperaturas de operación así como fenómenos físicos, como la dilatación, contracción y coeficiente de elongación entre sus propiedades mecánicas.

El aumento de la resistencia del material utilizado puede permitir una significativa minimización del espesor de la pared y las deformaciones producidas por condiciones operativas, están en función del diseño de las líneas (que implica la correcta aplicación de los coeficientes de dilatación y contracción) resultando en beneficios económicos obtenidos por una mayor productividad de las líneas de conducción.

El desarrollo de los aceros, en particular para su aplicación en gasoductos, oleoductos u oleogasoductos, se debe básicamente a la alta tenacidad asociados a niveles relativamente altos de resistencia mecánica y buena

soldabilidad, sin embargo, durante el proceso de soldadura la relación entre la resistencia y la tenacidad puede ser comprometida por los efectos de deformación ocurridos al arrancar una línea nueva o al incrementar la temperatura de proceso en una línea existente.

Los avances en el desarrollo de los aceros utilizados para la fabricación de tubos comenzaron en 1970 con la introducción de tratamientos termomecánicos, en sustitución de los tratamientos térmicos tradicionales para producirlos.

Actualmente el desarrollo tecnológico en la fabricación de materiales para ductos de alta resistencia ha permitido disponer de otros grados de aceros API, tales como X70, X80, X100 y X120. Mediante la adición de aleaciones a base de Ti, Nb, V y CaO como modificador de inclusiones,

El desarrollo de nuevas estructuras de acero para este segmento de la industria permitió la introducción de aceros más resistentes a los defectos microestructurales y de soldadura, sometiendo a los ductos a operar a alta presión y temperaturas del proceso durante su transporte, creando un estado de mayor dilatación en el sistema de tubería, respecto de las condiciones de diseño, incrementando sus dimensiones y producir deformaciones físicas, las cuales pudieran ser o no absorbidas por el coeficiente de elongación del acero.

Lo anterior es resultado de que a mayores temperaturas del proceso se necesita un mayor número de marcos de expansión para compensar la dilatación del ducto.

Este tipo de conocimiento proporcionará un amplio criterio necesario para que de manera oportuna se puedan evitar fallas, trayendo como consecuencia fugas de aceite, gas o gasolinas, causando daños materiales o daños a la ecología de grandes proporciones.

Además de estos factores es necesario tener en cuenta que los costos de explotación para la recuperación de estas fallas son elevadas, ya que la reparación y el reacondicionamiento de las tuberías son complejos y requieren de tiempo [1]

De modo general los aceros para tubos podemos dividirlos en cuatro grupos como se puede ser observado en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Grados típicos, usos y clases de tubos [4]

Clase (LE)	Grado típico	Uso
Min 217 MPa	API 5L A/ B/ X42/ X46/ X52/ X56	Los productos no sometidos a la presión
Min 453 Mpa	API 5L X60/ X65	Las tuberías sometidas a presión media y alta
Min 522 MPa	API 5L X70	Las tuberías a alta presión
Min 551 MPa	API 5L X80	Las tuberías a alta presión

\*Coeficiente de dilatación lineal de aceros al carbón es de 0.000012 (1/°C)

## 2.2 Especificación API 5L [4].

El Instituto Americano del Petróleo (API por sus siglas en inglés American Petroleum Institute) fue fundado en 1919 con la necesidad de estandarizar las especificaciones técnicas relativas a la perforación y la producción de equipo. Este instituto se ha convertido con los años, en la mayor asociación empresarial de petróleo de EE.UU., que representan a todos los segmentos de la industria petrolera como la exploración, producción, transporte, refinación y mercado.

Los tubos utilizados en la industria del petróleo se clasifican generalmente de acuerdo a la norma API basada en su aplicación y resistencia mecánica. La especificación API para la tubería es API 5L (Especificaciones para los Tubos de Acero). Esta especificación se refiere a tubos sin costura y con costura (Soldados). El propósito de esta especificación es establecer normas para la

fabricación de tubería usada para el transporte de gas, agua y petróleo. Aunque los tubos de suministro son establecidos por estándares, también pueden ser especificados directamente entre el cliente y proveedor.

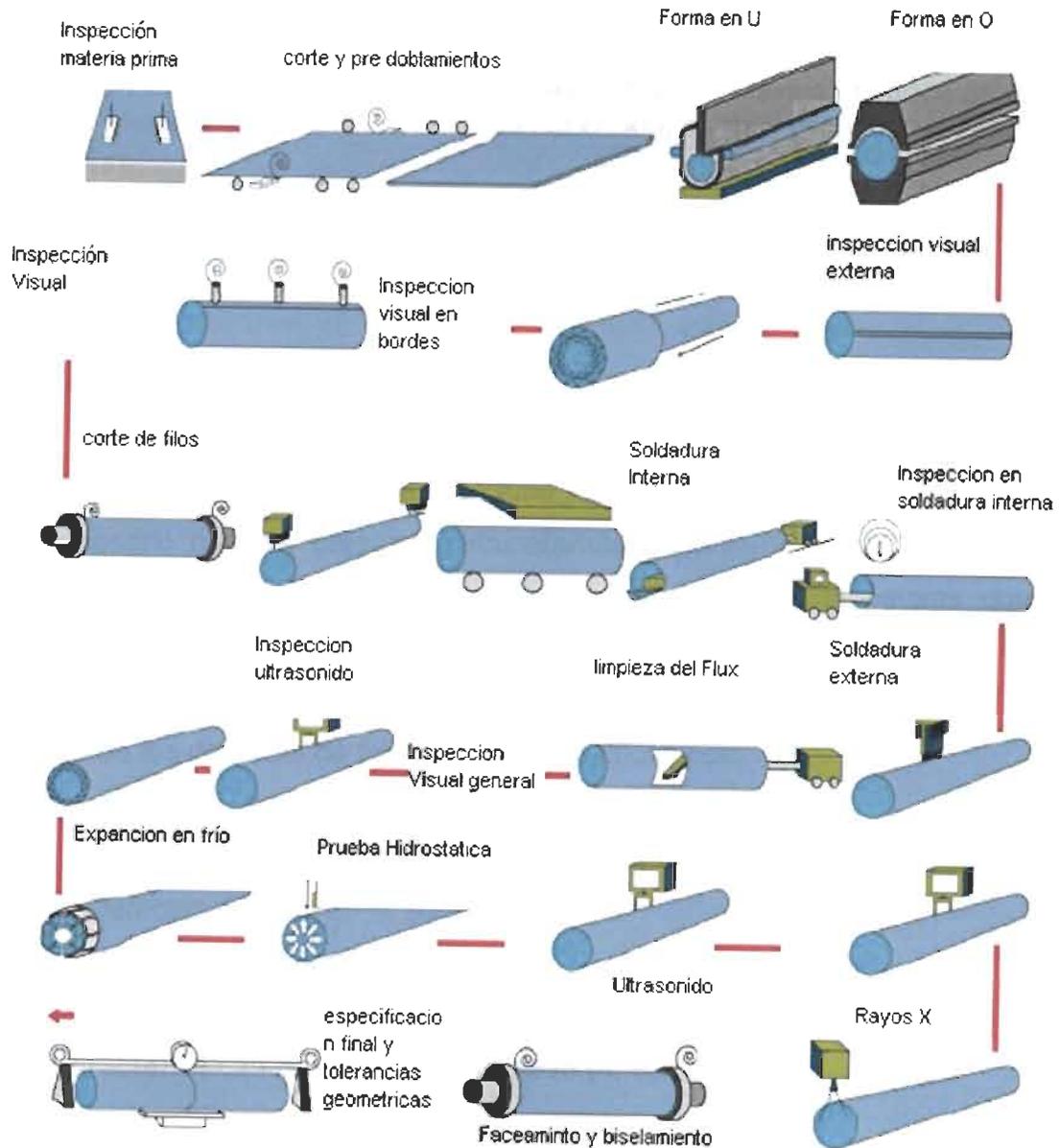
Los tubos se clasifican como API, y debe cumplir los requisitos de propiedades mecánicas, composición química, dimensiones, peso, etc. La propiedad que determina el grado del tubo es el límite de elasticidad en Ksi, puede ser clasificado como de grado A25, A, B y X. Grados A25 y X son seguido de dos dígitos que determinan la resistencia mínima especificada (SMYS – Especificación mínima de límite elástico). Los grados X cubiertos por la norma API 5L son: X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80 y grados intermedios [3].

### **2.3 Proceso de fabricación de tubos API [4, 7].**

Los tubos utilizados en líneas de productos se fabrican según la norma API. Actualmente hay varios procesos industriales para la producción de tubos, que se pueden fabricar sin material de aporte, es decir, son tubos sin costuras, resultando en tubos sin los cordones de soldadura a lo largo de la longitud, y pueden ser fabricados con los pasos del equipo de soldadura, la tubería con costura (soldados). Tubos producidos a partir de las placas a menudo utilizan el proceso de fabricación llamada UOE, ilustrado en la Figura 1. El proceso de fabricación inicialmente consiste en la adaptación a la placa fría para una forma de U y secuencialmente, con el formato de la que los lados estén cerrados y una ranura longitudinal se forma. Una etapa posterior es la técnica de las caras a la forma de la O, de manera que no hay cambios en el diámetro durante el proceso de soldadura.

Después de la soldadura por puntos se realiza el proceso final de arco sumergido (SAW soldadura por arco sumergido), primero un pase interno y luego un pase externo. Los ensayos no destructivos se realizan para garantizar

la ausencia de defectos en la soldadura. Poco después, el tubo se somete a una expansión (E) aplicación de una presión interna, cuya finalidad es ajustar las normas de diámetro API 5L. Actualmente se llevan a cabo nuevas aplicaciones de ensayos no destructivos, sobre la unión soldada en forma automática como parte del control de calidad del proceso de manufactura de tubería para la industria petrolera, como se ilustra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Control de calidad de la fabricación de tubería para la industria petrolera por procesos de soldadura SAW y ERW (cortesía Tubacero)

## **2.4 Clasificación tubería de conducción [4, 7]**

Dependiendo de su ubicación costa adentro (en tierra), la tubería de conducción utilizada en la industria petrolera se divide en tres tipos.

Lastrada.- Utilizada para atravesar cuerpos en agua. Este tipo de tubería es recubierta con concreto con el fin de que permanezca de forma estática en el fondo del río, laguna, etc.

Enterrada.- Este tipo de tubería es la más común en México, es poco propensa a daño mecánico, pero, sin el cuidado adecuado, es muy propensa a daños por corrosión.

Expuesta.- Utilizada solo cuando los dos tipos anteriores no pueden llevarse a cabo, es muy propensa a daños mecánicos por factores terceros.

## **2.5 Defectos de fabricación [6 y 7].**

Para poder evaluar la calidad de un tubo y decidir si este necesita ser reparado, es necesario conocer bajo qué circunstancias el sistema puede fallar. Esto lo podemos lograr si conocemos los posibles defectos y las causas que los originan.

Dentro de los defectos de fabricación se clasifican por:

- i. Defectos propios de la placa
- ii. Defectos propios de la soldadura
- iii. Defectos propios de la fabricación

## **2.6 Características del gas transportado [4, 6].**

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 de gas.

### 2.7 Gas dulce [4]

Gas transportado a una presión de operación de menos a 0.1 atm, o transportado a una presión mayor de esta, que:

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

### 2.8 Gas amargo [4]

Gas amargo es gas natural o cualquier otro gas que contiene cantidades significativas de sulfuro del hidrógeno ( $H_2S$ ). Según esta referencia [1], el gas natural generalmente se considera amargo si hay más de 5.7 miligramos de  $H_2S$  por metro cúbico del gas natural, que es equivalente a aproximadamente 4 ppm por el volumen.

Aunque los términos gas dulce y gas amargo se utilizan alternativamente, en sentido estricto, un gas amargo es cualquier gas que contenga el sulfuro del hidrógeno en cantidades significativas, mientras que gas dulce es cualquier gas de el cual contenga cantidades significativas de ácido, algunos gases por ejemplo bióxido de carbono ( $CO_2$ ) o sulfuro del hidrógeno. Así, el bióxido de carbono por sí mismo es un gas dulce.



**Figura 2.2.** Ducto de transportación de hidrocarburo amargo  
(Cortesía PEMEX Sector Reforma, Residencias Samaria-Costero)

### 2.9 Proceso de soldadura por arco sumergido [9]

El proceso de arco sumergido es un proceso que permite soldar a relativamente a altas velocidades y, al mismo tiempo permite la automatización. Este proceso es efectivo para soldar espesores de 5mm, o mas ya que permite una buena penetración y además se protege del medio ambiente mediante la adición simultanea del fundente en forma granular que cubre por completo el arco eléctrico.

Una de sus principales desventajas es que sirve únicamente para soldar en posiciones planas y horizontales (aun en circunferencias) por lo que es impráctico para otras posiciones.

En este proceso se pueden emplear altas corrientes en la soldadura, sin experimentar un arco eléctrico violento. La corriente aplicada en este proceso es normalmente 4 o 5 veces más alta de la que se aplica en otros procesos por ejemplo SMAW, GMAW, FCAW, debido a que el arco eléctrico sumergido en el

fundente permite una fusión suave sin experimentar explosiones como en el caso de los procesos de protección gaseosa.

### *2.9.1 Principios de funcionamiento*

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

En el proceso por arco sumergido, el arco es cubierto por un fundente. Este fundente juega un rol importante en tres puntos principales:

- i. la estabilidad del arco es dependiente del fundente
- ii. las propiedades mecánicas y químicas pueden ser controladas por el fundente.
- iii. La calidad de la soldadura puede ser afectada por el cuidado y el manejo del fundente.

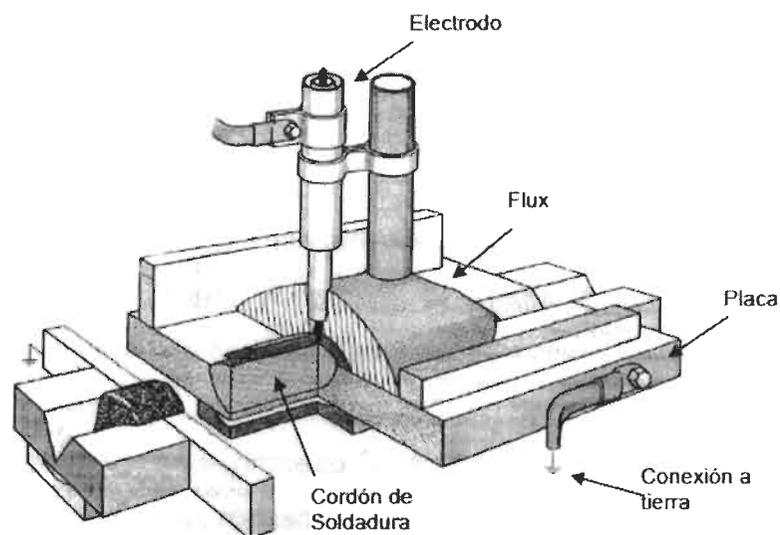
El proceso de arco sumergido es un proceso de producción de soldadura versátil, capaz de realizar soldaduras con corrientes eléctricas por encima de los 2000 Amperios, se puede utilizar corriente directa (DC) o corriente alterna (AC), utilizando cables simples o múltiples o tiras de metal de aporte. Ambas fuentes de energía (DC O AC) pueden ser utilizadas en la misma soldadura y al mismo tiempo.

En todo momento, se alimenta fundente adicional delante del electrodo, a su alrededor y se distribuye continuamente sobre la unión. El calor producido por el arco eléctrico funde progresivamente parte del fundente, el extremo del alambre y los bordes adyacentes del metal base, creando un charco de metal fundido

debajo de una capa de escoria líquida, Figura 2.3. El baño fundido cerca del arco presenta muchas turbulencias y burbujas de gas que ascienden rápidamente a la superficie del charco. El fundente flota sobre el metal derretido y protege por completo de la atmósfera la zona de soldadura.

El manto de fundente que flota sobre el charco de soldadura evita que los gases atmosféricos contaminen el metal de soldadura, y disuelve las impurezas del metal y el electrodo, que entonces flotan sobre el charco. Además, el fundente puede agregar ciertos elementos de aleación al metal de soldadura, o extraerlos de él. Al avanzar la zona de soldadura a lo largo de la unión, el metal de aporte se funde primero y luego el fundente, posteriormente se enfrían y solidifican. Los factores que determinan en donde utilizar el proceso de arco sumergido incluyen:

- i. La composición química y las propiedades mecánicas requeridas del depósito final.
- ii. Espesor del metal base a ser soldado.
- iii. Accesibilidad de la junta.
- iv. Posición en la cual la soldadura debe ser realizada.
- v. Frecuencia o volumen de la soldadura a ser realizada.



**Figura. 2.3.** Vista general del proceso por arco sumergido (SAW) [5]

### 2.9.2. *Métodos de aplicación del proceso SAW*

El proceso por arco sumergido se puede aplicar en tres modos distintos.

- i. Automático
- ii. Semiautomático o Mecanizado
- iii. Soldado por maquina

### 2.9.3. *Método automático*

Este método es llevado a cabo con un equipo que realiza la operación de soldado sin requerir la presencia de un operario para continuamente monitorear y ajustar los controles. Costosos equipos auto – regulables pueden ser justificados a fin de alcanzar altas tasas de producción.

### 2.9.4. *Método semiautomático o mecanizado*

El método semiautomático es hecho por una pistola de soldadura manual, la cual entrega ambos (electrodo y fundente). El electrodo es dirigido por un alimentador de cable. El fundente puede ser suministrado por gravedad montado sobre la pistola o alimentada por presión a través de la manguera. Las características de este método es que utilizado para la guía manual electrodos de diámetro relativamente pequeño y velocidades de desplazamiento moderadas.

### 2.9.5. *Soldado por máquina*

Este método emplea equipos que realizan la operación de soldadura completa. Sin embargo este debe ser monitoreado por un operario de soldadura para posicionar el trabajo inicial y detener la máquina, ajustar los controles y determinar la velocidad de cada soldadura.

### 2.9.6 *Equipo utilizado en el proceso SAW*

El equipo requerido por el proceso de arco sumergido consiste de:

- i. Una fuente de energía

- ii. Cabezales y antorcha
- iii. Equipo de movimiento
- iv. Unidades de recuperación de fundente

#### **i. Fuentes de energía**

La fuente de energía seleccionada para un sistema de arco sumergido juega un rol primordial. Algunos tipos de fuente de energía son adecuados para procesos SAW. Una fuente de energía de corriente directa (DC) puede ser un transformador – rectificador, o motor, o una máquina generadora; la cual proporciona un voltaje constante (VC), corriente constante (CC), o una salida seleccionada VC/CC. Las fuentes de energía de corriente (AC) son generalmente del tipo de transformadores, y pueden proporcionar ambas salidas CC o VC de salida de onda cuadrada. Debido a que el proceso SAW es, generalmente, un proceso, de corriente eléctrica elevada con ciclos de alta duración, una fuente de energía capaz de proporcionar alto amperaje a 100% es recomendada.

#### **ii. Cabezales y antorchas**

En el SAW el cabezal comprime el motor alimentador del cable y el ensamble del rollo alimentador, el ensamble de la antorcha y la punta de contacto y los accesorios para montar y posicionar el cabezal.

Una boquilla para el fundente es generalmente montada en el cabezal para depositar en cualquiera de las dos formas, ligeramente adelante, o concéntrica con el cable de soldado.

Los motores alimentadores de cable son típicamente de alta duración en motores tipo de imán permanente con reductores integrales en la caja de engranes, alimentando cables a velocidades con rango de 20 a 550 pulgadas por minuto.

Los diseños de ensamble de la antorcha son numerosos, pero su propósito es siempre el mismo. El ensamble de la antorcha guía cable a través de la punta de contacto hasta la zona de soldado y también entrega la energía al cable en la punta de contacto.

### **iii. Equipo de movimiento**

El cabezal de movimiento en el proceso SAW es generalmente proporcionado por un carro tipo tractor, una viga de carga o un manipulador. El tractor proporciona un movimiento en uniones de soldadura rectas o ligeramente curvas moviéndose a través de las juntas o viajando en la misma pieza. En unidades sin guías se utilizan ruedas como guías, o algún otro tipo de dispositivo de seguimiento mecánico de la junta. El control del cabezal, los cables de alimentación y el contenedor del fundente son generalmente montados en el tractor.

Los tractores son encontrados de mayor utilidad donde se requiere de una relativa portabilidad, debido a que la pieza de trabajo no pueda ser movida.

Los cartuchos de la viga lateral proporcionan un movimiento lineal únicamente, y son capaces de viajar a velocidades en exceso de 200" por min. Debido a que los sistemas de viga son, generalmente, fijos y que la pieza de trabajo debe ser traída a la estación de soldado, su mayor uso es en taller, el cabezal de soldadura, el cable, el alimentador de fundente, y algunas veces el control, son montados sobre el cartucho.

Los manipuladores son similares a las vigas laterales, estas son fijas y la pieza de trabajo debe ser traída al soldador. Los manipuladores son más versátiles que las vigas ya que son capaces de realizar movimientos lineales en tres ejes. El cabezal, el cable, el alimentador de fundente y frecuentemente el control y el operador viajan sobre el manipulador.

#### iv. Unidades de recuperación de fundente

Las unidades de recuperación son frecuentemente utilizadas para maximizar el uso del fundente y minimizar la limpieza manual. Las unidades de recuperación pueden hacer cualquiera de las siguientes combinaciones:

- a. Remover fundente no fundido y escoria fundida detrás del cabezal de soldadura.
- b. Localizar escoria fundida y otro material de mayor tamaño.
- c. Remover partículas magnéticas.
- d. Remover partículas finas.
- e. Recircular de regreso al contenedor para ser reutilizado.
- f. Calentar el fundente en el contenedor para mantenerlo seco.

#### 2.9.7. Materiales soldados con proceso SAW.

El proceso de arco sumergido es utilizado para fabricar la mayoría de los materiales en uso hoy en día. Desde aceros al carbón hasta exóticas aleaciones con base níquel.

#### **Metal base**

A continuación se enlistan las clasificaciones generales de metales base soldados por este proceso.

- i. Aceros al carbono con porcentajes mayores al 29%
- ii. Aceros baja aleación
- iii. Aceros al cromo molibdeno
- iv. Aceros inoxidable
- v. Aleaciones base níquel

Las composiciones de aleación que pueden ser utilizadas con el proceso de arco sumergido se expanden con la disponibilidad de electrodos apropiados y fundentes. Las combinaciones de electrodos y fundentes son generalmente clasificadas por especificaciones de código. La información de combinaciones

especiales para metales base que son mucho menos utilizados pueden ser obtenidos de los fabricantes de fundente.

### *2.9.8 Variables de operación*

El control de las variables en este proceso es indispensable para obtener tasas de producción elevadas y soldaduras de buena calidad. Estas variables son las siguientes:

- i. Amperaje de soldadura
- ii. Voltaje de soldadura
- iii. Diámetro del electrodo
- iv. Tipo de electrodo
- v. Ancho y espesor de la capa de fundente

Las variables anteriores son las que determinaran el tamaño del cordón, la forma, la profundidad de penetración, y en algunas situaciones efectos metalúrgicos tales como la incidencia a la ruptura, la porosidad y la composición del metal. Ciertas propiedades como la forma del cordón y las fisuras están relacionadas.

#### **i. Amperaje de soldadura**

La corriente de soldadura controla la velocidad con la que el electrodo se funde, la profundidad de la fusión y la cantidad de metal base que se funde. Si la corriente es muy alta para una velocidad dada, la profundidad de fusión o penetración serán muy grandes, la soldadura puede cruzar el espesor y la zona afectada por el calor será también grande. Los costos también se incrementan, debido a la potencia excesiva y al consumo del electrodo. Por otro lado, corrientes muy bajas conducirán a una penetración insuficiente.

La cantidad de metal de soldadura depositado por unidad de tiempo es prácticamente proporcional al amperaje.

La penetración más profunda es generalmente obtenida con la corriente directa con la polaridad en reversa lo que proporciona también la mejor apariencia de superficie, forma del cordón y resistencia a la porosidad.

### **Voltaje de soldadura**

El voltaje determina principalmente la forma de la zona de fusión. A medida que aumenta, el cordón de soldadura se vuelve más plano y más ancho, cuando mayor cantidad de fundente se expone al arco y el consumo se incrementa.

El arco puede romper la protección del fundente que lo cubre y el metal entra en contacto con el aire y el medio ambiente, dando como resultado una gran cantidad de poros cuando el voltaje es excesivamente alto.

El efecto del voltaje de arco es frecuentemente mal entendido, porque afecta la dilución más que la penetración. Incrementando el voltaje del arco se hace más grande el arco por lo que el ancho del cordón se incrementa, el refuerzo se reduce, el consumo del fundente se incrementa y la probabilidad de soplo de arco también se incrementa. Cuando se utilizan fundentes aleados el voltaje de arco es muy importante, porque mas fundente es fundido así que más elementos aleantes entran al metal de la soldadura, así el voltaje de arco puede afectar la composición del metal de la soldadura

### **ii. Diámetro del electrodo**

La corriente requerida para el trabajo inicial el diámetro del electrodo. Para una corriente dada, cambiando el diámetro del electrodo se cambia la densidad de corriente, lo cual significa en la práctica, que un diámetro mayor reduce la penetración.

Los electrodos para arco sumergido producen depósitos de soldadura que coinciden con los metales base de acero al carbono, aceros de aleación especial, aceros inoxidable, aleaciones de níquel y aleaciones especiales para

aplicaciones de recubrimiento. Estos electrodos se suministran como alambre sólido desnudo y como electrodos compuestos con núcleo metálico. Los electrodos de acero suelen estar recubiertos de cobre, excepto los destinados a materiales resistentes a la corrosión o ciertas aplicaciones nucleares.

### **2.10 Criterios de consideración para diseño de líneas de conducción de hidrocarburos [8]**

El sistema de transporte de gas amaro para usos propios deberá estar diseñado de acuerdo a la norma vigente que aplique. La tubería estará fabricada de acuerdo con la norma API 5L con los siguientes requisitos mínimos adicionales:

- I. El fabricante de la tubería debe estar certificado de acuerdo a la Norma ISO 9002, tener autorización para utilizar el monograma API y contar con un historial adecuado en la fabricación de tubería similar.
- II. La tubería debe fabricarse mediante el proceso de doble arco sumergido de inducción a alta frecuencia o ser sin costura.
- III. El acero debe fabricarse por el proceso de aceración al oxígeno, ser del tipo calmado y fabricado con un proceso de limpieza y grano fino.
- IV. Si la tubería es con costura, la placa se debe laminar en forma controlada, con o sin enfriamiento a ritmo acelerado.
- V. La composición del producto debe cumplir con lo siguiente:

Carbono (C)	Vanadio (V)	Azufre (S)
0,18% máx.	0,10% máx.	0,005% máx.

La suma de Nb, V, Ti, Cu, Mo, Cr no debe ser superior a 0,5

El análisis químico del acero deberá cumplir con los rangos de carbono equivalente, el cual no deberá exceder de 0.39%.

**VI.** La resistencia a la deformación medida no debe exceder al valor mínimo en el grado API 5L, en más de 150 Mpa para tubería con costura y 130 Mpa para tubería sin costura.

**VII.** Las dimensiones, pesos y longitud de la tubería con y sin costura, deben estar de acuerdo con API 5L. Los biseles de los extremos deben tener un ángulo de  $30^{\circ} \pm 5$ .

#### *2.10.1 Grados de Resistencia*

El esfuerzo mínimo de ruptura y la resistencia mínima a la tensión especificada para las calidades de tubería de uso frecuente se indica en la Norma API 5L. La relación entre punto de cedencia y resistencia última a la tensión, no debe exceder de 0.90.

#### *2.10.2 Resistencia a la fractura*

Los materiales de la tubería deben cumplir con las propiedades contra impactos especificadas y establecidas por las pruebas de resistencia realizadas a temperaturas apropiadas.

En tubería de diámetro no mayor a 300 mm debe efectuarse una prueba de resistencia a fracturas empleando la prueba de Charpy, que debe satisfacer los valores de energía en el material base suficiente para detener una fractura dúctil, conforme a las disposiciones del Código. La prueba Charpy debe efectuarse conforme a la Norma API 5L SR5 y la prueba de resistencia por impacto conforme a la Norma API SR6.

#### *2.10.3 Pruebas de Dureza*

De cada colada de acero se debe someter un tramo de tubería a prueba de dureza en la soldadura (zona afectada por el calor). Se deben hacer tres mediciones a 2 mm de la superficie interna y externa, así como en el centro de

la pared seccionada del ducto. Ningún valor individual deberá ser superior a 260 HV10. Para tubería sin costura, el valor máximo permisible será de 230 HV10.

#### *2.10.4 Examen no destructivo*

Para la tubería con costura, la placa se debe examinar en cuanto a las laminaciones conforme a la norma ASTM A578. Los extremos del ducto se deberán examinar con ultrasonido a fin de detectar microgrietas en los últimos 50 mm de cada extremo de la tubería.

#### *2.10.5 Examen no destructivo en costuras*

La longitud total de la costura de la tubería debe, inspeccionarse por métodos radiográfico. Tal inspección debe ser para una distancia mínima de 203 mm de cada extremo si el resto de la costura es inspeccionada por métodos ultrasónicos, utilizando equipo, técnicas y Normas aprobadas por un especialista externo acreditado en el nivel III de ASNT, Los criterios de aceptación serán los indicados en el API.

#### *2.10.6 Pruebas de presión*

Cada tubo se debe someter a una prueba hidrostática que genere un esfuerzo tangencial mínimo de 95 % SMYS en la pared del ducto.

#### *2.10.7 Soldabilidad*

La soldabilidad de los materiales de la tubería debe mostrarse mediante pruebas de calificación del procedimiento de soldadura aplicadas a lo largo del tubo. Las pruebas de soldabilidad y procedimientos de soldaduras se realizan conforme a la Norma API 1104.

#### *2.10.8 Accesorios de la Tubería*

##### **Codos**

Se debe de efectuar pruebas de Charpy y de soldabilidad en forma semejante a las pruebas de la tubería. Las pruebas mecánicas deben realizarse después de

la conformación en caliente y el tratamiento térmico definitivo. Se deben hacer pruebas de tensión conforme a la Norma MSS SP 75.

La soldabilidad de codos se debe valorar en muestra de producción a tamaño real, de preferencia por soldadura a paso pleno en una unión del tubo. Los codos que se instalen deben tener un radio mínimo de tres veces el diámetro externo de la tubería. Los codos deberán fabricarse y someterse a prueba conforme a las Normas MSS SP 75 y ANSI B16.9. El espesor de pared de codos y curvas no debe ser menor al espesor de pared de la tubería.

En caso de requerirse curvas estas deben ser fabricadas de tubería sin costura y con radio de curvatura de acuerdo con ASME B31.8.

### **Bridas**

Todas las bridas deben de ser de cara realzada con el cuello soldable, de conformidad con la Norma ASME B16.5. Se fabricarán únicamente de acero calmado, de grano fino, de acuerdo a la Norma API 5L, ASTM o equivalente.

La preparación de la soldadura debe ser maquinada para conformarse a la tubería correspondiente.

La tornillería, tuercas y los empaques deben de cumplir con los requerimientos de ASME B31.8.

### **Válvulas**

Las válvulas deben de ser del tipo bola y deben diseñarse y fabricarse de acuerdo a API RP 6D. Deben de tener extremos bridados y ser de tipo de paso completo. Las válvulas deben ser del tipo de alta integridad con aditamentos de bloqueo doble y purga. Deben tener accionamiento de asentamiento mecánico positivo, con sellos de primarios tipo elástico y sellos secundarios tipo metal a metal. Deben ser equipados con una válvula de purga manual en el cuerpo, que

puede ser asegurado con candado, que permita la verificación de la integridad de la válvula en la posición cerrada. Las válvulas deben ser certificadas a prueba de fuegos de conformidad con el API RP 6F.

Deben operarse por un mecanismo de engranes cónicos con vástago extendido de tal forma que la caja de engranes y volante se ubiquen a 1.2 m del nivel del piso terminado. La bola e interiores deben ser de acero al carbón, con recubrimiento de níquel. No se aceptan válvulas de mariposas en sistemas de manejo de gas.

### **Juntas de aislamientos**

Las juntas de aislamiento deben de instalarse al inicio y final del ramal del ducto y deben cumplir con la presión de diseño. Serán de tipo monoblock, sin tornillos y con adaptadores para tubería soldada en cada extremo y aptos para ser soldados a la tubería de línea.

Cada junta debe ser capaz de superar las pruebas de resistencia de doblez y torsión según se requiera. Cada carrete debe contar con un borne para la conexión de cables de prueba de la protección catódica y para equipo desviador de picos.

La soldadura debe realizarse conforme con los requerimientos de API 1104. Al terminar cada junta debe ser sometida a una prueba de aislamiento eléctrico y una prueba hidrostática.

### **2.11 Tratamientos térmicos [3]**

Con la finalidad de liberar los esfuerzos residuales inducidos por el proceso de soldadura, es necesario realizar postratamientos térmicos con lo cual se evita la concentración tanto de esfuerzos como de zonas propicias a corrosión durante el servicio de la tubería de línea.

### *2.11.1 Metalurgia de la soldadura en estado sólido*

En las operaciones de soldadura por fusión, con o sin metal de aporte, las partes soldadas son sometidas a un ciclo térmico que consta de las siguientes etapas:

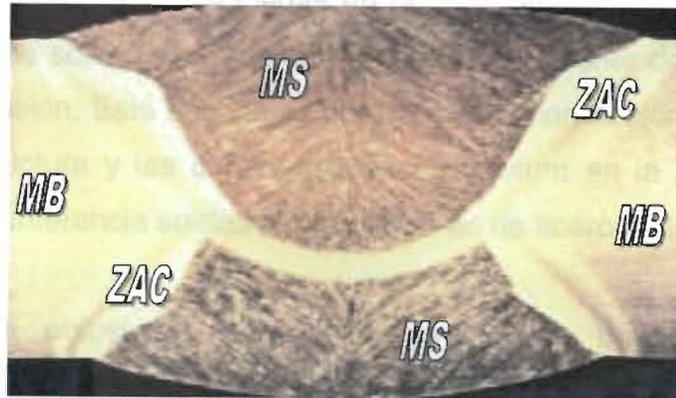
- i. Calentamiento localizado muy rápido de los metales. (metal base y de aporte)
- ii. Formación de una zona o charco de metal fundido.
- iii. Enfriamiento rápido del conjunto, metal base y de soldadura.
- iv. Gradientes de temperatura a lo largo de toda la junta soldada.

Durante las operaciones de soldadura ocurren fenómenos metalúrgicos tales como la fusión, reacciones de gases (nitrógeno, oxígeno e hidrógeno) con el metal líquido, reacciones de fases líquidas no metálicas con el metal fundido, interacciones de fases líquidas y sólidas, solidificación, segregación y reacciones en estado sólido.

Las características del ciclo térmico de soldadura y los fenómenos que ocurren durante ésta influyen en gran medida en la microestructura, propiedades y sanidad de las uniones soldadas.

### *2.11.2 Ciclo térmico de las juntas soldadas.*

Al efectuarse las operaciones de soldadura, las juntas experimentan un ciclo de calentamiento enfriamiento en el que sus diferentes partes se ven sometidas a un amplio intervalo de temperatura, que oscilan desde temperaturas superiores a la fusión, en el metal de soldadura, hasta prácticamente temperatura ambiente, en el metal base, pasando por el intervalo de transformación. La Figura 2.4 muestra las partes de una junta soldada.



**Figura 2.4.** Microestructura de las juntas soldadas, nótese las zonas de la soldadura, Metal base, MB; metal de soldadura MS y zona afectada por el calor, ZAC [3]

La porción del metal base que no se funde durante el proceso de soldadura, pero que es calentada a temperaturas en las que se alteran la microestructura y las propiedades mecánicas del metal base, es llamada zona afectada térmicamente o por el calor (ZAC).

La resistencia mecánica y la tenacidad de la zona afectada por el calor depende del tipo del metal base, del proceso y el procedimiento de soldadura usados. Los metales base en los que más se influye la soldadura son aquellos cuya ZAC se ve sometida a recocido o endurecimiento por ciclos térmicos que involucran altas temperaturas.

Desde el punto de vista del tipo del metal base, el efecto del calor de soldadura sobre la ZAC puede describirse en términos de la siguiente clase de aleación que puede ser soldada. Los metales bases endurecidos por solución sólida (aleación), normalmente presentan pocos problemas en la zona afecta por el calor y si no sufren transformaciones en el estado sólido, el efecto del ciclo térmico es pequeño y las propiedades de la ZAC son afectadas muy poco, aunque hay crecimiento de grano (debido a que son sometidas a temperaturas de recocido) cerca de la línea de fusión, pero esto no afecta significativamente las propiedades mecánicas, si la zona de grano grueso consta de una franja de sólo unos cuantos granos. En años recientes se ha evaluado la resistencia

mecánica de las estructuras soldadas en la zona afectada por el calor (ZAC). En donde la junta soldada en aceros muestra un gradiente de microestructura en la línea de fusión. Este estudio se enfoca con la correlación entre el cambio de la microestructura y las características de fractura en la ZAC tanto en la costura y la circunferencia soldadas para tuberías de acero API 5LX52.

Así también se obtuvieron valores de energía de impacto en la zona circunferencial soldada de la ZAC, obteniendo valores muy bajos en la línea de fusión pero esta se incrementa cuando se aleja de la línea de fusión. En la zona longitudinal soldada de la ZAC no fue posible encontrar valores de energía de impacto Charpy.

Además, se han realizado estudios para evaluar la tenacidad a la fractura de la zona afectada por el calor (ZAC) en la costura soldada por el proceso de soldadura por arco sumergido por sus siglas en inglés SAW (Submerged Arc Welding) para tuberías de alta resistencia a bajas temperaturas ( $-10^{\circ}\text{C}$  y  $-30^{\circ}\text{C}$ ), concluyendo que en la costura soldada de la ZAC se tienen valores muy bajos de tenacidades debido a la anisotropía que presenta esta zona, en la Figura 2.5 se observan las superficies de fractura.

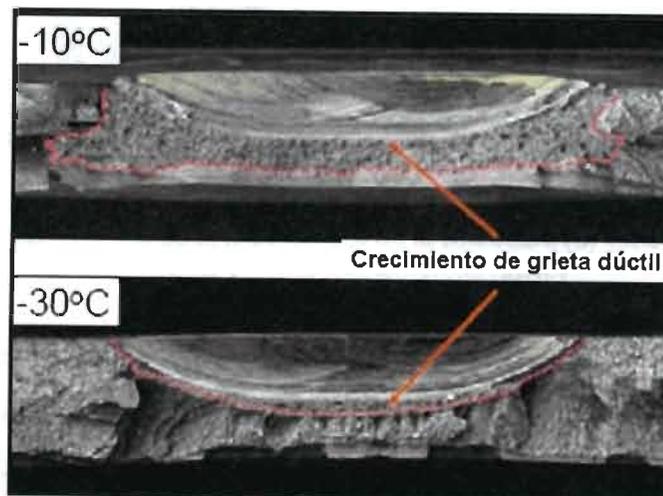
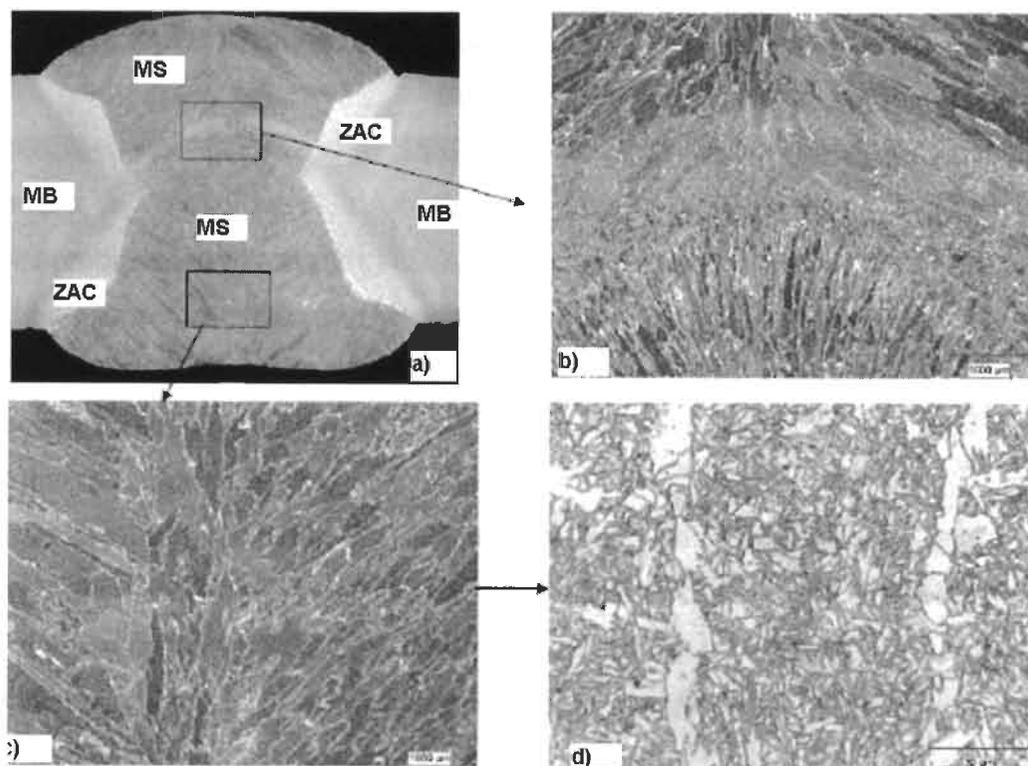


Figura 2.5. Superficie de un acero de alta resistencia. [5]

Así mismo, se ha estudiado la microestructura y las propiedades mecánicas en uniones soldadas circunferenciales por el proceso de gas arco metálico por sus siglas en inglés GMAW (Gas Metal Arc Welding) para aceros tubería de diferentes grados. En la Figura 2.6 se observan las microestructuras típicas de doble bisel (a), con las diferentes zonas de la unión (metal base, metal de soldadura y zona afectada por el calor ), un acercamiento a la línea central de la soldadura (b), y los granos columnares dendríticos (c y d).



**Figura 2.6.** Microestructura típica de una junta doble soldada de un acero API 5L X52 (a, b). Nótese los granos columnares de la línea central de la soldadura (a) y los granos equiaxiales de ferrita y ferrita alotriomórfica (d). [5]

### 2.11.3 Cambios dimensionales

Los cambios de temperatura que ocurren durante el proceso de soldadura son rápidos, localizados y heterogéneos. Las diferentes partes de las juntas soldadas se calientan y enfrían a temperaturas y velocidades diferentes y cada región se expande y contrae a su propia velocidad. Debido a esta falta de uniformidad en la expansión y contracción, se generan esfuerzos residuales en

las juntas, estos esfuerzos pueden ser lo suficientemente severos para producir deformaciones y aún grietas en el metal de soldadura fundido y en la ZAC. Los metales, al soldarse, sufren las tres formas básicas de cambios dimensionales que describen a continuación:

1. Expansión térmica. Casi todos los materiales se expanden al calentarse. La expansión volumétrica se describe comúnmente en términos lineales y son más convenientes para fines de medición. La cantidad de expansión (L) puede calcularse con las siguientes formulas:

$$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$$

$$L_f = L_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

Donde:

$\Delta L$  = cambio de longitud (cm.)

$\alpha$  = coeficiente de expansión térmica (cm/cm ° C<sup>-1</sup>)

$\Delta T$  = incremento de temperatura

$L_0$  = longitud inicial (cm.)

$L_f$  = longitud final (cm.)

Esta ecuación es válida sólo dentro de un límite de temperaturas o mientras no haya cambios de fase o de estado. El grado con que ocurre la expansión y la contracción es una función de la temperatura y se expresa por medio del coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ). Este comportamiento se ilustra en la Figura 2.7.

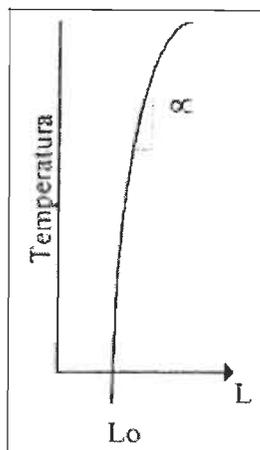
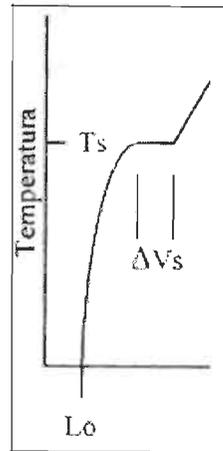


Figura 2.7. Cambio dimensional por expansión térmica [5]

2. Cambios de volumen durante la fusión y solidificación (Figura 2.8). Estos se deben a que durante los cambios de fase del sólido al líquido y viceversa, origina un incremento o una disminución de las distancias entre los átomos.



**Figura 2.8.** Cambios de volumen durante la fusión y solidificación [5]

3. Cambios dimensionales por transformación de fases. Las transformaciones de fase de las aleaciones generalmente están asociadas con cambios de volumen. Estos cambios se deben a que el “empaquetamiento” de los átomos cambia de una estructura cristalina a otra. El hierro a cambiar de la fase  $\gamma$  (austenita, estructura cúbica centrada en las caras) a la fase  $\alpha$  (cúbica centrada en el cuerpo) presenta un aumento de volumen. También hay incremento de volumen (aproximadamente de 4.3%) asociada con la transformación de austenita a martensita.

#### 2.11.4 Esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales se pueden ver incrementados en las zonas de deformaciones físicas, producto de la falla de compensación por omegas a lo largo de la línea.

Las contracciones que ocurren a lo largo de las juntas soldadas, durante la fase de enfriamiento del ciclo térmico de soldadura se desarrollan a diferentes velocidades y varían en magnitud en cada región de las juntas, por lo que originan esfuerzos residuales en estas.

Los esfuerzos residuales son definidos como aquellos que están presentes en los materiales sin que estén sujetos a cargas externas o gradientes térmicos. Estos esfuerzos pueden ser de una magnitud suficiente para provocar, en las partes soldadas, deformación, agrietamiento y disminución de las propiedades mecánicas tales como la resistencia a la tensión, tenacidad y resistencia mecánica a bajas temperaturas.

Los factores que influyen en los esfuerzos residuales son: grado de restricción de las juntas, diferencia de los coeficientes de expansión térmica de los metales soldados, secuencia de soldadura, el calor total aportado y la velocidad de enfriamiento.

En el caso de una unión soldada, en la zona afectada por el calor (ZAC), 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 tensiones térmicas. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tensión cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material.

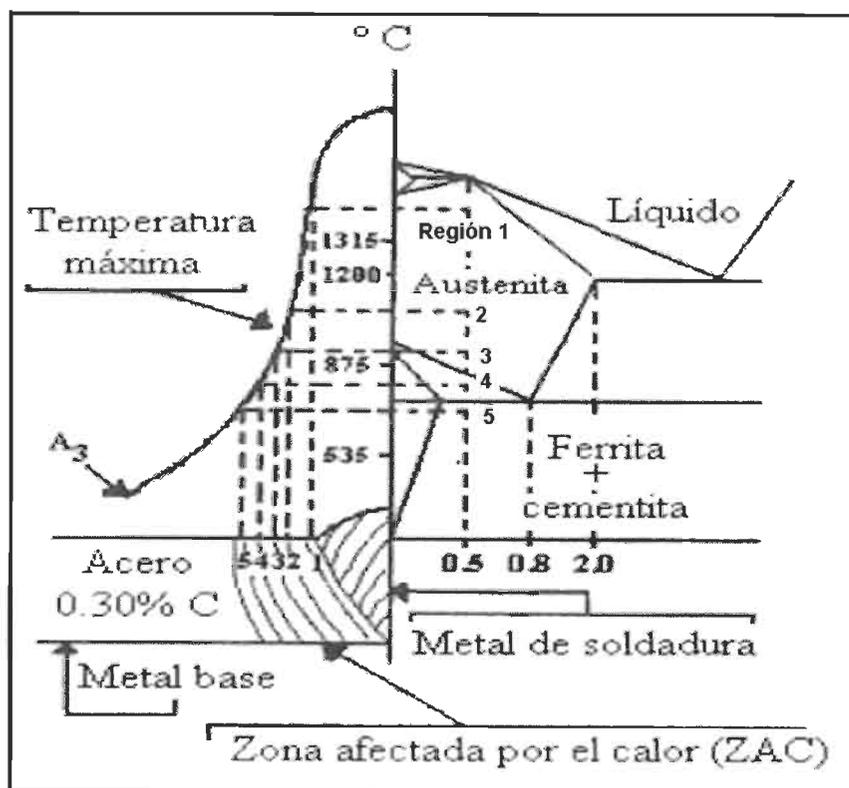
Los esfuerzos residuales pueden eliminarse en proporción considerable mediante el empleo del tratamiento térmico posterior a la soldadura conocido como alivio o relevado de esfuerzos, mismo que, en algunos casos, por requisitos de contrato o de las normas aplicables es obligatorio [13]

## **2.12 Transformaciones de fase del acero durante el proceso de soldadura [9]**

Las regiones de la zona afectada por el calor (ZAC) en los aceros que se endurecen por transformaciones de fase durante la soldadura, así como, su

relación con las temperaturas pico alcanzadas y el diagrama Fe-C, se muestran en la Figura 2.9.

La región 1 de la ZAC de la Figura 2.9, es la más próxima a la línea de fusión y contiene un grano grueso que creció rápidamente debido al calentamiento a temperaturas cercanas a la de fusión; el tamaño de grano grueso aumenta la templabilidad, de manera que esta región puede transformarse rápidamente en martensita durante el enfriamiento.



**Figura 2.9.** Relación aproximada de las temperaturas de las juntas soldadas. Se ilustra la transformación de fases de las regiones de la ZAC de la soldadura con el diagrama Fe-C. [9]

La región 2 se austenitiza, pero la temperatura que alcanza es demasiado baja para producir crecimiento de grano, por lo que su templabilidad no se incrementa significativamente, pero aun puede transformarse en martensita, si la velocidad de enfriamiento es suficientemente rápida o si el contenido de aleación es suficientemente alto.

En la región 3, algunos granos se transforman en austenita y el tamaño de grano es muy fino.

En la región 4 no ocurre transformación austenita, pero los granos de ferrita se ven sometidos a un efecto de revenido por el calor de soldadura. El calor aportado por paso influye en forma directa en la velocidad de enfriamiento, por lo que determina los productos finales de transformación y en el ancho de cada región de la ZAC.

Debido a que la martensita de alto contenido de carbono es dura y frágil, puede crear problemas de alta dureza y agrietamiento en la ZAC. La martensita por sí sola, generalmente no provoca agrietamiento, pero si contiene hidrógeno disuelto o está sometida a esfuerzos residuales altos y por ello es probable la aparición de grietas.

En la Tabla 2.2 se muestran los tratamientos térmicos más usuales de la soldadura

Tabla 2.2. Tratamientos más usuales en soldadura [3]

TRATAMIENTOS USUALES DE SOLDADURA		
ANTES DE LA SOLDADURA	DURANTE LA SOLDADURA	DESPUES DE LA SOLDADURA
<p><b>DESHIDROGENADO</b> "HYDROGEN BAKE OUT"</p> <p>¿POR QUÉ?</p> <p>Los equipos que han estado en presencia de Hidrogeno atómico son susceptibles de fisurarse durante su reparación por soldadura. La causa es la presencia de Hidrogeno atómico en el material base. Este gas, en forma atómica, penetra en el acero causando fisuración, porosidad, empolladuras y pérdida de ductilidad. Con el paso del tiempo, el Hidrogeno atómico difunde en el retículo cristalino del acero recombiniéndose a hidrogeno molecular en espacios vacios tales como exfoliaciones o inclusiones, formando ampollas. Puede quedar algo de hidrogeno en forma atómica anclando dislocaciones y reduciendo la ductilidad. Peor aun, puede producir fisuras en zonas de alta dureza tales como metal de soldadura, ZAC y puntos duros. A este proceso se le denomina Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC).</p> <p>Un caso particular es la presencia de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), que acelera la entrada de Hidrógeno y aumenta la actividad de hidrogeno atómico. El resultado es a veces mal llamado Corrosión Bajo Tensión por ácido sulfhídrico porque en realidad es una forma de HIC.</p> <p>La Asociación de Ingenieros de Corrosión (NACE), norma MR -01-75, Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for oil field equipment, establece que la dureza no debe superar los RC 22.</p> <p>Las temperaturas corrientes de Deshidrogenado no están tan acootadas como las de T.T.P.S. y suelen variar entre 150°C y 450°C. Este Tratamiento permite al Hidrógeno atómico difundir fuera del material.</p>	<p><b>PRECALENTAMIENTO</b> "PREHEAT"</p> <p>¿POR QUÉ?</p> <p>Hay seis razones para precalentar</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El precalentamiento es la principal defensa contra la Fisuración Inducida por Hidrogeno (HIC) permitiendo a este difundir fuera del metal de soldadura.</li> <li>2. Disminuye la velocidad de enfriamiento del metal de soldadura y de la ZAC, el resultado es una microestructura mas dúctil y resistente a la fisuración.</li> <li>3. Disminuye algo las Tensiones Residuales al reducir la diferencia de temperatura entre el Metal de Soldadura y el material base minimizando la contracción.</li> <li>4. Mantiene al acero a una temperatura superior a aquella por debajo de la cual ocurre fractura frágil.</li> <li>5. Compensa las perdidas de calor en secciones gruesas de acero y especialmente en aleaciones de alta conductividad térmica como cobre o aluminio evitando fallas por falta de fusión del Material Base.</li> <li>6. Reduce la porosidad debida a la presencia de humedad</li> </ol>	<p><b>TRATAMIENTO TERMICO POST - SOLDADURA (T.T.P.S.)</b> "POSTWELD HEAT TREATMENT" (P.W.H.T.)</p> <p>¿POR QUÉ?</p> <p>Hay cinco razones para T.T.P.S. (P.W.H.T.)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Disminuye la dureza de la ZAC, metal de soldadura y material base. El resultado es una microestructura mas dúctil y resistente a la fisuración.</li> <li>2) Aumenta la resistencia a la corrosión y a la fisuración por Corrosión bajo Tensión (SCC).</li> <li>3) Al reducir las tensiones residuales aumenta la estabilidad dimensional de estructuras soldadas y mecanizadas.</li> <li>4) Al Reducir las tensiones residuales aumenta la Tenacidad del material, por disminución de la Triaxialidad.</li> <li>5) Al Reducir las tensiones residuales aumenta la Resistencia a la Fatiga</li> </ol> <p><b>POSTCALENTAMIENTO</b></p> <p>Este tipo de T.T.P.S. es realmente una prolongación del precalentamiento y esta dirigido a remover el hidrogeno que pudiese quedar luego de la soldadura. Se suele utilizar en reparaciones cuando el TTPS es impráctico o inseguro para la instalación. Ver National Board I.C.</p>

### 2.12.1 Efectos indeseables del ciclo térmico de la soldadura

#### El aporte calórico durante el proceso de soldadura

Soldar, es llevar los bordes de las partes a ser unidas hasta el punto de fusión adicionándole o no un metal de aporte y luego permitir al conjunto enfriarse hasta temperatura ambiente.

Lo más relevante de este proceso es sin duda el calentamiento localizado seguido de enfriamiento que produce en las piezas soldadas una serie de efectos indeseables.

Las velocidades de calentamiento y enfriamiento son elevadas. La velocidad máxima alcanza los 300°C / seg durante el calentamiento y/o enfriamiento a un nivel de temperatura de 1000°C, reduciéndose al disminuir la temperatura a valores de 6°C / seg a 550°C. La Velocidad de enfriamiento en el centro del cordón de soldadura puede aproximarse con la siguiente fórmula:

$$V_e = 2 p K (T_c - T_o)^2 / H \text{ input.}$$

Ve: Velocidad de enfriamiento en el centro del cordón de soldadura

p: Conductividad térmica del metal (Joule/ m seg. °C)

K acero 0,2%; C 0,6%; Mn 0,028%

K cobre 0,20%

K aluminio 0,12%

To: Temperatura inicial del metal base (T de precalentamiento)

Tc: Temperatura a la cual se calcula la velocidad de enfriamiento

H Input: Heat Input o Calor Aportado (J / mm)

### **Efectos indeseables**

Son esencialmente tres (3)

- i. Generación de Tensiones Residuales y/o distorsión
- ii. Modificación de la Estructura Metalografica
- iii. Absorción de gases por el metal fundido.

#### *2.12.2 Esfuerzos residuales [13, 2]*

Las construcciones soldadas contendrán usualmente Tensiones Residuales del orden de la resistencia a la fluencia paralelas al eje de la Soldadura y una fracción de la misma (dependiendo del grado de embridamiento, espesor, o restricción a la contracción) en las direcciones perpendiculares al cordón. Las

Tensiones Residuales también pueden estar presentes en el material base producto del laminado, rolado u otros Tratamientos Térmicos anteriores.

La mayoría de los Metales al calentarse se dilatan. Si el calentamiento es localizado como ocurre durante la soldadura, la falta de uniformidad de la Temperatura produce dilataciones diferentes en distintos puntos de la pieza en un mismo instante generándose por esa razón tensiones térmicas.

Si estas tensiones alcanzan el límite de fluencia algo que ocurre normalmente en el cordón de soldadura, se produce deformación plástica localizada que luego en el enfriamiento genera tensiones residuales y/o distorsión.

Las tensiones residuales son un sistema de tensiones dentro de la parte soldada que se compensan ellas mismas y pueden existir en ausencia de una carga externa.

Esto significa que si hay en una parte del material tensiones residuales de tracción seguramente en otra parte del mismo habrá tensiones residuales de compresión que mantienen en equilibrio el conjunto.

En una soldadura existen tensiones residuales tanto longitudinales como transversales al cordón, se puede ver en la soldadura de dos chapas planas que las tensiones longitudinales son de tracción en el cordón de soldadura siendo balanceadas por tensiones de compresión en el metal base adyacente.

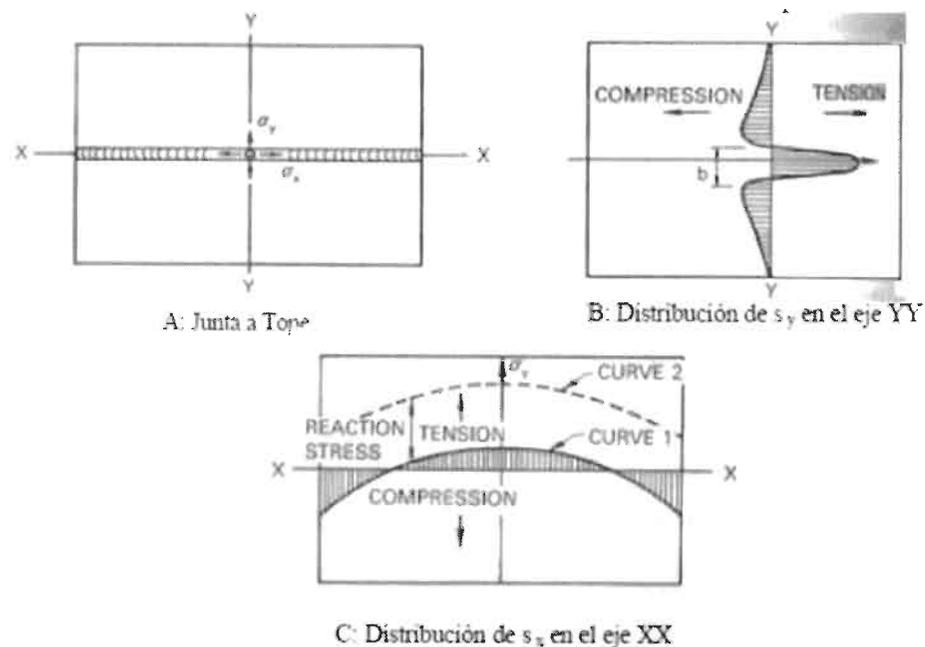
En el caso de tensiones transversales la parte media del cordón está sometida a tensiones de tracción mientras que los extremos están sometidos a compresión. También puede haber tensiones residuales en la dirección del espesor particularmente en el caso de secciones gruesas. Figura 2.10.

Conviene notar que cuando se aplica una carga externa de tracción las tensiones residuales de tracción aumentan mientras que las de compresión

disminuyen. Si continuamos aumentando la carga externa, las tensiones de tracción alcanzan el punto de fluencia, sin superarlo. Con cargas externas mayores lo único que ocurre es un aumento de la zona del material bajo fluencia y la disminución de las tensiones residuales de compresión. Si en este estado se disminuye la carga externa, el pico de tensiones residuales de tracción se hace menos agudo y las tensiones residuales disminuyen.

Si el aumento de la carga externa hace desaparecer a las tensiones residuales de compresión por completo entonces durante la descarga se observará que las tensiones residuales de tracción también habrán desaparecido gracias a que el material alcanzó la fluencia.

Este hecho ha sido reconocido en algunas especificaciones las que requieren que ciertas estructuras sean sobrecargadas hasta la fluencia para eliminar tensiones residuales.



**Figura 2.10.** Distribución Típica de Tensiones Residuales en una Junta a Tope [2]

El efecto de las tensiones residuales en el comportamiento de estructuras soldadas es significativo solo en fenómenos que tienen lugar a bajas tensiones, tales como fatiga, fractura frágil y corrosión bajo tensión.

Las tensiones residuales pueden influir en algún modo de falla, o características en servicio del material, pero no necesariamente producen daño.

Los efectos de las tensiones residuales en el modo de falla se pueden resumir en lo siguiente:

1) Fluencia y Colapso Plástico. El efecto de las Tensiones Residuales es insignificante para estructuras soldadas bajo tensiones superiores a la fluencia.

2) Fractura. A medida que el nivel de las tensiones aplicadas aumenta, el efecto de las tensiones residuales disminuye. Se suman a las tensiones aplicadas. Cuando se combinan pueden causar fluencia localizada haciendo necesaria alguna corrección en el diseño. Son perjudiciales en situaciones de baja tenacidad (ej. debajo de la temperatura de transición para aceros estructurales) pero no necesariamente en situaciones de alta tenacidad.

3) Fatiga. Las tensiones residuales de compresión pueden mejorar la resistencia a la fatiga de estructuras soldadas. Las tensiones residuales de tracción en cambio disminuyen la resistencia a la fatiga ya que elevan la tensión media y la relación entre la tensión mínima y la máxima ( $f_{min}/f_{max}$ ). Su efecto es perjudicial al evitar el cierre de la fisura. Aumentan la relación  $f_{min} / f_{max}$  independientemente de la relación de las tensiones aplicadas. Las tensiones residuales de compresión retardan o anulan el crecimiento de fisuras por fatiga al reducir  $f_{min} / f_{max}$  e inducir el cerramiento de la fisura. Se pueden introducir tensiones de compresión localizadas por calentamiento local, compresión local, martillado o sobrecargas. El efecto de las tensiones residuales tiende a disminuir luego de cargas repetidas.

4) Corrosión bajo Tensión. En un ambiente apropiado, tensiones residuales de tracción pueden ser suficientes para causar corrosión bajo tensión en un material particular con o sin la presencia de tensiones adicionales.

5) Pandeo. Las tensiones residuales reducen significativamente la resistencia al pandeo de columnas fabricadas por soldadura.

6) Creep. Tiene poco o ningún efecto.

7) Fisuración de Soldadura. Las tensiones residuales pueden influir en distintos tipos de fisuración de soldadura, fisuración en caliente durante la solidificación, fisuración por Hidrógeno en zonas duras de la ZAC, desgarre laminar, fisuración por recalentamiento.

8) Distorsión. En estructuras esbeltas, las tensiones residuales aunque pequeñas pueden producir distorsiones importantes durante el posterior mecanizado.

### *2.12.3 Modificación de la estructura metalográfica [14]*

La mayoría de los aceros modernos obtienen sus propiedades mecánicas por intermedio de procesos termomecánicos como forja, laminación, extrusión, fundición o Tratamiento Térmico; los que realizados correctamente proporcionan una microestructura óptima para soportar las sollicitaciones mecánicas.

Cuando a esta estructura se le aplica el ciclo térmico de la Soldadura se forman dos zonas perfectamente diferenciadas, metal fundido con o sin presencia de metal de aporte y zona afectada por el calor (ZAC). Esta zona está afectada estructuralmente sin haber llegado a la fusión.

Estas dos zonas ya no tienen la estructura óptima original del Material Base y por lo tanto puede considerarse a este cambio estructural un efecto indeseable del ciclo térmico de Soldadura. Esto puede controlarse parcialmente por dos medios.

### **2.13. Efectos secundarios por efecto térmico de proceso [14]**

#### *2.13.1 Absorción de gases por la soldadura.*

Uno de los problemas más importantes a tener en cuenta cuando se estudian los efectos indeseables del proceso de Soldadura es la Absorción de gases por el metal fundido. Cualquiera que sea el procedimiento de Fusión, en el acero líquido se fijan cantidades más o menos importantes de los gases del aire (Oxígeno y Nitrógeno) y de los productos de descomposición del revestimiento, principalmente Hidrógeno procedente de la humedad o del agua de cristalización de ciertas sustancias químicas.

El Oxígeno puede presentarse disuelto o formando óxido de hierro o combinado con otros óxidos. En estado disuelto puede influir sobre las propiedades mecánicas de la solución sólida Ferrita; en estado de óxido influye por la presencia de inclusiones en la tenacidad y estricción del metal de soldadura.

El Nitrógeno origina al nitruro de hierro  $Fe_4N$  en forma de agujas que también influye en la tenacidad. Cuando el Nitrógeno se encuentra disuelto produce el envejecimiento del acero con la correspondiente falta de plasticidad.

Pero el verdadero problema y mucho más grave es que durante la Soldadura el acero también absorbe Hidrógeno, lo mismo que absorbe oxígeno y nitrógeno. Las Soldaduras oxiacetilénicas contienen muy poco hidrógeno (2 a 3  $cm^3$  por 100g de metal); la concentración de hidrógeno en las soldaduras por arco es, por el contrario mucho más importante y puede llegar a alcanzar el límite de solubilidad de este gas en el metal líquido (28  $cm^3$  por 100g de metal) según

sea la naturaleza del revestimiento. El hidrógeno es la causa de la formación de microfisuras, sopladuras y es el formador de los Fish-eyes.

### *2.13.2 Deshidrogenado*

El único calentamiento que puede realizarse antes de la Soldadura es el llamado Deshidrogenado (baking, ó Bake - out en Inglés). Tiene como objetivo remover del material a ser soldado el hidrógeno que pudiese haber quedado debido al efecto contaminante, en servicio, de substancias que generan hidrógeno atómico ya que los equipos que han estado en presencia de Hidrógeno atómico son susceptibles de fisurarse durante su reparación por Soldadura. La causa es la presencia de Hidrógeno atómico en el material base, y es imperativo eliminarlo antes de soldar.

Este gas, en forma atómica, penetra en el acero causando Fisuración, porosidad, ampolladuras y pérdida de ductilidad. Con el paso del tiempo, el Hidrógeno atómico difunde en el retículo cristalino del acero recombinándose a hidrogeno molecular en espacios vacíos tales como exfoliaciones o inclusiones, formando excepcionalmente ampollas de hasta un (1) metro de diámetro en chapas relativamente finas (19mm). Puede quedar algo de hidrogeno en forma atómica anclando dislocaciones y reduciendo la ductilidad. Peor aún puede producir fisuras en zonas de alta dureza tales como metal de soldadura, ZAC y puntos duros. A este proceso se le denomina Fisuración Inducida por Hidrógeno (HIC).

La fragilización por Hidrógeno de aceros Ferriticos ocurre solo a bajas Temperaturas, cercanas a la temperatura ambiente. Es posible evitar la Fisuración en microestructuras duras manteniéndolas un tiempo a suficientemente alta Temperatura, ya sea para permitir al hidrogeno difundir fuera del material y/o para que la microestructura se ablande por revenido. Este principio se emplea en soldaduras multipasadas y en TTPS.

Otro problema que puede producir el Hidrógeno es a alta temperatura, se denomina Ataque por hidrogeno (Hydrogen Attack) y ocurre cuando el hidrogeno atómico reacciona con el carbono de los carburos produciendo burbujas de metano. Las consecuencias son, pérdida de resistencia mecánica por descarburación del acero y la generación de sopladuras o poros con Metano. Este problema puede ocurrir en Servicio a altas temperaturas de equipos de procesamiento de petróleo o cuando se deshidrogena a Temperaturas demasiado elevadas (>250°C).

Fuentes usuales de Hidrógeno atómico son:

- i. Reacciones de diversos procesos químicos
- ii. Adición de Hidrógeno con propósitos varios
- iii. Presencia de Hidrógeno atómico en el producto.
- iv. Aplicación de recubrimientos electrolíticos
- v. Procesos de limpieza química de óxidos. (Pickling)
- vi. Protección Catódica
- vii. Eventual descomposición de la Humedad.

Un caso particular es la presencia de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), que acelera la entrada de Hidrógeno y aumenta la actividad de Hidrogeno atómico. El resultado es a veces mal llamado Corrosión Bajo Tensión por ácido sulfhídrico porque en realidad es una forma de HIC.

La Asociación de Ingenieros de Corrosión (NACE), norma MR-01-75, "Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials for oil field equipment", establece que para evitar HIC la dureza tanto del Material Base como el material de Aporte y ZAC no debe superar los RC 22.

### *2.13.3 Fisuración por recalentamiento*

Es un tipo complejo de fisuración que afecta ciertas áreas específicas de la ZAC, que ha sido sujeta a varios ciclos térmicos de soldadura, y se puede observar solo después de un Tratamiento Térmico post Soldadura.

El mecanismo de fisuración pareciera estar asociado a la temperatura y a las tensiones inducidas en borde de grano de la ZAC por precipitados que impiden la deformación plástica durante el Tratamiento Térmico postsoldadura. El Precalentamiento no influye en este tipo de fisuración.

#### *2.13.4 Revenido o Tratamientos térmicos postsoldadura (TTPS).*

Ya se había mencionado que hay dos razones para realizar TTPS, la primera es eliminar o reducir los esfuerzos residuales. La otra razón es el ablandamiento de la ZAC o del mismo metal de aporte ya que el ciclo térmico, produce una modificación de la estructura metalográfica.

Una mayor dureza en la ZAC o MB no es recomendable por la inherente fragilidad de las mismas, aunado a que un material duro no es plástico y la plasticidad es esencialmente el mecanismo de consumo de energía que genera la tenacidad.

Una alta dureza puede ser el factor desencadenante de fisuración inducida por Hidrógeno (HIC). Un caso particular de HIC tiene lugar en presencia de H<sub>2</sub>S (Ácido sulfhídrico), que suele estar presente en la industria del Gas y Petróleo. En este caso se recomienda revenir al acero, a una temperatura de aproximadamente de 600°C durante 1 hora o cualquier otro ciclo de TTPS subcrítico para obtener una dureza inferior a los 22HRC. Este ablandamiento se considera imprescindible para materiales con una resistencia superior a los X70.

Una tercera razón para realizar TTPS de ablandamiento o revenido es que la dureza también puede ser el factor desencadenante de SCC (corrosión bajo Tensión). En este caso se busca que la dureza no sea superior a los HB 200-240, estos valores están especificados para cada acero en particular por

ejemplo en ASME B31.3. Las normas DIN también dan valores de dureza dentro de ese rango, aunque suelen ser más conservadores (HB 200).

Este TTPS se suele realizar en aceros aleados al CrMo (P5, P9 y P91), estos aceros por estar aleados con Cr, son más difíciles de "ablandar" o revenir, ya que justamente son aceros resistentes a las altas temperaturas.

Por lo tanto, para ablandarlos, es necesario utilizar temperaturas superiores (720°C-760°C) a la de los aceros al Carbono. El ablandamiento o revenido es función tanto de la temperatura como del tiempo, o sea a mayor tiempo mayor será el ablandamiento a una temperatura dada.

Conviene tener en cuenta que estos aceros al CrMo tienen una temperatura de cambio alotrópico más alta que la de los aceros al Carbono, esto es conveniente ya que podemos alcanzar temperaturas mayores sin dejar de estar haciendo un Tratamiento Térmico Subcrítico\*.

#### **2.14 Energía calorífica necesaria, durante la soldadura en servicio de tuberías para el transporte de petróleo [12, 15]**

A pesar de la implementación de estrictas regulaciones acerca de: la construcción, explotación, inspección, mantenimiento y reparación de las tuberías que transportan petróleo, estas fallan causando pérdidas humanas y económicas. Las causas de estas fallas son variadas y pueden estar relacionadas a las actividades humanas o inducidas por largos períodos de servicio.

Específicamente sobre las fallas inducidas por el servicio, las causas principales son: pérdida de espesor debido a la corrosión y agrietamiento originado por fragilidad por hidrógeno, corrosión bajo tensión o fatiga. Estudios desarrollados por otros investigadores muestran que entre 1986 y 1999, en los Estados

Unidos, el 12% de las fallas en tuberías estuvieron relacionadas a defectos de soldadura.

Frente a la presencia de daños en tuberías, que pueden conducir a una falla catastrófica, se hace necesario reparar y esta decisión tiene una fuerte justificación económica. Otros estudios revelan que la reparación de un tubo, con un diámetro entre 406,4 mm (16") y 610 mm (24"), puede ahorrar entre el 10% y el 50% del costo de una tubería nueva.

Existen varias alternativas para realizar la reparación de una tubería y cada una tiene aspectos favorables y desfavorables:

1. Pequeños parches metálicos soldados a la superficie exterior del tubo: De acuerdo a investigaciones previas, este método de reparación es ampliamente empleado en la industria del petróleo. La principal limitación que posee es que, el largo del parche no puede exceder la mitad del diámetro del tubo y entonces defectos extensos no pueden ser reparados por este método.

2. Refuerzos metálicos circunferenciales, atornillados alrededor de la superficie exterior del tubo: Con este método se pueden evitar los defectos asociados al proceso de soldadura pero no se puede detener la propagación de grietas longitudinales a través de la pared del tubo.

3. Refuerzos de compositos (llamados también "clock spring"):  
Con estos refuerzos el tubo es protegido de la corrosión externa y el desgaste, pero no se recomienda el uso de estos refuerzos para reparar defectos agudos, como grietas.

4. Refuerzos metálicos circunferenciales, soldados alrededor de la superficie externa del tubo: Este método es catalogado como la opción de reparación más común.

Los refuerzos evitan la propagación de grietas longitudinales y son diseñados para soportar, al menos, la presión de diseño de la tubería. Durante la reparación de una tubería en condiciones de servicio, por este método, es necesario considerar la posible ocurrencia de dos fenómenos, perforaciones y agrietamiento en frío.

Ambos fenómenos (las perforaciones de la pared del tubo y el agrietamiento en frío) son igualmente indeseables y opuestos, esto significa que las acciones que evitan la ocurrencia de uno de ellos, favorecen la ocurrencia del otro. En ambos tienen una pronunciada influencia las variables relacionadas a la energía calorífica que penetra a la pieza y las condiciones de disipación del calor (calor de entrada de la soldadura, temperatura de precalentamiento y el coeficiente de transferencia de calor por convección).

El método de los elementos finitos ha sido ampliamente empleado para predecir la posibilidad de ocurrencia de perforaciones y agrietamiento en frío, durante la soldadura en servicio de tuberías. Hay en la literatura especializada muchos artículos sobre este tema, por ejemplo:

1. Cisilino, obtiene los campos de temperatura en un tubo de acero X 52, el cual transportaba gas natural y fue soldado por proceso de soldadura de arco sumergido (SAW). El modelo de elementos finitos empleado es tridimensional (3D).

El criterio límite establecido para seleccionar el régimen adecuado fue: la temperatura en la superficie interna del tubo no puede exceder 982 °C. En este artículo no fue considerada la posibilidad de ocurrencia de agrietamiento en frío y este aspecto representa una limitación de la solución obtenida Bang, que desarrolló un modelo axisimétrico, bidimensional (2D), de elementos finitos para

simular la soldadura de un refuerzo metálico circunferencial a un tubo de acero X 65.

En los modelos desarrollados fueron considerados dos criterios límites: 982 °C como temperatura máxima en la superficie interna del tubo y 350 HV como la dureza máxima en la zona afectada por el calor (ZAC) para hidrocarburos no amargos y 250 HV como dureza límite para hidrocarburos amargos.

3. Oddy reconoce como una necesidad operacional la necesidad de soldar bifurcaciones en las tuberías de gas, con estas totalmente presurizadas.

También en este artículo se mencionó la necesidad de establecer un calor de entrada de la soldadura lo suficientemente bajo para evitar perforaciones en el tubo pero no tanto que pueda ocurrir agrietamiento en frío.

Fue mencionada la dificultad de encontrar datos que muestren las propiedades de los aceros de tuberías en función de la temperatura.

Durante los últimos años han sido desarrollados algunos softwares con propósitos comerciales y/o académicos. En Internet puede ser encontrado el "Master Code" de Yurioka. Este código permite calcular el tiempo de enfriamiento desde 800 °C hasta 500 °C (conocido como  $t_{8/5}$ ), la máxima dureza en la zona afectada por el calor (ZAC), la temperatura de precalentamiento mínima necesaria, entre otros parámetros. La limitación de este código para aplicarlo al caso de la soldadura en servicio de tuberías es que no es posible considerar el alto valor del coeficiente de transferencia de calor por convección. Las expresiones del Master Code de Yurioka fueron deducidas para condiciones de soldadura donde la conducción es el principal mecanismo de disipación del calor.

Como resultado de la colaboración entre el "Cooperative Research Centre for Welded Structures" de Australia y la "Australian Pipeline Industry", fue

desarrollado un nuevo software para soldadura en servicio. Este software estima condiciones seguras de soldadura, para determinadas condiciones en la tubería, mediante:

1. Estableciendo una indicación de los límites superior e inferior del calor de entrada de la soldadura.
2. Determinando la dureza en la ZAC que resultará de un calor de entrada dado.
3. Determinando el calor de entrada que va a crear un riesgo de perforaciones.

El antes mencionado software es el resultado de una base de datos creada a partir de la solución de un modelo, 3D, de elementos finitos.

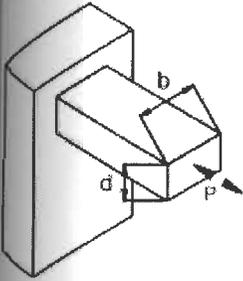
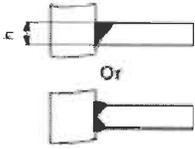
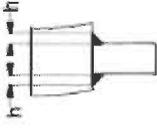
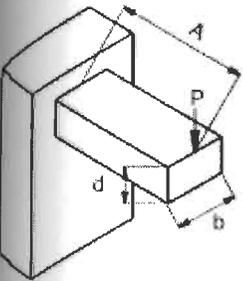
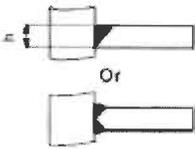
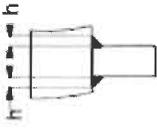
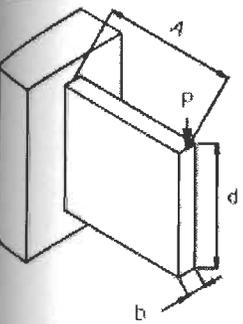
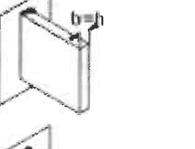
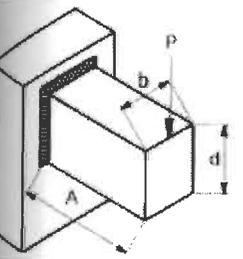
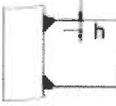
### **2.15 Consideraciones mecánicas para el diseño de uniones soldadas de tuberías por proceso SAW [11]**

A continuación se hará referencia a la orientación general sobre los métodos de cálculo de la fuerza y el tamaño de la soldadura. Las uniones soldadas son sin duda elementos cruciales ya que afectan a la seguridad de los sistemas de diseño. Es importante que las notas y los datos a continuación sólo se utilicen para las evaluaciones de diseño preliminar. El diseño de detalle final deberá ser completado de una manera formal, usando los códigos y las normas y documentos de referencia de calidad.

#### *2.15.1 Las variables relacionadas con las uniones soldadas.*

- 1) La fuerza de los depósitos de materiales de soldadura.
- 2) Tipo de unión y soldadura.
- 3) Tamaño de la soldadura.
- 4) Ubicación de la soldadura en relación con importantes partes unidas.
- 5) Tipos de estrés a que está sometida la soldadura.
- 6) Condiciones en las que la soldadura se lleva a cabo.
- 7) Tipo de equipo utilizado para la soldadura.
- 8) Habilidad del soldador.

**Tabla 2.3.** Tabla de soporte de soldadura objeto de dirigir los esfuerzos de flexión y energía calorífica necesaria durante la soldadura en servicio de tuberías para el transporte de hidrocarburos [11]

Método de Carga	Soldadura	El estrés en soldadura $\sigma_b$ $\tau_s$ tamaño de soldadura (h)	Soldadura	Los esfuerzos de la soldadura $\sigma_b$ $\tau_s$ tamaño de soldadura (h)	Soldadura	Los esfuerzos de la soldadura $\tau_b$ $\tau_s$ tamaño de soldadura (h)
		$\sigma_t = \frac{P}{b \cdot h}$ $h = \frac{P}{b \cdot \sigma_t}$		$\sigma_t = \frac{0,5 \cdot P}{b \cdot h}$ $h = \frac{0,5 \cdot P}{b \cdot \sigma_t}$		$\tau_s = \frac{0,71 \cdot P}{b \cdot h}$ $h = \frac{0,71 \cdot P}{b \cdot \tau_s}$
		$\sigma_b = \frac{6 \cdot P \cdot A}{b \cdot h^2}$ $\tau_s = \frac{P}{b \cdot h}$ $h = \sqrt{\frac{6 \cdot P \cdot A}{b \cdot \sigma_b}}$		$x = d^3 - (d-2h)^3$ $\sigma_b = \frac{6 \cdot P \cdot A \cdot d}{b \cdot x}$ $\tau_s = \frac{P}{2 \cdot b \cdot h}$		$x = (d+2h)^3 - d^3$ $\tau_b = \frac{8,5 \cdot P \cdot A \cdot (d+2h)}{b \cdot x}$ $\tau_s = \frac{0,71 \cdot P}{b \cdot h}$
		$\sigma_b = \frac{6 \cdot P \cdot A}{h \cdot d^2}$ $\tau_s = \frac{P}{d \cdot h}$ $h = \frac{6 \cdot P \cdot A}{\sigma_b \cdot d^2}$		$\sigma_b = \frac{3 \cdot P \cdot A}{h \cdot d^2}$ $\tau_s = \frac{P}{2 \cdot d \cdot h}$ $h = \frac{3 \cdot P \cdot A}{\sigma_b \cdot d^2}$		$\tau_b = \frac{4,24 \cdot P \cdot A}{h \cdot d^2}$ $\tau_s = \frac{0,71 \cdot P}{h \cdot d}$ $h = \frac{2,121 \cdot P \cdot A}{\tau_b \cdot d^2}$
				$x = (b-2h) \cdot (d-2h)^3$ $y = (b-2h) \cdot (d-2h)$ $\sigma_b = \frac{6 \cdot P \cdot A \cdot d}{b \cdot d^3 - x}$ $\tau_s = \frac{P}{(b \cdot d - y)}$		$x = (b+2h) \cdot (d+2h)^3$ $y = (b+2h) \cdot (d+2h)$ $\tau_b = \frac{8,49 \cdot P \cdot A \cdot d}{x - b \cdot d^3}$ $\tau_s = \frac{1,41 \cdot P}{(y - b \cdot d)}$

2.15.2 Degradación de la tenacidad al impacto durante el envejecimiento acelerado de soldadura en acero microaleado

El acero de las tuberías y todos los materiales sufren un proceso de envejecimiento natural que se ve acelerado debido a la exposición prolongada a temperatura de operación (entre 25 y 70 °C) a presiones variables de operación. Estas condiciones de operación originan cambios en la microestructura, propiedades mecánicas (límite elástico, dureza, ductilidad, tenacidad), tipo de fractura, y probabilidad de fallo después de varios años de servicio.

Este proceso se describe por dos factores: el pico del envejecimiento asociado con la máxima resistencia y precipitación de carburos que interactúan con las dislocaciones originando un endurecimiento por precipitación y el sobrevejecimiento relacionado con la disminución en resistencia y engrosamiento de carburos con tiempos largos del envejecimiento.

Existen pocos trabajos relacionados con el envejecimiento en las aleaciones ferrosas, particularmente en la unión soldada de tubería API 5L, para poder entender las causas y efectos del envejecimiento sobre el comportamiento a fractura, degradación de las propiedades mecánicas y microestructura. El acero de baja resistencia JIS-SM490YB (0,17% peso C), utilizado en estructuras soldadas, mostró susceptibilidad al envejecimiento a 250°C durante 1 h, resultando un deterioro en su tenacidad. Este tratamiento es equivalente a 2 años del envejecimiento natural del acero.

Un segundo caso, es el acero microaleado X52 envejecido a 600 °C durante 1 a 9 min, presentando una disminución del 45 % en la energía absorbida Charpy, a 1 min del envejecimiento artificial. Las fracturas Charpy mostraron una fractura mixta tipo frágil y dúctil.

Un tercer caso, es la tubería de acero 17GS que transporto petróleo durante 30 años de servicio, mostrando una disminución del 40 % en la energía Charpy a 25 °C [10]. Algunos estudios sobre acero al carbono indican que el

envejecimiento artificial inducido por tratamiento térmico puede realizarse desde 100 a 350 °C [5 y 6] para acelerar el envejecimiento natural a temperatura de servicio por tiempos prolongados. Ya que la mayoría de la tubería utilizada para el transporte de hidrocarburos se fabrica con acero de baja resistencia y tiene una vida en servicio superior a 20 años, se decidió acelerar los efectos del envejecimiento natural por medio de calentamiento a 250 °C, para estudiar los cambios por tiempos prolongados, producidos por el envejecimiento natural en el comportamiento de fractura de la soldadura, en la unión soldada del acero microaleado.

El propósito fue determinar los efectos del envejecimiento acelerado a 250 °C por diferentes tiempos, sobre la tenacidad y tipo de fractura de la soldadura longitudinal en tubería de acero API 5L X52. Los resultados permitirán establecer las bases metalúrgicas para entender la degradación de las propiedades mecánicas y fractura en la tubería envejecida, naturalmente, durante más de 20 años de servicio.

## DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA

1. La industria petrolera presenta una demanda de Recurso Humano calificado en Tecnologías de la Soldadura Industrial e Ingeniería en Materiales, así como materiales de mayor resistencia contra la corrosión y daños mecánicos y de operación a medida que se incrementan los sistemas de producción del petróleo y sus derivados.
2. Los proveedores de placa y tubería, así como los centros de investigación y desarrollo tecnológico están fortaleciendo la creciente demanda de nuevos materiales pasando de los aceros al carbono grado API 5L X52 convencionales a los grados de tubería de alta resistencia, como los API 5L X80, X100 y X120.
3. El trabajo previo de diseño de uniones en ductos de aceros al carbono para transporte de hidrocarburos, se consideran las variables de Temperatura-Tiempo durante el proceso de fusión de soldadura por arco sumergido (SAW) para el control adecuado de los gradientes de sobreenfriamiento resultando homogeneidad en las zonas de la soldadura.
4. Los procedimientos calificados de los procesos de soldadura por arco, deberán incluir los pre y post tratamientos térmicos con el fin de reducir los esfuerzos residuales y mejorar las propiedades mecánicas de la soldadura. Los tratamientos térmicos deberán ser en las regiones de

temperatura subcrítica, considerando un estricto control del tiempo de empape y la temperatura para homogenizar su microestructura, obteniendo las propiedades mecánicas óptimas de operación.

5. Los esfuerzos residuales (energía atrapada) en las soldaduras por arco, provocan distorsiones, pandeos y deformaciones, propiciando áreas susceptibles a fracturas frágiles, corrosión bajo esfuerzos y fatiga del metal. El especialista en soldadura relacionará las fallas de campo con uniones sin previos tratamientos térmicos o mecánicos que mitigan dichos esfuerzos residuales

El siguiente esquema ilustra las cuatro tópicos de dominio del especialista en tecnología de la soldadura industrial aplicado al campo de construcción, mantenimiento y operación de ductos en la industria petrolera.



TÓPICOS DE DOMINIO DEL ESPECIALISTA EN SOLDADURA APLICADO A LA INDUSTRIA PETROLERA.

# CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis del estado del arte que se muestra en este trabajo, se concluye lo siguiente:

1. El término soldadura se refiere ahora una disciplina científico-tecnológica con aportaciones heurísticas, dejando atrás su nivel de "oficio".
2. Las tecnologías de unión y en específico la soldadura, toman como herramientas, ciencias como la metalurgia, física, química y tecnologías de proceso, tratamientos térmicos, manejo de normativa y administración de proyectos.
3. La formación de recursos humanos, se ha profesionalizado, desde la certificación de soldadores y estudios de ingeniería de la soldadura.
4. El rol de la ingeniería en tecnología de la soldadura industrial es de primordial importancia para el diseño adecuado de la fabricación de tubería de acero al carbono y construcción de líneas de transporte de hidrocarburos, con las propiedades mecánicas, químicas y metalúrgicas suficientes para asegurar el funcionamiento óptimo para el cual se ha diseñado.
5. La clasificación de tubería de acero al carbono para oleogasoductos está regida por las normas API y las particulares NRF de PEMEX.

6. El diseño de uniones mediante las herramientas de simulación por elemento finito y análisis de esfuerzos permite conocer las variables esenciales del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).
7. El conocimiento de la metalurgia de la soldadura implica relacionar las transformaciones de fase en las diferentes regiones de la soldadura, tales como el metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y metal de soldadura (MS) obteniendo uniones más homogéneas y libres de fases frágiles no mayores a 22 HRC de dureza.
8. Los resultados permitirán establecer las bases metalúrgicas para entender la degradación de las propiedades mecánicas y fractura en la tubería envejecida, naturalmente, durante más de 20 años de servicio.

## RECOMENDACIONES

Con el propósito de seguir con el avance en tecnología de la soldadura industrial, en particular en el sector energético, se recomienda:

1. Aplicar tecnología de punta en soldadura, desde la manufactura de tubería, como en el tendido de líneas de conducción y procesos de reparación
2. Profesionalizar no solo a los soldadores y supervisores de la industria del petróleo, además al personal de contratistas, talleres y profesionales independientes que le dan servicio a este sector
3. Incrementar el número de supervisores, jefes de área, gerentes y personal de medio y alto nivel involucrados en la aplicación de la tecnología de la soldadura para la industria del petróleo.
4. Actualizar normativa existente, y generar nueva, en donde sea necesaria, tomando en cuenta los estándares internacionales que apliquen, adecuándolos a las necesidades de la industria Mexicana del petróleo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 NRF-001-Pemex-2000; Tubería De Acero Para Recolección Y Transporte De Hidrocarburos Amargos.
- 2 D. Ángeles Herrera; 2008; Propagación de Grietas por Fatiga en Soldaduras SAW de Tubo de Acero API 5L en Probetas SEN Curvas no Estándar en la Dirección Corta Radial; Tesis de Maestría, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional.
- 3 NRF-030-PEMEX-2009. Diseño, Construcción, Inspección y Mantenimiento de Ductos Terrestres para Transporte y Recolección de Hidrocarburos.
- 4 Félix Ramos Morales, Alejandro Duffus Scott, Manuel Rodríguez Pérez, Eduardo M. Díaz Cedré, Juan A. Pozo Morejón; 2009; Necessary Calorific Energy, During the In-Service Welding of Pipelines for Petroleum Transport; Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14, No. 1, p.047-057.
- 5 Specification for Line Pipe. API Specification 5L Forty-Second Edition, January 2000, Effective Date: July 1, 2000.
- 6 Pipeline Valves, API Specification 6D, Twenty-second Edition January 2002, ISO 14313: 1999, Petroleum and Natural Gas Industries-Pipeline Transportation Systems-Pipeline Valves; Effective Date: July 1, 2002, Proposed National Adoption.
- 7 Welding of Pipelines and Related Facilities, API Standard 1104, Twentieth Edition, November 2005.
- 8 Welding Process Effects in Weldability Testing of Steels, By G. Atkins, D. Thiessen, N. Nissley, and Y. Adonyi, Welding Journal, April 2002.
- 9 B. Vargas-Arista, J.M. Hallen, A. Albiter y C. Ángeles Chávez, Revista de Metalurgia, 44 (6), Septiembre-Octubre, 485-492, 2008, ISSN: 0034-8570, eISSN: 1988-4222, doi: 10.3989/revmetalm.0747.

- 10 J.R. Crolet, The European Federation of Corrosion, No. 13, The Institute of Materials, 1994.
- 11 Ing. Sergio G. Laufgang, Termo Soldex S.A., Tratamiento Térmico de Soldadura, Prueba Hidráulica de Gasoductos, 2004.
- 12 Introduction to Welding Technology Consultant Engineers-Metallurgy and Welding, The Weldnet.
- 13 Marcelo Toledo Valim, Tenacidade a Fratura da Junta Soldada Obtida a Arco submerso de Aço API 5L Grau X-80, PUC Rio, Certificacao Digital Numero 0312459/CB, Rio de Janeiro, Setembro de 2005.
- 14 García Jacomino J.L., Burgos Sola J., Cruz Crespo A., Álvarez Luna M., García Arteaga J., Reducción de esfuerzos residuales en uniones soldadas usando tratamiento con explosivo, Articulo de Investigación/Ingeniería 12-1, 11 de Abril de (2008).
- 15 Sergio Alonso Serna Barquera, Arturo Molina Ocampo, Álvaro Torres Islas, Socorro Valdés Rodríguez, Bernardo F. Campillo Illanes, Formas de Agrietamiento en Tuberías de Acero Microaleado para Servicio Amargo, Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Julio-Septiembre 2009, Vol XII, No 44.
- 16 Jonny Leicer Carabali Lobo, Welding Process in the Engineering, Atlantic International University, Honolulu Hawaii, 9 de Marzo de 2006.
- 17 [http://www.roymech.co.uk/Useful\\_Tables/Form/Weld\\_strength.html](http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Form/Weld_strength.html)30, Weld Stress Calculation.

# LISTA DE TABLAS

Número	Tablas	Página
1	Grados típicos, usos y clases de tubos	7
2	Tratamientos más usuales en soldadura	37
3	Tabla de soporte de soldadura objeto de dirigir los esfuerzos de flexión y energía calorífica necesaria durante la soldadura en servicio de tuberías para el transporte de Hidrocarburos	54

# LISTA DE FIGURAS

Número	Figuras	Página
1	Control de calidad de la fabricación de tubería para la industria petrolera por procesos de soldadura SAW y ERW	9
2	Ducto de transportación de hidrocarburo amargo (Cortesía PEMEX Sector Reforma, Residencia Samaria -Costero)	12
3	Vista General del proceso por arco sumergido (SAW)	15
4	Microestructura de las juntas soldadas	28
5	Superficie de un acero de alta resistencia	30
6	Microestructura típica de una junta doble soldada de un acero API 5L X52	31
7	Cambio dimensional por expansión térmica	32
8	Cambios de volumen durante la fusión y solidificación	33
9	Cambios dimensionales por transformación de fase	36
10	Distribución Típica de Tensiones Residuales en una Junta a Tope	41

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

<b>Nombre</b>	<b>Adrián Enrique Monroy Madrid</b>
<b>Grado a obtener</b>	Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial
<b>Título de Monografía</b>	La tecnología de la Soldadura Industrial: Su papel en el diseño de uniones soldadas para tubería de conducción de hidrocarburos API 5L por el proceso SAW
<b>Títulos obtenidos</b>	Ingeniero en Electrónica en Instrumentación
<b>Universidad</b>	Instituto Tecnológico de Minatitlán
<b>Campo profesional</b>	Supervisión de Mantenimiento a Ductos de Transporte de Hidrocarburos
<b>Experiencia profesional</b>	Encargado del taller de tuberías Departamento de Mantenimiento a ductos Servicios Técnicos, PEP  Supervisor de Mantenimiento a Ductos Área de Mantenimiento a Ductos Coordinación Técnica Operativa, PEP  Supervisor de Mantenimiento a Ductos Coordinación de Mantenimiento a Ductos Gerencia de Transporte y Distribución de Hidrocarburos, PEP
<b>Lugar y fecha de nacimiento</b>	Villahermosa, Tabasco; 05 de Marzo de 1969
<b>Nombre de padres</b>	Enrique Monroy Contreras Evila Madrid Salinas