

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**REPARACIÓN DE DEFECTOS EN DUCTOS EN SERVICIO DE ACERO API
5L X52 PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR MEDIO DE
ENVOLVENTES METÁLICAS**

POR

ING. ENRIQUE HERNÁNDEZ BARTOLO

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



**REPARACIÓN DE DEFECTOS EN DUCTOS EN SERVICIO DE ACERO API
5L X52 PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR MEDIO DE
ENVOLVENTES METÁLICAS**

POR

ING. ENRIQUE HERNÁNDEZ BARTOLO

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 **“REPARACIÓN DE DEFECTOS EN DUCTOS EN SERVICIO DE ACERO API 5L X52 PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR MEDIO DE ENVOLVENTES METÁLICAS”** realizada por el alumno **ENRIQUE HERNÁNDEZ BARTOLO** con número de matrícula **09ES-084**, sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial




MC. Gabriel García Cerecero
Tutor Académico



Ing. Carlos Miguel Madera
Abdala
Tutor en Planta



MC. Víctor Hugo López
Cortez
Asesor



VoBo
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 **ENRIQUE HERNÁNDEZ BARTOLO**, una vez leída y revisada la Monografía titulada **“REPARACIÓN DE DEFECTOS EN DUCTOS EN SERVICIO DE ACERO API 5L X52 PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR MEDIO DE ENVOLVENTES METÁLICAS”** aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 25 días del mes de Junio del 2010.



Dr. Fidel Zapata Gómez
Presidente



Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés
Secretario



MC. Gabriel García
Cerecero
Vocal

ÍNDICE GENERAL

Síntesis		1
Capítulo 1: Introducción		2
1.1 Antecedentes		2
1.2 Objetivos		2
1.2.1 Objetivos Generales		3
1.2.2 Objetivos Específicos		3
1.3 Justificación		3
1.4 Planteamiento del Problema		4
1.5 Alcance		4
Capítulo 2: Estado del Arte		5
2.1 PROCESO DE SOLDADURA DE ARCO METÁLICO CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)		5
2.1.1 Electrodo recubiertos		6
2.1.2 Protección del arco		8
2.1.3 Capacidades y limitaciones del proceso		8
2.1.4 parámetros del proceso de soldadura SMAW		9
2.2 TUBERÍA DE CONDUCCIÓN		13
2.2.1 Tipos de tubería de conducción		13
2.3 MECANISMOS DE DAÑO EN TUBERÍA DE LÍNEA		14
2.3.1 Causas de falla en tubería de línea		14
2.3.2 Causas que originan corrosión externa		15
2.3.3 Causas que originan corrosión interna		18
2.4 REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN		19
2.4.1 Detección de discontinuidades en tuberías- etapa 1		20
2.4.2 Evaluación de defectos –etapa 2		21
2.4.3 Reducciones de presión –etapa 3		22
2.4.4 Reparar y rehabilitar -etapa 4		23
2.5 CRITERIOS DE REPARACIÓN		24

	2.5.1 Tipos de reparación	24
2.6	TIPOS DE CAMISAS Y FABRICACIÓN	25
	2.6.1 Envolverte Soldada	25
	2.6.2 Tipos de camisa de refuerzo metálica	26
	2.6.3 Defectos a reparar	30
2.7	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	31
	2.7.1 Inspección visual	31
	2.7.2 Líquidos penetrantes	32
	2.7.3 Partículas magnéticas	33
	2.7.4 Ultrasonido	34
	2.7.5 Radiografía	35
2.8	INSPECCIÓN INDIRECTA	35
	2.8.1 Vehículo inteligente de inspección interna (equipo instrumentado)	36
	2.8.2 Inspección del tipo de fuga de flujo magnético (MFL)	36
	2.8.3 Inspección del tipo ultrasonido	38
2.9	ANÁLISIS DE INTEGRIDAD	40
	2.9.1 Fundamentos	40
	2.9.2 Deterioro de componentes estructurales	42
	2.9.3 Principios del análisis de Integridad	44
2.10	CALIFICACIÓN DE ANOMALÍAS EN DUCTOS EN FUNCIÓN DE SU SEVERIDAD	46
	2.10.1 Prioridades de acción correctiva	50
Capítulo 3:	Discusión y Análisis de la Bibliografía	52
3.1	INSPECCIÓN ULTRASÓNICA EN DUCTOS EN SERVICIO	52
3.2	METODOLOGÍA RECOMENDADA PARA LA REHABILITACIÓN DE DEFECTOS DETECTADOS EN DUCTOS POR MEDIO DE ENVOLVENTES METÁLICAS	54
Capítulo 4:	Conclusiones	59
	Bibliografía	61
	Listado de Tablas	63
	Listado de Figuras	64
	Resumen Autobiográfico	66

SÍNTESIS

En el presente trabajo, se hace énfasis a los ensayos y pruebas no destructivas comúnmente utilizados para cumplir con el control y aseguramiento de calidad en el proceso de reparación de los defectos existentes en tubería de conducción.

La Tubería de conducción, línea o transporte es aquella que transporta hidrocarburos en una fase o multifases, entre estaciones y/o plantas para su proceso, bombeo, compresión, almacenamiento y distribución.

A través del proceso de control de calidad aplicado se puede garantizar que todas las instalaciones, sistemas, procesos, equipos y componentes mantengan sus condiciones originales de diseño, desde su fabricación, instalación, y operación durante toda su vida útil hasta su desmantelamiento y disposición, de manera confiable y segura.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La Gerencia de Transporte y distribución de Hidrocarburos (GTDH) Sur de PEMEX Exploración y Producción cuenta con una red de ductos para el transporte de hidrocarburos por medio de los cuales se moviliza el 50% de la producción nacional de aceite y gas, por ello es necesario que el transporte no represente ningún riesgo para la población, el medio ambiente y la empresa.

Estos ductos se encuentran operando en ambientes hostiles donde sufren daño por diferentes factores, de igual forma por el paso del tiempo (*degradación de propiedades mecánicas por envejecimiento*), y por cuestiones de falta de infraestructura y/o presupuesto es necesario prolongar su uso por más tiempo.

Por tal motivo las actividades de mantenimiento preventivo y predictivo juegan un papel muy importante y necesario para asegurar la confiabilidad y disponibilidad de los ductos, para prevenir y predecir fallas prematuras.

Por lo tanto es recomendable hacer uso de procedimientos reconocidos y probados, así como personal calificado, y estándares establecidos durante el proceso de reparación de defectos en tubería.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Establecer los requisitos necesarios haciendo uso de una metodología para el mantenimiento y reparación de defectos en los ductos de acero API 5L X52 utilizados para el transporte hidrocarburos en PEMEX Exploración y Producción, para restituir la integridad mecánica mediante la instalación de refuerzos mecánicos “envolventes metálicas soldadas mediante el proceso SMAW”.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Recopilación de información acerca del uso de ensayos no destructivos (END) aplicados en el control de calidad en los procesos de reparación de defectos en ductos.
2. Establecer una metodología de Inspección y control de calidad de defectos, desde su detección, evaluación y reparación.
3. Determinación de las causas de falla más comunes en los ductos en servicio.

1.3 Justificación

El proceso de soldadura de arco manual con electrodo revestido (SMAW) es un método muy común utilizado en la instalación de envolventes metálicas como método de reparación permanente en ductos. Para asegurar la calidad de estos procesos es importante contar con el uso de técnicas de ensayos no destructivos que garanticen la sanidad de las soldaduras al utilizar procedimientos y personal altamente calificado.

Para la GTDH Sur de PEMEX Exploración y Producción es importante que el transporte de hidrocarburos no sea interrumpido, para ello es necesario contar con programas de mantenimiento preventivo y predictivo que se anticipen a las fallas las cuales pueden ocasionar fugas y derrames causados por diferentes

factores como: corrosión exterior, corrosión interior, abolladuras, laminaciones, defectos de fabricación, entre otras.

1.4 Planteamiento del problema

En el proceso de reparación de defectos que ponen en riesgo la integridad mecánica de los ductos no se cuenta con una metodología que considere todos los aspectos a considerar para realizar la actividad con éxito.

Existe una amplia gama de documentos de referencia pero no una metodología adecuada de la aplicación de las técnicas de END, por tal motivo se requiere realizar inspecciones periódicas para verificar que se cumpla con las condiciones de operación dentro de límites aceptables de confiabilidad.

1.5 Alcance

El alcance de este trabajo, es hacer una recopilación de los ensayos y pruebas no destructivas comúnmente utilizadas para cumplir con el control y aseguramiento de calidad en el proceso de reparación de los defectos existentes en tubería de conducción.

Además de establecer una metodología de aplicación para las actividades de rehabilitación de ductos por medio de envolventes metálicas soldadas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 PROCESO DE SOLDADURA DE ARCO METÁLICO CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW) [1]

La soldadura por arco de metal protegido (shielded metal arc welding, SMAW) es un proceso de soldadura en el cual, se produce la coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo recubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

El proceso de soldadura SMAW es uno de los más utilizados a nivel mundial. Aprovecha el calor del arco eléctrico para derretir el metal base y la punta de un electrodo consumible recubierto.

En la Figura 2.1 se ilustra el proceso de soldadura SMAW. El electrodo y el metal base forman parte de un circuito eléctrico conectado a la fuente de poder. El paso de electrones por el circuito produce un arco eléctrico que, por la resistencia que opone al paso de la electricidad el metal, calienta y funde el metal base, el electrodo y su recubrimiento formando un charco de metal fundido. El recubrimiento del electrodo también produce un gas protector y protege el cordón de soldadura del contacto con la atmósfera, humedad y oxidación durante el proceso de aplicación de soldadura.

atmósfera

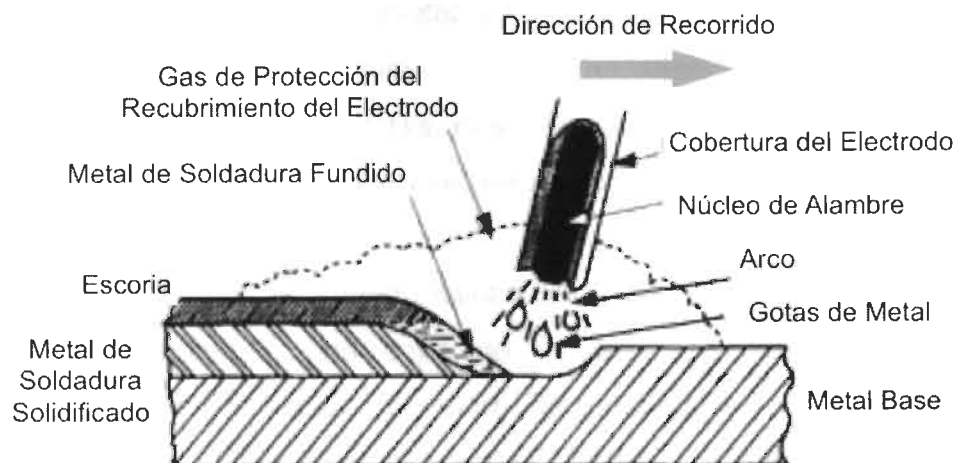


Figura 2.1. Proceso de Soldadura SMAW.[1]

El proceso requiere suficiente corriente eléctrica para fundir tanto el electrodo como una cantidad adecuada del metal base. Se requiere que el espacio entre la punta del electrodo y el metal base o el charco de soldadura sea el adecuado, con el fin de que la soldadura se deposite correctamente y para evitar defectos.

Los tamaños y tipos de electrodos para soldadura por arco de metal protegido definen los requerimientos de voltaje (de 16 a 40 V) y de amperaje (de 20 a 550 A) del arco. La corriente puede ser alterna o continua así como su polaridad, dependiendo del electrodo empleado.

2.1.1 Electrodo Recubiertos

Además de establecer el arco y proporcionar el metal de aporte, para el depósito de la soldadura, el electrodo introduce material fundente sobre el espejo del metal líquido. Dependiendo del electrodo que se use, puede tener una o más de las siguientes funciones:

- El recubrimiento del fundente crea una capa de escoria protectora y gas anti-oxidante que evita la contaminación del metal de aporte derretido por la atmósfera (el aire contiene oxígeno, que puede

reaccionar con el metal y formar inclusiones no metálicas (tipos óxidos no deseados).

- Suministra limpiadores, desoxidantes y fundentes para purificar la soldadura y evitar un crecimiento excesivo de grano en el metal de soldadura.
- Determina las características eléctricas del electrodo.
- Proporciona una capa de escoria que protege al metal de soldadura del aire y mejora las propiedades mecánicas, la forma del cordón y la limpieza superficial de dicho metal.
- Constituye un medio para añadir elementos de aleación que modifiquen las propiedades mecánicas de la soldadura.

El recubrimiento de los electrodos para SMAW se aplica por el método de extrusión o por el de inmersión. La extrusión se usa con mucha frecuencia, en tanto que el proceso de inmersión se usa, principalmente, para los núcleos de varilla colados. En ambos casos, el recubrimiento contiene la mayor parte de los materiales de protección, limpieza y desoxidación. La mayoría de los electrodos SMAW tienen un núcleo de metal sólido, aunque algunos de ellos se fabrican con un núcleo formado por metal en polvo. En el caso de los polvos, su función es producir un depósito de soldadura de aleación.

Además de mejorar las propiedades de la soldadura, el recubrimiento del electrodo puede diseñarse específicamente para soldar con corriente alterna (CA). Con ella, el arco se apaga y reestablece cada vez que se invierte su polaridad. Para que el arco sea estable, es necesario tener un chorro de gas que permanezca ionizado durante la inversión de corriente, de forma que posibilite el reinicio del arco. Este tipo de gases puede producirse a partir de diversos compuestos, incluyendo los de potasio; estos compuestos se añaden en el recubrimiento de la soldadura.

Algunos electrodos para aceros al carbono tienen recubrimientos que contienen hierro en polvo, con el fin de aumentar la velocidad de deposición. Este polvo permite aprovechar más eficientemente la energía del arco.

Las coberturas gruesas con cantidades relativamente grandes de hierro en polvo, incrementan la profundidad del charco en la punta del electrodo, con lo cual ayuda a contener el calor del arco y permite usar la técnica de arrastre para mantener una longitud de arco constante. Este tipo de electrodos reducen la habilidad necesaria para soldar, puesto que la punta del electrodo puede detenerse a lo largo de toda la longitud de la soldadura manteniendo un arco constante.

2.1.2 Protección del Arco

La función principal del recubrimiento del electrodo es la de proteger el arco de la soldadura, por la conversión de una atmósfera gaseosa y la reacción de los elementos químicos con el metal produce la capa de escoria, ésta flota en la superficie del charco del metal de soldadura, por su menor densidad respecto a la del acero.

2.1.3 Capacidades y Limitaciones del Proceso

Ventajas

La soldadura por arco de metal protegido es uno de los procesos más ampliamente utilizados. Las principales ventajas son las siguientes:

- El equipo es relativamente sencillo, económico y portátil.
- El electrodo cubierto proporciona el metal de aporte y el mecanismo para proteger dicho metal y el metal de soldadura contra una oxidación perjudicial durante la soldadura.
- No se requiere protección con gas auxiliar ni un fundente granular.
- El proceso es menos sensible al viento y las corrientes de aire que los procesos de soldadura por arco protegidos con gas.

- Se puede utilizar en áreas de acceso limitado.
- El proceso es adecuado para la mayor parte de los metales y aleaciones de uso común.

Desventajas

La soldadura por arco de metal protegido también tiene algunas limitaciones:

- Los metales de bajo punto de fusión, como el plomo, el estaño y el cinc, y sus aleaciones, no se sueldan con SMAW porque el calor de entrada del arco eléctrico es demasiado alto para ellos.
- El proceso no es apropiado para metales reactivos como el titanio, zirconio, tántalo y niobio porque la protección es insuficiente para evitar que la soldadura se contamine con oxígeno.
- Al encenderse el arco, la corriente fluye a lo largo de todo el electrodo; por lo tanto, la cantidad de corriente que puede aprovecharse está limitada por la resistencia eléctrica del alambre del núcleo.
- Un amperaje excesivo sobrecalienta el electrodo y descompone su recubrimiento.

2.1.4 Parámetros del Proceso de Soldadura SMAW⁵

Diámetro del Electrodo

El diámetro de electrodo es aquel que, usando el amperaje y velocidad de desplazamiento correctos, produce una soldadura del tamaño requerido en el tiempo más corto posible.

En general, se escogen electrodos más grandes para aplicaciones que impliquen materiales más gruesos y para soldar en la posición plana, a fin de aprovechar sus mayores tasas de deposición.

Al soldar en las posiciones horizontal, vertical y cenital, el metal de soldadura fundido tiende a fluir hacia fuera de la unión debido a la fuerza de gravedad. Esta tendencia puede controlarse empleando electrodos pequeños a fin de reducir el tamaño del charco de soldadura.

Al seleccionar el tamaño del electrodo también debe considerarse el diseño de la ranura de la unión. En las ranuras en "V", es frecuente usar electrodos de diámetro pequeño para la pasada inicial, a fin de evitar la perforación y controlar la forma de la franja.

Por último, la experiencia del soldador a menudo influye en la elección del tamaño del electrodo, sobre todo cuando se va a soldar fuera de posición, ya que la habilidad del soldador determina el tamaño del charco de soldadura que puede controlar.

Corriente de Soldadura

La soldadura por arco de metal protegido puede efectuarse con corriente tanto alterna como continua, siempre que se use el electrodo adecuado. El tipo de corriente de soldadura, la polaridad y los constituyentes del recubrimiento del electrodo afectan la rapidez de fusión de todos los electrodos cubiertos.

Para un electrodo determinado, la rapidez de fusión se relaciona directamente con la energía eléctrica suministrada al arco. Parte de esta energía se destina a fundir una porción de metal base, y otra parte sirve para fundir el electrodo. En la Figura 2.2 se muestra la relación entre el amperaje establecido durante el proceso de soldadura y la velocidad de depositación. Es una relación directamente proporcional.

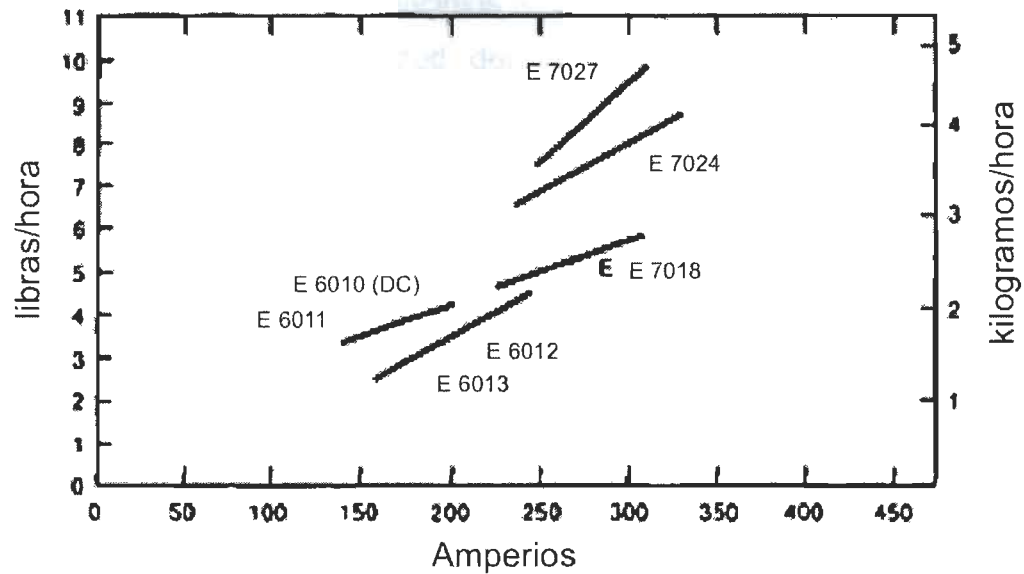


Figura 2.2. Efecto del amperaje sobre la velocidad de deposición. [1]

Longitud del Arco

Es la distancia entre la punta fundida del núcleo del electrodo y la superficie del charco de soldadura. La longitud de arco correcta varía con la clasificación del electrodo, su diámetro y la composición de su recubrimiento; asimismo, varía con el amperaje y la posición de la soldadura. La longitud del arco aumenta al incrementarse el diámetro del electrodo y el amperaje. Por lo general la longitud del arco no debe exceder el diámetro del alambre del núcleo del electrodo, aunque suele ser aun más corta en el caso de electrodos con recubrimiento grueso como los de hierro en polvo o de arrastre.

Si el arco es demasiado corto, puede ser irregular y entrar en cortocircuito durante la transferencia de metal. Por otro lado, si el arco es demasiado largo, carecerá de dirección e intensidad, y tenderá a dispersar el metal fundido que viaja desde el electrodo hasta la soldadura.

El control de la longitud del arco es, en gran medida, cuestión de habilidad del soldador, e implica conocimientos, experiencia, percepción visual y destreza manual. Aunque la longitud del arco varía dentro de ciertos límites al cambiar

las condiciones, hay algunos principios fundamentales que pueden servir como guía para determinar la longitud del arco correcta para un conjunto de condiciones determinado.

Si se suelda con la mano hacia abajo, la punta del electrodo puede arrastrarse suavemente a lo largo de la unión. En este caso, la longitud del arco estará determinada automáticamente por el espesor del recubrimiento y la rapidez de fusión del electrodo; además, será uniforme. En la soldadura vertical o cenital, el soldador debe estimar la longitud del arco. En estos casos, la longitud correcta será aquella que permita al operador controlar el tamaño y el movimiento del charco de soldadura.

En las soldaduras de filete, el arco debe introducirse en la unión a fin de obtener una penetración y tasa de deposición óptimas. Lo mismo se aplica a las pasadas de raíz en las soldaduras de ranura en tuberías.

Velocidad de Recorrido

Es la rapidez con que el electrodo se desplaza a lo largo de la unión. La velocidad de recorrido correcta es aquella que produce una franja de soldadura sin defectos. Son varios los factores que determinan cuál debe ser la velocidad correcta:

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

Al soldar, la velocidad de recorrido debe ajustarse de modo que el arco vaya un poco adelante del charco de soldadura. La velocidad de recorrido también influye en el aporte de calor, y por tanto afecta la microestructura del metal de soldadura y de la zona térmicamente afectada.

2.2 TUBERÍA DE CONDUCCIÓN [2, 14]

Se define en forma general a una tubería, como el conducto formado de tubos por donde se lleva el agua, los gases combustibles, petróleo, entre otros. Y que con base al uso, podemos dividir en cuatro grupos ¹:

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

2.2.1 Tipos de tubería de conducción

Dependiendo su ubicación costa dentro (en tierra), la tubería de conducción utilizada en la industria petroquímica se divide en tres tipos: Ver Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación general de la tubería de conducción o transporte [2]

General	Tipo	Descripción
Tubería de conducción	Lastrada	Utilizada para atravesar cuerpos de 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 puedan llevarse a cabo, es muy propensa a daños mecánicos (daños por terceros)

2.3 MECANISMOS DE DAÑO EN TUBERÍA DE LÍNEA [3, 4]

Las tuberías de conducción se reconocen como el método más seguro de transporte de combustibles comparado con otros medios, razón suficiente para su utilización hoy día y para las siguientes décadas. Ver Figura 2.3.

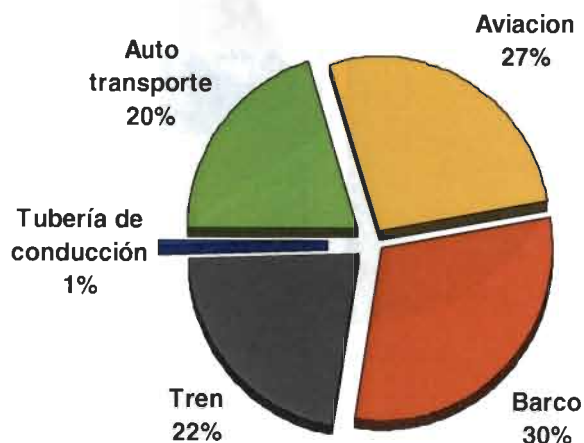


Figura 2.3. Registro de seguridad conforme al número de fallas en tuberías terrestres comparado con otros medios de transporte de combustible [3,4].

2.3.1 Causas de falla en tubería de línea.

Los gasoductos pueden presentar defectos debido a varias razones, por ejemplo, mal diseño de la tubería, errores de operación o corrosión. El origen de una falla, depende de muchos factores, incluyendo el producto que se transporta, edad del ducto, calidad de construcción, diseño, parámetros operativos y el medio ambiente. Ver Figuras 2.4 y 2.5.

En este punto se define que el enfoque de este trabajo va encaminado a solucionar el principal mecanismo de daño (corrosión) que ocurre en el principal tipo de tubería de línea utilizada en México (Tubería enterrada).

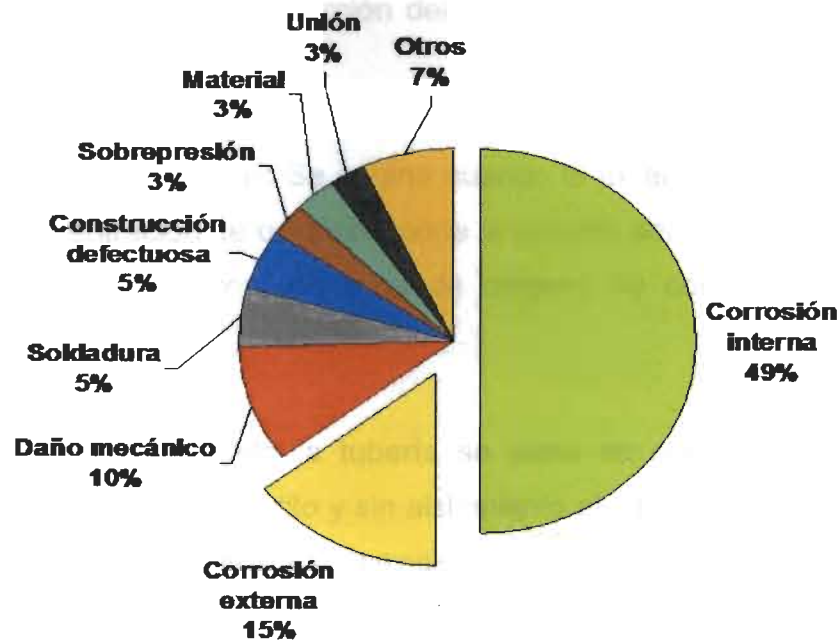


Figura 2.4. Principales causas de falla cuando se transporta gas natural húmedo y amargo [3, 4].

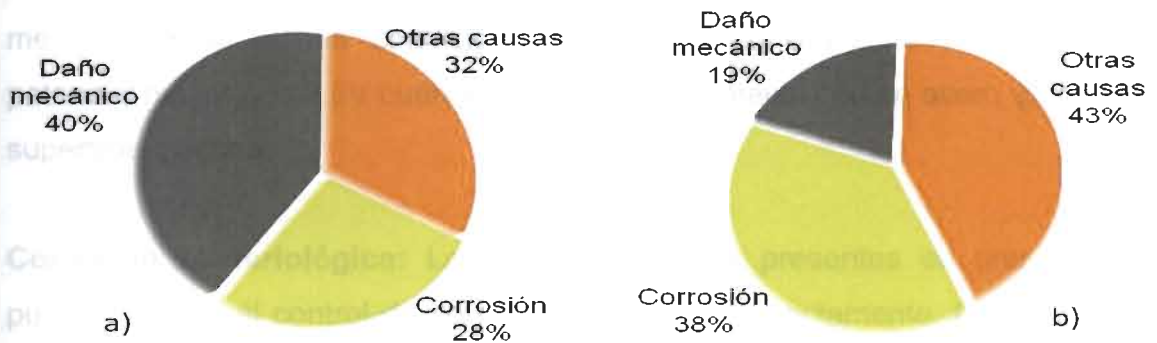


Figura 2.5. Principales causas de falla cuando: a) se transporta gas dulce y b) petróleo [3, 4]

2.3.2 Causas que originan corrosión externa.

A continuación se describen los factores que ocasionan el fenómeno de corrosión externa:

Suelos disímiles: Se origina cuando la tubería atraviesa suelos de composición física y química diferente. Con un electrolito de suelo en particular, el acero del tubo a menudo asumirá un potencial galvánico que es algo

diferente del potencial de la porción del tubo que atraviesa ese suelo en otra sección.

Gradiente de oxigenación: Se origina cuando la tubería atraviesa suelos con diferente concentración de oxígeno donde la porción del tubo que se encuentre en el área de menor concentración de oxígeno se comportara de manera anódica a las otras áreas.

Metales disímiles: Cuando la tubería se pone en contacto directo con un material disímil en un electrolito y sin aislamiento eléctrico entre ellos se genera un potencial que puede provocar corrosión intensa.

Edad del acero: El potencial de una sección particular de acero está determinado en gran parte por la condición de la superficie del acero en contacto con el electrolito. El acero nuevo o viejo pero que haya sido restaurado mecánicamente a una condición de superficie brillante puede exhibir un potencial mayor que 0.5V cuando es puesto en contacto con un acero viejo o de superficie oxidada.

Corrosión bacteriológica: Los microorganismos presentes en una tubería pueden afectar el control de corrosión, directa o indirectamente. Las bacterias anaerobias, que crecen en ausencia de oxígeno, son organismos reductores de sulfatos que consumen hidrógeno y causan pérdida de polarización en la superficie del acero lo cual puede hacer que la protección catódica sea mucho más difícil de lograr.

En la Figura 2.6 se observa una muestra de corrosión preferencial del cordón de soldadura circunferencial por estos microorganismos, el ataque a la corrosión localizada se encontró en forma redonda y alargada.

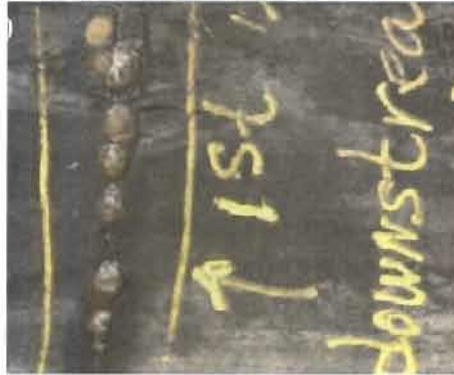


Figura 2.6. Corrosión bacteriológica localizada en el cordón de soldadura circunferencial [15]

Por otra parte existe un tipo de bacteria aerobia (*Thiobacillus Thiooxidans*) que oxida sulfuros a sulfatos, tal como el ácido sulfúrico (H_2SO_4). Debido a su proceso metabólico esta bacteria puede crear concentraciones de H_2SO_4 tan altas como el 10%. Tal ambiente puede ser particularmente riesgoso para el acero. La corrosión por actividad bacteriológica es toda una ciencia que no podremos ver a detalle en esta monografía.

Corrientes parasitas: Estas corrientes ocurren usualmente cuando la corriente directa asociada con un sistema metálico extraño, utiliza al acero como conductor preferencial para retornar a su fuente. Cuando esto ocurre, las corrientes se acoplan al tubo desde tierra y fluyen longitudinalmente sobre el acero hacia la localización o localizaciones donde descargarán al suelo adyacente con el fin de completar su circuito.

El peligro en esencia es formar áreas anódicas donde la corriente descargada genera pérdida de metal. Los aumentos bruscos de corriente son peligrosos para los sistemas de control de corrosión si la densidad de corriente es lo suficientemente alta como para incurrir en condiciones de sobrevoltaje por hidrógeno. La formación de hidrógeno gaseoso sobre imperfecciones de recubrimiento dieléctrico puede originar Agrietamiento Inducido por Hidrógeno en aceros de alta resistencia.

2.3.3 Causas que originan corrosión interna

A continuación se describen los factores que ocasionan el fenómeno de corrosión interna:

H₂S y Agua: Este tipo de corrosión se presenta cuando se transporta un hidrocarburo a una presión de operación mayor de 0,45 MPa (65 psia), que contiene agua en fase líquida o vapor y ácido sulfhídrico (H₂S), este último con una presión parcial de H₂S mayor o igual a 0.1 atm.

Lo cual puede provocar un mecanismo de agrietamiento muy peligroso llamado Agrietamiento Inducido por Hidrogeno (HIC por sus siglas en ingles) si no se toman las medidas necesarias para prevenirlo. Ver Figura 2.7.

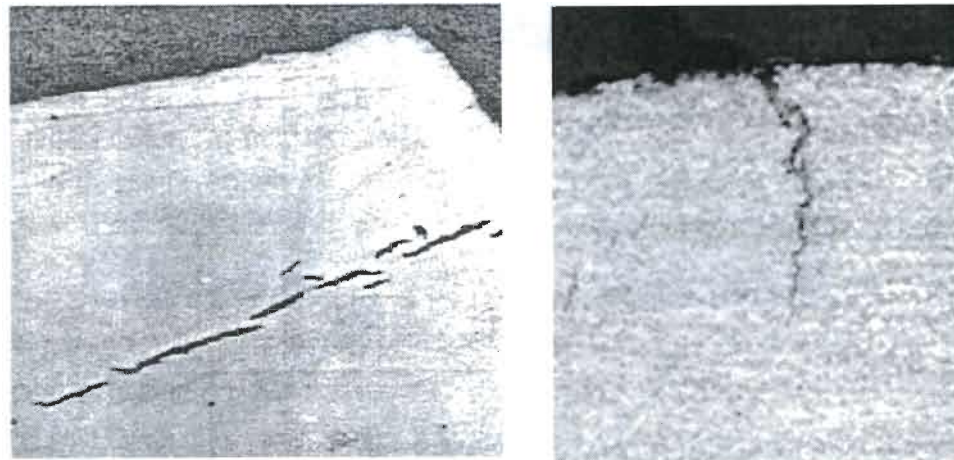


Figura 2.7. Agrietamiento inducido por hidrógeno y corrosión bajo esfuerzo en aceros al carbono de baja aleación [15]

CO₂: Este tipo de corrosión se presenta cuando se transporta un hidrocarburo a una presión de operación mayor de 0,45 MPa (65 psia), que contiene CO₂ con una presión parcial mayor o igual a 0.5 atm. La presencia de este elemento puede acelerar la corrosión por H₂S y es un factor determinante en la formación de Agrietamiento por Corrosión bajo Esfuerzos (SCC por sus siglas en inglés).

REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN[5]

Antes de realizar alguna reparación, los operadores encargados de las líneas de conducción, usualmente inspeccionan las instalaciones antes de aplicar cualquier programa de rehabilitación. Por lo cual es necesario contar con métodos para evaluar la severidad de defectos detectados en un ducto y evitar así reparaciones y/o rehabilitaciones innecesarias. En la Figura 2.8 se muestran las diferentes etapas de un programa de rehabilitación y reparación.

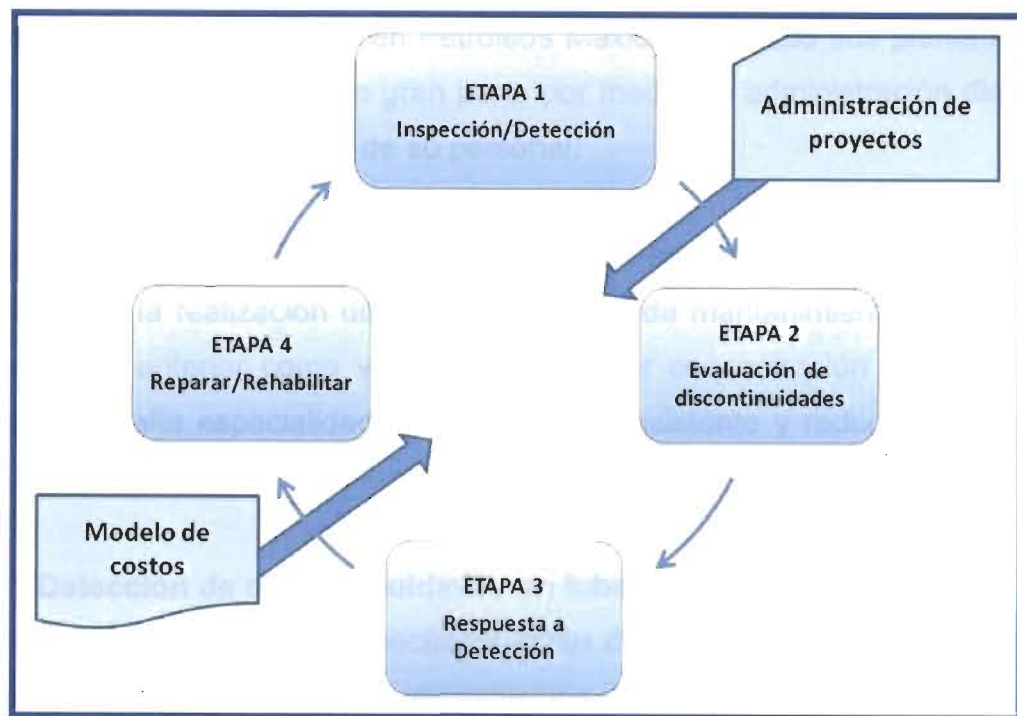


Figura 2.8. Etapas del programa de rehabilitación y reparación [5].

Generalmente para decidir cuándo se debe reparar un tramo de un ducto se consultaba los criterios de la CID-NOR-N-SI-0001 párrafo 6.5.5, ASME B31G, y la norma de diseño ASME B31.8. Sin embargo, estos criterios son demasiado conservadores ya que se basan en valores límite de crecimiento de defectos. Actualmente la decisión de reparar un ducto está en función de la severidad del defecto presente, para un ducto esta decisión está basada en dos criterios .

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

Si el defecto reduce la vida remanente a un periodo menor del esperado para la operación la reparación es necesaria. La decisión en términos de la resistencia residual, es algo más complicado y excede el alcance de esta monografía para ser explicado.

El mantenimiento de ductos en Petróleos Mexicanos desde sus primeros años destacó por ser realizado en gran parte por medio de administración directa, a través de la mano calificada de su personal.

Durante los años 80's, sus administraciones comenzaron a contemplar las ventajas de la realización de algunos trabajos de mantenimiento por contrato, teniendo lo anterior como ventajas una menor concentración de activos por equipos de alta especialidad con empleo inconsistente y reducción de costos por administración.

2.4.1 Detección de discontinuidades en tuberías –etapa 1.

Los métodos de integridad mecánica están disponibles para la evaluación de defectos en tuberías utilizando mecanismos de fractura como su base técnica. Esto quiere decir que cuando algún defecto es detectado su "severidad" puede ser determinada, entiendo severidad como el grado de daño que el defecto puede causar en la integridad de la tubería.

La detección de defectos (Figura 2.8) es el primer escenario de un programa de rehabilitación y reparación. En la Tabla 2.2 se resumen algunos métodos de inspección y mantenimiento de tubería de conducción, y muestra que tipo de defecto/daño se puede detectar.

Tabla 2.2. Métodos de inspección y monitoreo de tubería de conducción[5].

DEFECTO/DAÑO	MÉTODO						
	Patrulla aérea y terrestre	Equipo instrumentado	Calidad producto	Examen de fugas	Examen geotécnico	Inspección de recubrimiento	Prueba hidrostática
Daño mecánico	P	R					R
Corrosión Externa		R				P	R
Corrosión Interna		R	P				R
Fatiga / Agrietamiento		R					R
Recubrimientos						P	
Defectos de materia / construcción		R					R
Movimiento terrestre					R		
Fugas	R	P		R			R
Sabotaje/Robo	P						
P = Método Pre-activo, previene el defecto/daño R = Método Reactivo, detecta el defecto/daño después que ocurre							

Estos métodos se pueden encontrar detallados en la literatura especializada y por ende no se definieron aquí. De cualquier forma es importante enfatizar que la calidad del método utilizado, la confiabilidad y la exactitud de los datos compaginados tendrán un mayor efecto sobre las etapas subsecuentes si, la primera etapa cumple con estos requisitos.

2.4.2. Evaluación de defectos –etapa 2.

Antes de intentar evaluar la severidad de cualquier defecto detectado, es necesario asegurar que la tubería es segura y que existe un plan para resolver completamente el problema y no simplemente evaluar el defecto. Este plan de acción se debe dividir en tres partes.

- a) **Reducir la Presión.** Definir si es necesario reducir la presión a un nivel seguro para llevar a cabo la reparación o rehabilitación.
- b) **Información Crítica.** Establecer la información crítica para la evaluación de ingeniería

- c) **Evaluación de la ubicación.** Evaluar la ubicación del daño para definir los requerimientos de entrada y métodos disponibles de reparación/rehabilitación y su disponibilidad.

2.4.3. Reducciones de presión –etapa 3.

La presión en la tubería debe ser reducida a un nivel de seguridad antes de reparar. Si el tubo está severamente dañado, o el defecto esta fugando, entonces es esencial hacer del tubo y sus alrededores un lugar seguro. A menudo es necesario aplicar inmediatamente reducciones de presión o flujo (si es necesario) para prevenir daño adicional o fuga. Para defectos sin fuga, es práctica usual reducir a 80% el valor de presión al cual fue encontrado el defecto. Por otra parte se puede requerir reducción adicional de presión, dependiendo el tipo de reparación/rehabilitación que se haya planeado. Por ejemplo algunas reparaciones con compuestos epóxicos requieren que la presión se reduzca hasta en un 50%.

Establecimientos de información crítica para evaluación.

La evolución de integridad mecánica, y las especificaciones de posibles métodos de reparación, necesitaran información esencial. Algunos de los datos necesarios son³:

- Información del defecto: basado en la evolución visual, mediciones y ensayos no destructivos,
- Historial defecto/falla,
- Datos del material y soldadura: grado del material, diámetro, espesor de pared, tipo de soldadura, recubrimiento, y propiedades específicas del tubo.
- Características de construcción, diseño y operación: Especificación de diseño, vida de diseño. Presiones de operación actual, cíclica y de prueba hidrostática. Temperatura operacional y de fluido, rango de fuga, etc.
- Configuración de tubería de conducción: localizaciones de defecto, localizaciones de soldadura adyacente, curvas, accesorios, ovalidades.

- Consecuencias de falla (Cualquiera que haya sido reportada o si aún no, posibles consecuencias).

Los defectos reportados pueden ser evaluados utilizando métodos de integridad mecánica. Por otra parte la urgencia del análisis y cualquier reparación resultante dependerá de lo siguiente.

1. Severidad del defecto: localización, profundidad, longitud, orientación.
2. Valor financiero/estratégico de la tubería.
3. Tratamiento al medio ambiente y relaciones publicas
4. Consideraciones regulatorias, legales y de seguridad.
5. Consecuencias durante y después de la falla.

Los aceros para tubería más modernos son dúctiles, y debido a esto los defectos en las líneas de transmisión son generalmente evaluadas utilizando soluciones basadas en los límites de cargas, o colapso plástico.

Los defectos en soldadura longitudinal generalmente fallan por mecanismos de fractura dúctil, por otra parte los defectos en soldadura circunferencial suelen fallar por fractura frágil y pueden requerir cálculos de fractura frágil. Otros defectos de tubería tales como la pérdida de espesor de pared dentro de abolladuras, pueden ser muy reducidos, y pueden exhibir fallas por baja ductilidad. Estos defectos a menudo se evalúan utilizando modelos de mecánica de fractura.

2.4.4. Reparar y rehabilitar –etapa 4.

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

- a) Esmerilado
- b) Soldadura de relleno
- c) Camisa metálica de refuerzo (soldada)
- d) Camisa de refuerzo no metálica
- e) Camisas mecánicas (grapadas, abrazaderas de fábrica o envolventes atornilladas).
- f) Sustitución de carrete
- g) Actualización de la Protección Catódica

2.5. CRITERIOS DE REPARACIÓN [6, 7].

2.5.1 Tipos de reparación.

Si no es posible dejar el ducto fuera de servicio, las reparaciones pueden realizarse mediante la instalación de una envolvente circunferencial (camisa) completa, soldada o atornillada de fábrica, ver Figura 2.9.



Figura 2.9. Instalación de una Envolvente Metálica [6, 7].

Una camisa es un elemento cilíndrico de alta resistencia mecánica y que encierra completamente la zona de dañada de una tubería, actuando como refuerzo mecánico para ayudar al ducto a soportar las expansiones causadas

por la presión de operación o como un contenedor hermético para el caso de un tubo con fuga.

2.6. TIPOS DE CAMISAS Y FABRICACIÓN [8, 13].

2.6.1 Envolverte soldada

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

Una camisa es un elemento cilíndrico de alta resistencia mecánica y que encierra completamente la zona dañada de una tubería, actuando como refuerzo mecánico para ayudar al ducto a soportar las expansiones causadas por la presión de operación o como un contenedor hermético para el caso de un tubo con fuga.

La camisa puede ser fabricada a partir de un tubo de diámetro un poco mayor al del tubo a reparar, cortándose en dirección longitudinal a la mitad, o bien fabricadas por rolado de placa, forja o fundición. Estas se colocan alrededor del tubo dañado, alineándose y uniéndose longitudinalmente, como se muestra en la Figura 2.10. Los códigos para recipientes a presión y sistemas de tuberías requieren que la camisa sea diseñada para soportar como mínimo la presión de diseño del ducto y deben ser de una longitud axial mínima de 4 pulgadas, no habiendo limitante expresa para la longitud máxima.



Figura 2.10. Las camisas metálicas, generalmente se fabrican a partir de 2 medias cañas, con material igual al grado del tubo a reparar o grado superior [13]

2.6.2 Tipos de camisa de refuerzo metálica.

Este método de reparación puede dividirse en dos tipos, los cuales se describen a detalle en las páginas siguientes. Ver Tabla 2.3.

TIPO A: Provee un refuerzo mecánico al tubo, pero no es diseñada para contener la presión del fluido ni fugas.

TIPO B: Se conceptualiza como un recipiente a presión, diseñado para contener la presión de operación del ducto en caso de fuga.

Tabla 2.3. Clasificación del método de reparación por envoltentes [13]

TIPO	CARACTERÍSTICAS	VARIANTE
TIPO A	<u>Sin soldar al tubo</u> (de refuerzo únicamente)	Camisa completa, soldada longitudinalmente (Ver Figura 2.11 a)
		De media caña, sin soldadura (Ver Figura 2.11 b)
		Camisa completa, fijada con tornillos (Ver figura 6.2 c)
TIPO B	<u>Soldada al tubo</u> (contenedor de presión)	Camisa completa, soldada al tubo circunferencial y longitudinalmente (Ver Figura 2.12)
		Camisa completa, soldada al tubo circunferencialmente y longitudinalmente con espacio anular (Ver Figura 2.13)

En la serie de Figuras 2.11 a), b) y c) se muestran las variaciones más comunes del encamisado del Tipo A.

- a) Camisa completa, soldada longitudinalmente,
 - b) Camisa de media caña, sin soldadura,
 - c) Sección de una camisa forjada marca Plidco.
 - d) Camisa Tipo A con sistema de fijación especial para uso submarino(ver Figura 2.9)
- Figura 2.9)

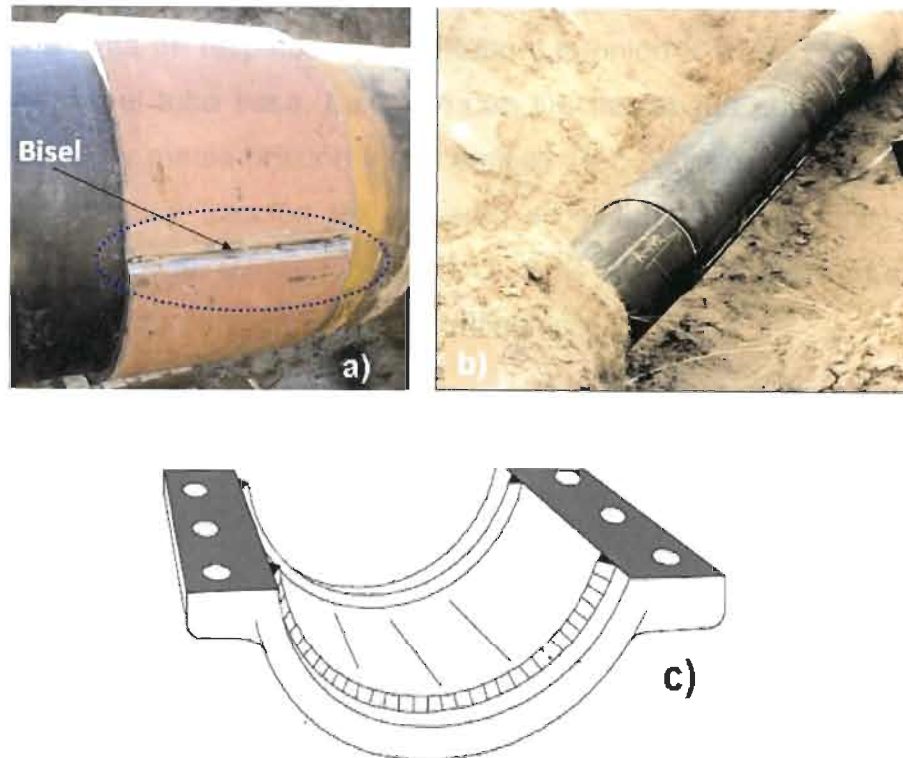


Figura 2.11. Variaciones comunes del encamisado tipo A; a) Camisa completa, soldada longitudinalmente, b) Camisa de media caña, sin soldadura, c) Sección de una camisa forjada marca Plidco [13].

Soldadura longitudinal a tope

Es la más recomendable para camisas Tipo A colocadas en tuberías de alta presión donde el esfuerzo circunferencial es mayor del 50% del esfuerzo de cedencia del material de fabricación del tubo y es prácticamente obligatoria para las camisas Tipo B, ya que al ocurrir la presurización del espacio anular se inducen altos esfuerzos en los filetes y la eficiencia de junta de la tira traslapada

es muy baja. Durante la instalación de una camisa metálica se puede sacar ventaja de la contracción térmica de la soldadura longitudinal al enfriarse y lograr un mejor ajuste de la camisa sobre el tubo. Esto se consigue con una secuencia adecuada de soldadura. Lo más recomendable es tener dos soldadores soldando simultáneamente a cada lado de la camisa. Si se tiene un solo soldador, este puede alternar pases a cada lado de la camisa.

Soldadura circunferencial a tope

En las camisas Tipo A con soldadura circunferencial a tope es necesario colocar una cinta de respaldo entre el tubo y la unión a fin de evitar el posible daño por calor al tubo base. La unión con tira traslapada puede aplicarse en tuberías a baja y media presión y en camisas Tipo A, ya que el esfuerzo en la camisa es solo una fracción del esfuerzo en el tubo, reduciéndose a mayor espesor de la camisa. En las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14 se muestran esquemas de soldaduras circunferenciales y longitudinales.

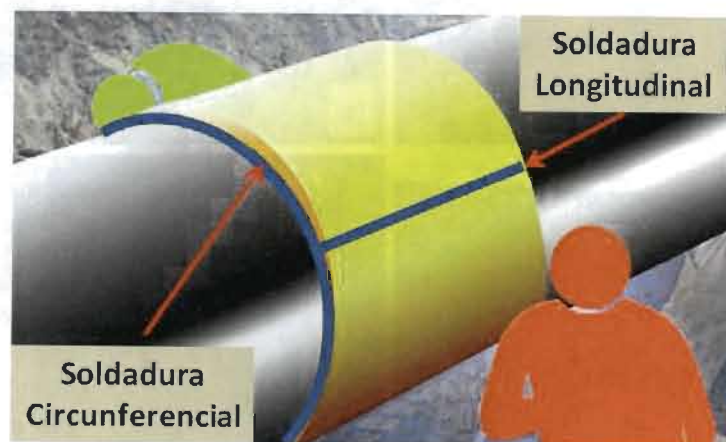


Figura 2.12. Encamisado Completo Tipo B con soldadura circunferencial y soldadura longitudinal sin espacio anular, diseñado como contenedor de presión [13]

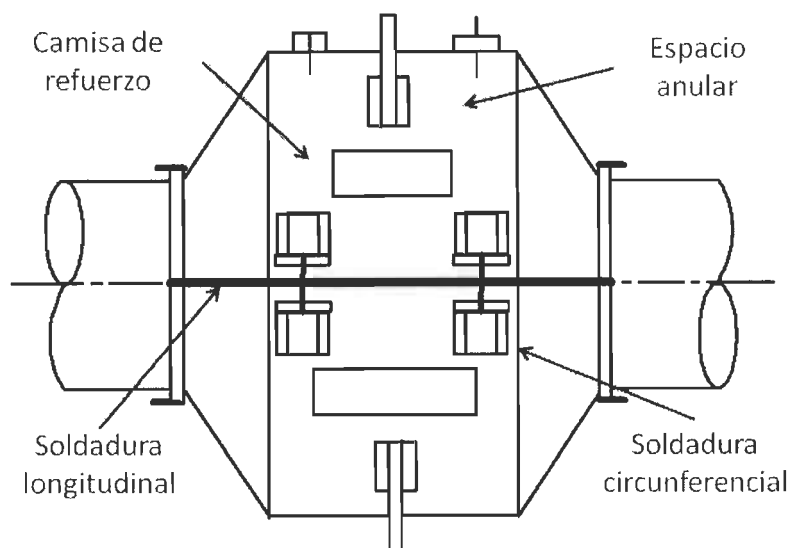


Figura 2.13. Encamisado Completo tipo B con soldadura circular y soldadura longitudinal con espacio anular, diseñado como contenedor de presión [16]

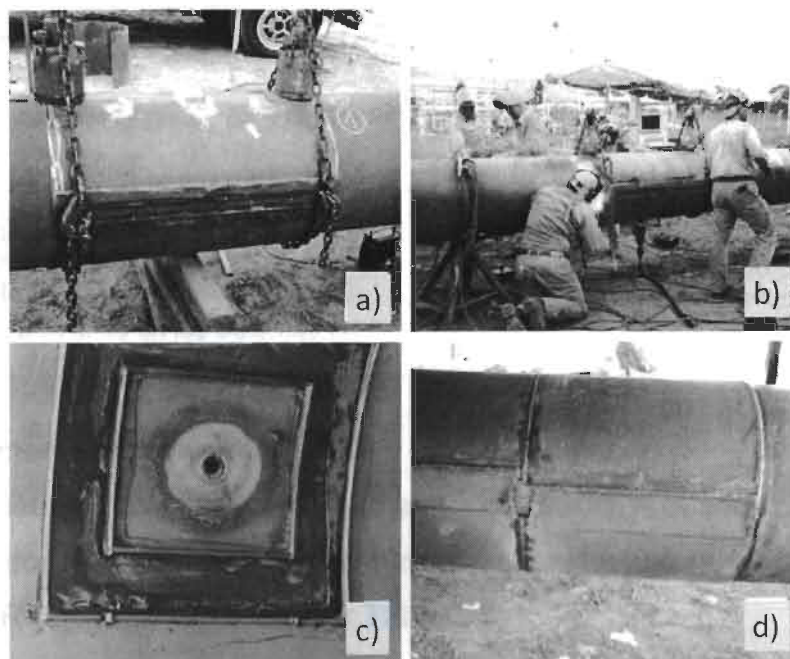


Figura 2.14. Etapas del proceso de encamisado. a) Método de fijación. b) soldadura en un tubo con fuga. c) Doble O'ring utilizado para contener la fuga. d) reforzamiento en tandem, con penetración total en la soldadura circular intermedia [16]

Ventajas y desventajas

En la Tabla 2.4 se describen las ventajas y desventajas de cada una de las envolventes metálicas descritas anteriormente.

Tabla 2.4. Ventajas y desventajas de envoltentes metálicas Tipo A y B [5]

Envoltente	Ventajas	Desventajas
Tipo A	Probado en ductos en servicio	No contiene la fuga, de ahí el no considerarla apta para corrosión interna activa.
	Permanente	Requiere de soldadura, lo que se considera una desventaja para su aplicación bajo el agua.
	Sencilla	Dificultad para inspeccionar las soldaduras.
	Los contratistas están familiarizados con la aplicación de envoltentes soldadas, por muchos años.	Proporcionara control en algunos defectos, pero no previene que el defecto falle. No proporciona refuerzo en dirección axial.
Tipo B	Puede contener la fuga (Ver Figura 4.27)	Requiere de soldadura, lo que se considera una desventaja para su aplicación bajo el agua.
	Probado en ductos en servicio	Dificultad para inspeccionar las soldaduras.
	Instalación definitiva	Las soldaduras de filete finales son con frecuencia fuente de discontinuidades.
	Sencilla	Requiere de soldadura con el ducto, lo cual puede dificultar su aplicación en espesores de tubería delgados, o donde el fluido produce un enfriamiento en el espesor de pared muy rápido
	Los contratistas están familiarizados con la aplicación de envoltentes metálicas soldadas, tanto como han sido utilizadas en los sistemas de ductos por muchos años.	En el caso de fuga el fluido puede corroer el material de la envoltente.

2.6.3. Defectos a reparar.

A continuación se describen los principales defectos que pueden ser reparados por el método de camisas o envoltentes soldadas según la norma interna de PEMEX NFR-030-PEMEX-2009 (ver Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Principales defectos a reparar por el método de envoltentes [5].

TIPO	LIMITES (Para defectos aislados)
Ranuras	Profundidad mayor de 12.5% del espesor nominal.
Abolladuras	Cuando afecten la curvatura del tubo en la soldadura longitudinal o en cualquier soldadura circunferencial
	Las que contengan algún concentrador de esfuerzos tal como arrancadura o ranura Las que excedan una profundidad de 0.25" en un tubo de 12" y menores o 2% del diámetro nominal de tubos mayores de 12"
Quemaduras por arco	Todas
Grietas o fisuras	Inaceptable a menos que se realice un estudio de mecánica de fractura.
Imperfecciones en soldaduras ❖ Penetración inadecuada ❖ Área quemada	25.4 mm (1") de longitud 6.4 mm (1/4") de dimensión máxima o el espesor del material base
Imperfecciones en soldaduras ❖ Inclusiones de escoria ❖ Porosidad o burbujas de gas ❖ Socavación	50.8 mm (2") de longitud o 1.6 mm (1/16") de ancho 1.6 mm (1/16") de dimensión máxima Profundidad de 0.8 mm (1/32") o 12.5% del espesor (el que sea menor) y su longitud no excederá el valor menor entre 50.8 mm (2") o 1/8 de la longitud de soldadura
Corrosión Generalizada	Espesor mínimo requerido de acuerdo a la sección 8.1.6.2 de la norma NRF-030-PEMEX-2005
Corrosión localizada	Espesor mínimo acuerdo a diseño.

2.7 Ensayos no destructivos.

Con la finalidad de localizar y dimensionar los defectos en un ducto para evaluar el riesgo de falla y poder determinar el tipo de reparación, se requiere de inspecciones no destructivas, siendo las recomendadas:

2.7.1. Inspección Visual

Se recomienda la aplicación de este método para detectar y dimensionar defectos en la superficie exterior de la pared del ducto, siempre que ésta se

encuentre al descubierto, ya sea por ser instalación aérea o por la práctica de excavación o inspección submarina, previa remoción del recubrimiento si este es de un grosor tal que impida la observación de la superficie (Figura 2.15). Los defectos detectables por Inspección Visual incluyen: picaduras, abolladuras, entallas, fugas, defectos externos de uniones soldadas, anomalías en soportaría, deformación, pliegues, defectos de recubrimiento, vibración y contacto físico con cuerpos y estructuras ajenas al ducto.



Figura 2.15. Inspección visual a tubería de conducción [5]

2.7.2 Líquidos Penetrantes

Este método permite detectar ubicar y dimensionar discontinuidades superficiales en conexiones de accesorios y juntas soldadas de tuberías, como poros, picaduras y entallas agudas.

La superficie a inspeccionar y las áreas adyacentes, deben limpiarse a metal blanco con chorro de arena y/o herramienta mecánica y posteriormente lavarse con agua para eliminar contaminantes como, aceite, grasas, polvo, oxidación, pintura, etc., ya que estos contaminantes obstruyen o bloquean las grietas; cuando la superficie del área a inspeccionar se encuentra seca se aplica en forma homogénea el líquido penetrante quedando expuesto durante 5 minutos evitando el secado de este sobre la superficie. La aplicación se efectúa con aerosol de acuerdo a los requerimientos del código ASME. Una vez transcurrido el tiempo de penetración indicado se limpia con solvente y/o agua los excedentes para proceder a la aplicación del líquido revelador; el líquido

revelador es un polvo en suspensión que se aplica con aerosol en forma de roció formando una capa delgada y uniforme que permite un contraste de fondo o sangrado con el líquido penetrante.

2.7.3 Partículas Magnéticas

Es similar a líquidos penetrantes en cuanto al tipo de defectos que detecta, con la ventaja de que este método permite detectar también discontinuidades subsuperficiales. Aplica a todos los materiales ferrosos, excepto los aceros austeníticos (acero comercial). Antes del examen es necesaria una buena limpieza del área que va a examinarse, por lo menos dentro de una distancia de 25 mm. El área mencionada debe estar libre de polvo, grasa, aceite, u otra materia extraña y tener una superficie regular, por esto, es común esmerilar o maquinar según se requiera.

Primeramente, el área a examinarse es magnetizada y a continuación se aplican partículas ferromagnéticas finamente divididas (Figura 2.16). Durante el desarrollo normal del examen, estas partículas se acercan a las discontinuidades de la pieza examinada, debido a las fugas del campo magnético en esa zona.

El campo puede proporcionarse con imanes permanentes, electroimanes, bobinas o cables colocados adecuadamente. También puede hacerse con corriente directa o alterna pasando a través del material.



Figura 2.16. Inspección con el método de partículas magnéticas a tubería de conducción [8]

2.7.4 Ultrasonido

Este método permite detectar y dimensionar discontinuidades internas de carácter planar que presenten un área lo suficientemente grande para producir la reflexión de un haz ultrasónico introducido en forma perpendicular (haz recto) u oblicua (haz angular) a la pared del componente. También permite medir el espesor de pared en el componente.

Las ondas ultrasónicas pasan a través de los sólidos y son reflejados al llegar a los límites de estos. En los puntos donde existe una discontinuidad, las ondas no pueden pasar y son reflejadas produciendo un eco. Este eco se muestra en un tubo de rayos catódicos revelando la presencia de los defectos.

Se envían ondas ultrasónicas de muy baja longitud de onda y a muy alta frecuencia la cual puede detectar vacancias, impurezas, cambios de densidad, interfases de material, ver Figura 2.17.



Figura 2.17. Inspección con el método de ultrasonido a tubería de conducción [8]

2.7.5 Radiografía

Este método aprovecha la facilidad con que los rayos X o gama pueden penetrar materiales opacos. Si existe una falla, esta aparece más clara en una película sensible a la radiación, debido a que los rayos penetran menos materiales en estas discontinuidades. Es común en la radiografía el uso de un penetrómetro. El penetrómetro está hecho del mismo material a analizar y contiene algunas características de dimensiones conocidas.

Así se comparan las imágenes radiográficas. También se puede usar un software analizador de imágenes que pueden revelar diferencias muy sutiles de intensidad fotográfica que significan diferencias de espesor.

2.8 INSPECCIÓN INDIRECTA [6, 9, 10]

Existen varias técnicas disponibles para inspeccionar el interior de los ductos; sin embargo cada técnica o herramienta tiene limitaciones en su capacidad de inspección que deben ser observadas. Para ductos donde no es posible inspeccionar directamente ya sea por las condiciones ambientales, tiempo o cantidad de ductos a inspeccionar, se opta por equipos especiales como lo son el equipo instrumentado de inspección interna.

2.8.1 Vehículo Inteligente de Inspección Interna (Equipo Instrumentado)

El uso de vehículos inteligentes (equipo instrumentado), se inició a finales de los años 70's aumentando su utilización en los últimos años; La capacidad de inspección de contratistas de equipos de inspección interna ha mejorado debido a los progresos en tecnología de sensores y en la informática.

A pesar de todos los progresos en el diseño mecánico de los equipos, la tecnología de inspección con vehículo inteligente no debe verse como infalible ya que cada herramienta tiene limitaciones en su capacidad de inspección que deben ser observadas.

Las principales causas de resultados no satisfactorios han sido:

- Falta de información técnica requerida de la instalación a inspeccionar, para calibrar correctamente el vehículo inteligente.
- Selección incorrecta de la técnica de inspección y/o contratista y falta de pericia para interpretar y analizar resultados.

Respecto a la frecuencia de inspección con vehículo inteligente, esta depende de la filosofía de inspección, de las condiciones de operación y de la geometría del ducto; ya que en su mayoría los ductos marinos no fueron diseñados para ser inspeccionadas interiormente con vehículos inteligentes.

El tipo de vehículo inteligente elegido dependerá del propósito de la inspección así como de los datos esperados de la misma. Aunque ocasionalmente los objetivos de la inspección de tuberías con vehículo inteligente pueden variar; en general, el propósito principal del operativo es detectar la pérdida de metal.

2.8.2 Inspección del tipo Fuga de Flujo Magnético (MFL)

Aproximadamente el 90% de inspecciones de pérdida de metal son realizadas con equipo de fuga de flujo magnético, esta tecnología puede ser la técnica más

importante para detectar pérdida de metal en tuberías. Esta técnica se basa en magnetizar la pared de la tubería y detectar la fuga de flujo magnético (MFL) donde existen imperfecciones; con la MFL es posible identificar y reconocer defectos de corrosión como pérdida de metal, grietas en soldadura, cordones de soldadura, (costuras), objetos metálicos adyacentes, abolladuras, fragilización de grietas en soldadura e inclusiones no metálicas.

Los vehículos inteligentes de MFL están equipados con grandes yugos para magnetizar la pared de la tubería en su longitud axial; no obstante pueden ocurrir muchos errores de medida cuando el nivel de magnetismo en la tubería se desvía de lo esperado. El defecto más pequeño que puede ser detectado y medido tiene un ancho igual al espacio del sensor y una longitud igual a tres veces la distancia axial del sensor. Ver Figuras 2.18 y 2.19.

El espesor de pared se obtiene midiendo el campo magnético del fondo axial por medio de sensores de efectos de pasillo, el campo magnético se relaciona con la magnetización de la pared del tubo y transmite así el espesor de pared. Los vehículos inteligentes de MFL registran una gran cantidad de información la cual es analizada automáticamente con ayuda de software para detectar indicaciones o discontinuidades relevantes.

Aplicabilidad

Los vehículos de inspección interna del tipo fuga de flujo magnético pueden ser usados bajo las condiciones siguientes:

- Velocidades en gasoductos de 1 a 4 metros/segundo.
- $D/t > 15$, pero en el caso de que $D/t < 30$ deben tomarse precauciones para asegurar la suficiente magnetización y buena confiabilidad de la medida;
- Diámetro de la tubería entre 4 y 60"Ø
- Todo tipo de servicio o producto transportado.



Figura 2.18. -Equipo instrumentado tipo flujo magnético [9]

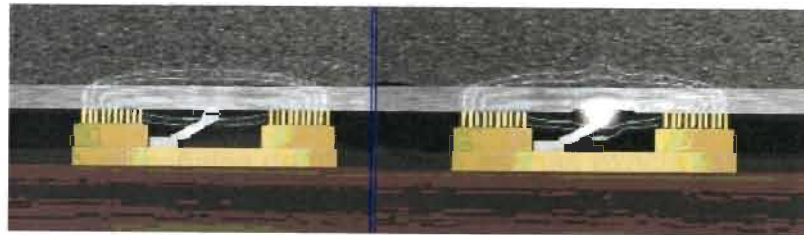


Figura 2.19.- Principio de detección de defectos por fuga de flujo magnético [9]

2.8.3 Inspección del tipo ultrasonido

Los equipos de ultrasonido utilizan transductores ultrasónicos que tienen una distancia fija a la pared del tubo. Es requerido un acoplamiento del flujo entre el transductor y la pared del tubo. Los transductores emiten pulsos de sonido los cuales son reflejados en las superficies internas y externas de la pared del tubo. El tiempo transcurrido en la detección de estos dos ecos da una medida directa del espesor de pared remanente de la tubería.

El tiempo que pasa entre la emisión del impulso y el primer eco es usado para determinar la distancia del transductor a la pared interna del tubo, cualquier aumento en distancia del aislamiento conjuntamente con una disminución del espesor de pared indica pérdida interna del metal. Si se detecta una disminución en el espesor de pared pero la distancia del aislamiento se

conserva constante entonces podemos asumir que se trata de una pérdida de metal exterior, laminaciones o inclusiones.

Estos instrumentos de inspección utilizan transductores ultrasónicos piezoeléctricos que emiten pulsos de sonido de 5 MHz y son colocados a una distancia constante a la pared del tubo; normalmente el transductor y el aislamiento de tal manera que el rayo ultrasónico tienen una extensión por debajo de los 10 mm. Consecuentemente, los poros más pequeños que pueden detectarse con esta técnica son de aproximadamente 1 mm. La frecuencia de muestreo depende de la frecuencia de la despedida del transductor ultrasónico y de la velocidad del equipo. En circunstancias óptimas la distancia axial del muestreo es cerca de 3 mm. Ver Figura 2.20.

La interpretación de señales de ultrasonido es más exacta que las emitidas por las de fuga de flujo magnético, las señales del aislamiento y del espesor de pared dan un mapeo de la pared del ducto mostrando todos los defectos de corrosión. Una superficie rugosa puede originar la pérdida de la señal y se puede reconocer como tal, además las laminaciones, inclusiones, grietas en soldadura, válvulas pueden ser fácilmente identificables.

Hoy en día la detección y dimensionamiento de daños están totalmente automatizados sin embargo la información es todavía verificada manualmente. Los vehículos de inspección ultrasónicos tienen la ventaja de proveer una mejor cuantificación del tamaño de los defectos que los de fuga de flujo magnético.

Aplicabilidad

Los vehículos ultrasónicos de inspección interna pueden ser utilizados bajo las condiciones siguientes:

- Diámetro de 6" hasta 60" de diámetro.
- Velocidad de 1 a 3 m/seg

- Para tuberías con espesor de pared sobre los 7 mm.
- Para uso en ductos de servicio líquido a menos que la herramienta se utilice en un bache de líquido como el glicol.
- En gasoductos utilizando un modelo de vehículo inteligente que cuenta con transductores en las ruedas centradoras

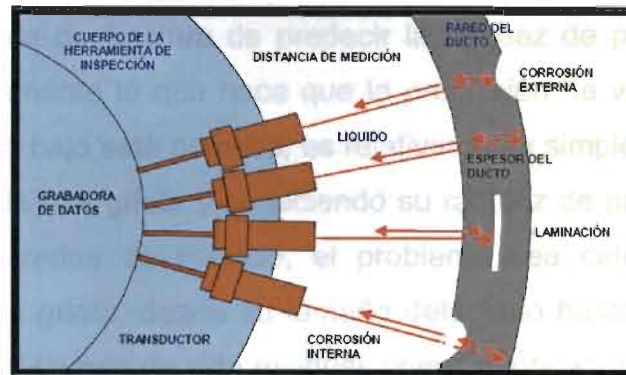


Figura 2.20.- Principio de detección de defectos por ultrasonido [6]

2.9. ANÁLISIS DE INTEGRIDAD [6, 11, 12].

2.9.1 Fundamentos

El análisis de integridad se fundamenta en conocimientos teóricos y prácticos de mecánica de la fractura la cual es una disciplina que estudia la resistencia de un cuerpo agrietado. Para ello se basa en el conocimiento de tres aspectos:

1. La resistencia del material al crecimiento de grietas, es llamada tenacidad a la fractura y es una propiedad del material.
2. El factor de intensidad de esfuerzos K que determina la magnitud de esfuerzos en la punta de la grieta y que depende del tamaño y forma de la grieta, del tipo de cuerpo, por ejemplo: tubo, viga, etc, y de la forma de aplicación de carga (presión, flexión, etc).

3. El tamaño, forma y localización de la grieta (si es radial, longitudinal, laminación, etc.)

Una de las aplicaciones de mayor impacto de la mecánica de fractura es la predicción de la vida útil de una estructura. Cuando la causa primaria del fin de la vida de una estructura es un proceso de agrietamiento, la posibilidad que brinda la mecánica de fractura de predecir la rapidez de propagación de una grieta, es precisamente lo que hace que la predicción de vida sea posible. La predicción de vida bajo esta premisa, es relativamente simple y consiste en que, una vez detectada una grieta y conociendo su rapidez de propagación bajo las condiciones esperadas de servicio, el problema sea calcular el tiempo de propagación de la grieta, desde su tamaño detectado hasta su tamaño crítico, ese tiempo será el tiempo de vida residual, como se observa en la Figura 2.21.

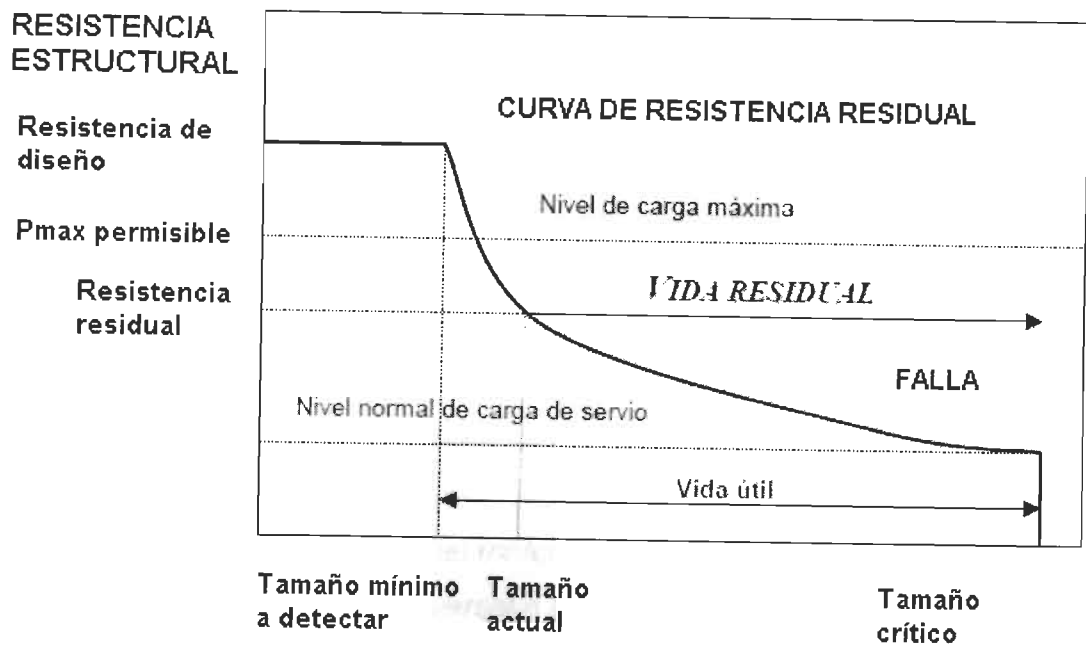


Figura 2.21. Definición de vida útil desde el punto de vista de la mecánica de fractura [12]

Un análisis más detallado de la figura 2.21. Permite reconocer otros aspectos relevantes de la predicción de vida. Primero, todo componente estructural es diseñado bajo la suposición de que el material no contiene defectos y la

resistencia de diseño es la determinada por las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación y las características geométricas (espesor, ancho, forma, etcétera) del componente. Cuando aparece una grieta, inicialmente esta no tiene un efecto en la resistencia residual, pero a medida que la grieta crece, la resistencia va disminuyendo.

El tamaño de grieta que comienza a provocar una disminución de la resistencia será por lo tanto, el tamaño mínimo a detectar mediante la inspección no destructiva; en otras palabras, la técnica de inspección no destructiva debe tener la sensibilidad y resolución suficientes para detectar como mínimo, una grieta cuyo tamaño reduzca la resistencia. Es a partir del tamaño mínimo a detectar y hasta el tamaño crítico, que se obtiene el tiempo de vida útil, o sea la vida máxima garantizada del componente; no se puede garantizar una mayor vida debido a que no se puede asegurar que se detecten grietas más cortas que el tamaño mínimo la vida residual y la vida útil están determinadas por el punto de falla, que es aquel en que el tamaño de defecto provoca una resistencia residual igual al nivel de carga normal de servicio, haciendo que la fractura sea inminente.

2.9.2. Deterioro de componentes estructurales

Cuando una estructura se encuentra en servicio, está sometida a la acción de diferentes fuerzas y acciones agresivas provenientes del servicio y del ambiente al que esta expuesta, que deterioran su estado físico. Este deterioro puede ser:

- _ *Disminución de la resistencia del material*
- _ *Reducción de la sección transversal o del espesor de pared*
- _ *Aparición de grietas*

Así mismo, los diversos tipos de deterioro tienen como consecuencias:

- _ *Reducción en la capacidad de la estructura de soportar cargas*

- _ *Probabilidad de fallas inesperadas y catastróficas*
- _ *Reducción en la vida útil*

En la práctica, existen muchos defectos y anomalías que afectan la resistencia de una estructura, pero si estos no crecen o se acumulan con el tiempo, el efecto será únicamente un riesgo de falla si eventualmente la carga de servicio se incrementa hasta igualar el valor de resistencia residual.

Las condiciones de servicio severo y la inestabilidad de las condiciones de operación, aumentan el grado de deterioro, reduciendo de manera muy importante la vida útil de los ductos.

Las formas de daño más común que acortan la vida útil de un ducto son:

- _ *Corrosión localizada*
- _ *Corrosión uniforme*
- _ *Erosión y desgaste*
- _ *Agrietamiento inducido por hidrógeno*
- _ *Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos*

La susceptibilidad de un material a estas formas de daño depende de la interacción de varios factores entre los que destacan las propiedades mecánicas, la composición química, la microestructura, la composición, pH y temperatura del ambiente, la presión o carga de trabajo, la temperatura y condiciones de servicio y las formas de protección aplicadas, por lo que para la predicción de vida deben de analizarse todos y cada uno de los factores antes mencionados. A partir de una inspección no destructiva se establecen el tamaño, forma, tipo y distribución de los defectos presentes en la estructura.

2.9.3. Principios del Análisis de Integridad

El análisis de integridad consiste en la “Evaluación del estado estructural del ducto, basándose en la identificación del tipo y grado de severidad de los defectos presentes en él, a partir de los reportes de inspección no destructiva y la información técnica del ducto”.

El Análisis de integridad se basa en el cálculo de:

1. La presión o carga máxima permisible de operación del ducto o tramo de ducto en presencia de defectos.
2. El tamaño máximo tolerable de defecto.
3. La rapidez de crecimiento del defecto.

Estos cálculos están fundamentados en los conocimientos de la mecánica de la fractura y se apoyan en el conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación y las dimensiones de los defectos presentes, detectados por inspección no destructiva. Esta información debe ser obtenida de los reportes de inspección y mantenimiento y del historial propio del ducto. Por otra parte, los datos de propiedades mecánicas, caracterización metalúrgica y otros datos, se obtienen mediante pruebas de laboratorio o se utilizan los valores nominales de acuerdo a la especificación del material de construcción. El análisis de fallas será un requisito cuando ésta se presente y sus resultados serán tomados en cuenta para el análisis de integridad.

El principal problema de las líneas submarinas es la ausencia de importantes piezas de información del ducto, ya que una vez construida la línea es muy difícil verificar algún dato in-situ; por lo que necesariamente se debe emplear el criterio, para seleccionar los valores de entrada del análisis. En todo caso el criterio debe ser conservador, es decir, debe considerar el peor de los casos, esto es: el mayor esfuerzo, el ambiente más agresivo y las menores propiedades del material, por lo que el análisis puede resultar en una sobre

estimación de la severidad del defecto analizado. Por otro lado, ninguna sobre estimación deberá ser considerada como una garantía de una resistencia y vida remanente mayor, y el usuario deberá realizar las acciones pertinentes de reparación, adecuación de condiciones de operación o retiro dentro de la forma y tiempo establecidos en las recomendaciones del Análisis de integridad.

El análisis de integridad es aplicable a ductos marinos y ductos ascendentes desde la trampa de envío de diablos en la plataforma de producción y hasta la trampa de recibo en la instalación donde son procesados y sus alcances son los siguientes:

Solo aplica a líneas fabricadas con tubería de acero al carbono y unidos por soldadura.

Establece los criterios para la evaluación de severidad de defectos que estén presentes en el ducto, según su tipo y tamaño, así como los requerimientos de inspección no destructiva.

Especifica los datos e información que son necesarios para calcular la resistencia residual y la vida residual de los tramos del ducto analizado.

Establece los criterios de aceptación, reparación o retiro de los tramos del ducto con defectos para garantizar la seguridad durante su operación.

Para realizar un análisis de integridad, es necesario contar con la información mínima necesaria que en forma resumida contiene lo siguiente:

Datos de diseño y construcción

Datos de operación

Reporte de las condiciones actuales de servicio y máximas posibles.

Reporte del historial

El criterio de análisis de integridad descrito está basado solo en la habilidad del ducto para mantener su integridad mecánica bajo presión interna, combinada

con presión hidrostática y cargas externamente impuestas por oleaje, movimientos de suelos y corrientes marinas. Entendiéndose la integridad mecánica como la capacidad del ducto para contener un fluido a presión en su interior, soportar las cargas externamente impuestas y mantener su forma y continuidad sin presentar fugas, agrietamientos o rupturas.

La exactitud de los resultados del análisis es función únicamente de la exactitud de los datos proporcionados y de la veracidad del reporte de la inspección no destructiva. Los cálculos serán válidos siempre y cuando las condiciones de operación permanezcan dentro de los límites de variación indicados en este procedimiento y que no haya cambios de servicio, cambio de materiales, o modificación de las cargas o presiones externas, aún cuando éstas no se hubieran realizado en aquellas secciones, áreas o tramos del ducto donde se ubica el defecto.

En ausencia parcial de información del ducto, el analista necesariamente empleará su criterio para seleccionar los valores de entrada del análisis. En todo caso el criterio será conservador, es decir, se considerará, según el caso: el mayor esfuerzo, el ambiente más agresivo y las menores propiedades del material tal como fue mencionado en la hoja anterior.

2.10. CALIFICACIÓN DE ANOMALÍAS EN DUCTOS EN FUNCIÓN DE SU SEVERIDAD [9].

Para una mejor comprensión de la severidad y prioridad de los defectos a continuación se definen los siguientes términos:

Presión de Diseño (Pd): Es la presión máxima permisible en ausencia de defectos y en cumplimiento con todas las especificaciones de diámetro, espesor, propiedades del material y condiciones de servicio, incluye un factor de seguridad. Generalmente esta definida en términos de la presión que

produciría un esfuerzo circunferencial en la pared del tubo, igual a una fracción del esfuerzo de cedencia mínimo especificado del material de fabricación de la tubería.

Presión de Operación (Pop): Es la presión manométrica a la cual se opera el ducto en condiciones normales y estables. Para efectos de análisis, estas mediciones de presión son tomadas en los orígenes de las líneas ya que se desprecian las pérdidas por fricción, disminución de temperatura o reducción de flujo.

Presión de falla (Pf): Es la presión que causa una condición indeseable o de riesgo del tramo que contiene el o los defectos analizados; es decir la presión que produce deformación plástica, crecimiento de defectos, deterioro acelerado de materiales, fuga, colapso y explosión; esta presión es calculada en base a los principios de mecánica de la fractura y de resistencia de materiales.

Presión Máxima Permisible de Operación (PMPO): Es la presión máxima a la cual se puede operar un ducto que contiene defectos, preservando su integridad y su factor de seguridad por diseño.

Tamaño Crítico de Defecto: Es el tamaño de defecto que produce una condición indeseable y de riesgo.

Tiempo de Vida Remanente (TVR): Es el lapso de tiempo que transcurre desde que un defecto es detectado y analizado en su severidad, hasta que alcanza el tamaño crítico, que es el tamaño que produce una fuga o falla. Si el TVR es mayor que el tiempo esperado de servicio o el periodo de la próxima inspección no hay riesgo de falla, pero si TVR es menor que el tiempo esperado de servicio o el periodo de la próxima inspección integral, el defecto debe repararse. Si la reparación no es posible de realizar de inmediato, el TVR puede

emplearse para establecer el plazo de la siguiente inspección. Si el TVR es menor de 6 meses, deberá tomarse una acción correctiva inmediata.

Combinación de defectos: Consideramos como la combinación de dos o más defectos, tales como pérdidas de metal internas o externas con defectos de fabricación, falta de fusión, coronas bajas, socavados, quemaduras por arco eléctrico, porosidad, etc. los cuales pueden interactuar entre ellos.

Agrupación de defectos: Cuando dos defectos están muy cercanos entre si, pueden ser considerados como uno solo para efectos del calcula de la PMPO y TVR, en tal caso, sus dimensiones pueden agruparse y reportarse como un solo defecto.

Riesgo de falla: Se define como la condición de la tubería que implica un evento no deseado tal como una fuga, una fractura o una explosión: dicha condición, provoca que la capacidad de la tubería para contener herméticamente el fluido que transporta y la presión interna a la cual esta sometida sea reducida o eliminada.

El riesgo de falla se determina en función de la presión máxima permisible de operación (**PMPO**) ó del tiempo de vida remanente (**TVR**) de la tubería.

Relación de Presiones (RP) indica a que porcentaje de la **PMPO** está operando el ducto y por lo tanto es indicativa del margen de seguridad existente. Se define como:

$$RP = PMPO / Pop$$

Esta relación indica a que porcentaje de la **PMPO** se opera el ducto.

En base a lo anterior tenemos tres situaciones:

1. Si **RP** es mayor o igual que 1.0, no se afecta el factor de seguridad y el ducto puede ser operado a la **Pop**.
2. Si **RP** es menor de 1.0 pero mayor que **FS** (Factor de Seguridad), la operación tiene cierto riesgo pues ya esta haciendo uso del factor de seguridad establecido por la norma y se debe tomar una acción correctiva en un plazo menor a los 12 meses; no obstante, mientras se ejecuta la acción correctiva la **Pop** no debe incrementarse por arriba de la **PMPO** reportada en el analisis de integridad.
3. Si **RP** es menor o igual que **FS**, se debe tomar una acción correctiva inmediata que puede ser:

Reducción de la presión de operación por debajo de la PMPO,

Colocación de un refuerzo o ejecución de acción correctiva recomendada inmediata y

Suspensión del servicio.

Relación de esfuerzos (RS) Es la relación entre el esfuerzo de cedencia mínimo especificado (**So**) y el esfuerzo equivalente de Von Mises (**Svm**) en el tramo analizado.

La relación se calcula de la forma siguiente:

$$RS = Svm / So$$

Si la relación de esfuerzos es igual o mayor que 0.9, el tramo analizado tiene esfuerzos mayores a los permisibles y debe tomarse una acción correctiva.

2.10.1 Prioridades de acción correctiva

La prioridad de acción correctiva es un factor que define la urgencia con la que se debe tomar una acción correctiva en un tramo de ducto que se ha dictaminado para reparación, de acuerdo a los criterios de severidad. Debido a que un ducto puede fallar por aumento de presión, conclusión de su vida remanente por esfuerzos excesivos, se define un factor de priorización para cada una de estas formas de falla. La prioridad se establece de la forma siguiente:

Prioridad 1

Muy severa, riesgo inminente de falla en tiempo de varios días o con aumentos leves de presión de operación (10 a 20% arriba de Pop.).

Para que la anomalía se clasifique como prioridad 1 debe cumplirse:

$$RP \delta 1.2FS \ TVR < 6meses \ RS \varepsilon 0.9$$

Prioridad 2

Anomalía severa con alta probabilidad de falla con aumentos de presión moderados o en plazo de meses.

Para que la anomalía se clasifique como prioridad 2 debe cumplirse:

$$1.2FS \delta \ RP \delta \ 0.55FS + 0.5 \ \text{ó} \ 6meses < TVR \delta \ 1Año \ \text{ó} \ 1 < RS \delta \ 1.2$$

Prioridad 3

Anomalía con severidad moderada, riesgo de falla sustancial, posibilidad de falla si la Pop se aproxima al Pd, ó en depresiones grandes ó en presencia de altos esfuerzos secundarios en eventos tales como: golpes de ariete, sismos, deslizamientos de terreno, golpes de maquinaria, etc.

Para que la anomalía se clasifique como prioridad 3 debe cumplirse:

$$0.55FS + 0.5 < RP \delta \ 1.1 \ \text{ó} \ 1año < TVR \delta \ 5Años \ \text{ó} \ 1.2 < RS \delta \ 1.5$$

Prioridad 4

Anomalía con severidad leve, riesgo posible si no se realiza la reparación recomendada; la reparación se efectúa con la intención de restablecer la resistencia de diseño y la vida útil del ducto.

Para que la anomalía este clasificada como tipo 4 debe cumplirse lo siguiente:

$RP > 1.1$ Y $PMPO < PD$ ó ó y

Prioridad 5

Anomalía no severa, riesgo dentro de lo permisible por el factor de seguridad. El criterio a seguir para definir si una anomalía es prioridad 5 es que las condiciones de RP, TVR y RS deben ser superiores a lo establecido para la prioridad 4.

CAPÍTULO 3

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE BIBLIOGRAFÍA.

3.1. INSPECCIÓN ULTRASÓNICA EN DUCTOS EN SERVICIO

La técnica de ultrasonido fue utilizada para detectar el agrietamiento inducido por hidrogeno (HIC) en la costura longitudinal de la tubería de servicio mediante soldadura de resistencia eléctrica, este es un modo de falla muy común, esto se muestra en la Figura 3.1.

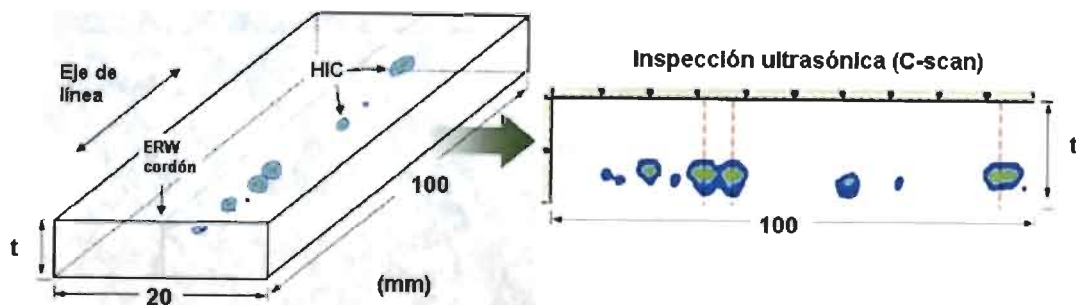


Figura 3.1. Agrietamiento inducido por hidrógeno detectado por inspección ultrasónica.

La Figura 3.2 muestra un ejemplo del agrietamiento generado por la presencia de sulfuros de Mn, Si e inclusiones de oxido de aluminio, lo cual se hace evidente en las imágenes obtenidas a través del microscopio electrónico de barrido, ver Figura 3.3.

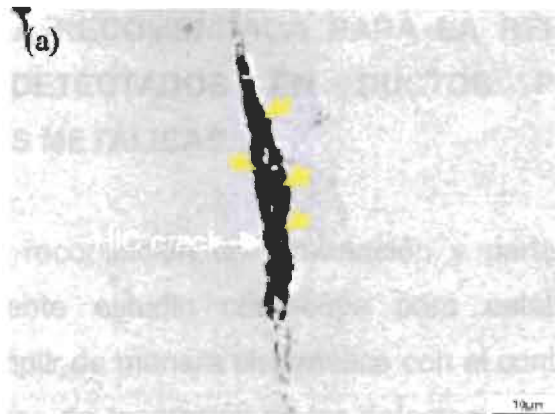


Figura 3.2. Agrietamiento por presencia de Sulfuros de Mn e inclusiones de óxido de aluminio

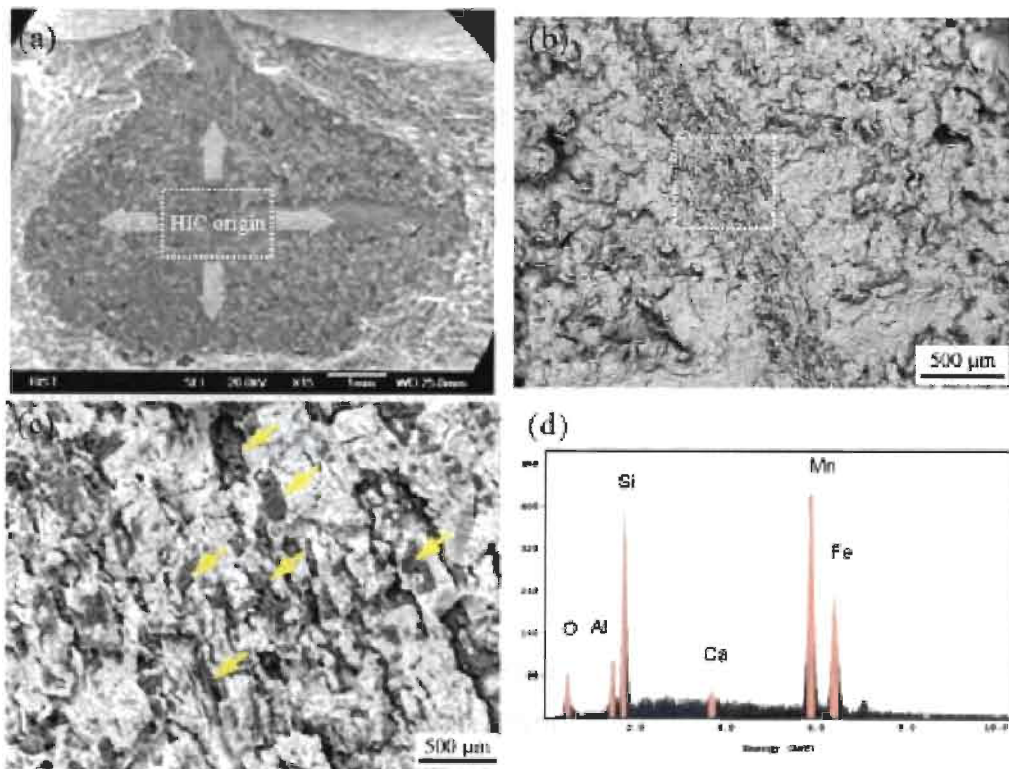


Figura 3.3. Microscopía electrónica de barrido. Agrietamiento por presencia de Sulfuros de Mn e inclusiones de óxido de aluminio

Por medio de la técnica de ultrasonido se logro evidenciar la presencia de grietas en la costura longitudinal realizada por soldadura de resistencia eléctrica, son ocasionadas por el agrietamiento inducido por hidrógeno, esto es generado por la presencia de silicio, manganeso e inclusiones de óxido de aluminio.

3.2 METODOLOGÍA RECOMENDADA PARA LA REHABILITACIÓN DE DEFECTOS DETECTADOS EN DUCTOS POR MEDIO DE ENVOLVENTES METÁLICAS.

Con la ayuda de la recopilación de información y parte de la experiencia acumulada, el presente estudio contribuye para establecer la siguiente metodología para cumplir de manera sistemática con el control y aseguramiento de calidad en el proceso de reparación de los defectos existentes en ductos por medio de envolventes metálicas soldadas.

Metodología propuesta.

- 1 Realizar la inspección completa del ducto a través de una corrida con equipo instrumentado (de pérdida de flujo magnético ó ultrasonido) este servicio es contratado por Pemex con compañías privadas.
- 2 Validación de los resultados obtenidos por medio de inspecciones complementarias de campo aplicando ensayos no destructivos para determinar la eficiencia de la corrida, esta actividad es realizada por la misma empresa que efectuó la corrida de inspección para entregar un informe final confiable.
- 3 El departamento encargado de realizar los estudios de integridad mecánica para Pemex, hace la revisión completa del resultado de la corrida y determina cuales son las indicaciones que requieren inspección y evaluación (realizar programa de inspección).
- 4 Pemex asigna recursos para la ejecución de las actividades de inspección y verificación de indicaciones con personal certificado (actividad realizada por la compañía contratada).

- 5 Correlación de indicaciones en campo: esta actividad consiste en geoposicionar o ubicar las coordenadas geográficas del defecto para localizarlo.
- 6 Realizar excavaciones piloto para ubicar soldaduras de referencia del ducto para descartar la posibilidad de error al ubicar el tramo que contiene el defecto.
- 7 Realizar el retiro del recubrimiento anticorrosivo de la zona que contiene el defecto para dimensionarlo y evaluarlo aplicando técnicas de END.
- 8 Una vez colectados los datos de campo, se realiza el reporte de inspección y se aplican los códigos correspondientes para determinar si el defecto esta aceptado o rechazado.
- 9 Con el resultado del reporte de inspección se procede a elaborar el análisis de integridad del tramo que contiene el defecto, considerando para ello los valores dimensionales y las condiciones de operación del ducto (presión de operación, presión de diseño, temperatura del fluido, flujo, especificación del material, año de construcción, fecha de puesta en operación, factor de seguridad, etc.).
- 10 El estudio de integridad determinara si el defecto degrada o no la estructura mecánica del ducto posteriormente se dictamina el tipo de reparación.
- 11 Si el **defecto no degrada** la integridad mecánica del ducto se procede a rehabilitar el recubrimiento anticorrosivo de la zona inspeccionada, posteriormente se realizan las pruebas al recubrimiento aplicado (medición de espesor, prueba de adherencia, prueba dieléctrica), si cumple con todas las pruebas de acuerdo a norma entonces se procede al tapado de la excavación.

- 12 Se elabora el acta correspondiente de la reparación efectuada para tener el proceso documentado y se actualizan las condiciones de integridad del ducto, entonces se puede determinar la nueva presión máxima permisible de operación (PMPO) y el tiempo de vida remanente (TVR) que ahora se tiene con la rehabilitación realizada.
- 13 Cuando el estudio de integridad concluye que el defecto **degrada** la integridad mecánica del ducto, se determina el tipo de reparación que debe realizarse, para ello existen varios métodos de reparación como:
- Envolvertes no metálicas
 - Envolvertes metálicas atornilladas
 - Envolvertes metálicas soldadas tipo "A" y tipo "B"
 - Sustitución de tramos de tubería
- 14 Cuando **se determina la instalación de envolverte metálica soldada**, entonces se hacen las consideraciones necesarias como sigue:
- Diseño de la envolverte.
 - Elaboración y calificación del procedimiento de soldadura.
 - Calificación del soldador.
 - Certificado de calidad del material de la envolverte.
 - Certificado de calidad de los materiales a emplear (electrodos, recubrimiento, arena sílica).
 - Certificado de mantenimiento de la máquina de soldar
 - Certificado de mantenimiento del compresor para el sand-blast
 - Equipo de protección personal completo
- 15 Localizar la zona sana para la soldadura de la envolverte, con lo que se determinan los límites de la misma y esto proporciona la longitud total del refuerzo.

- 16 Determinada la zona sana, se procede a la preparación de la superficie del ducto donde se instalara la envolvente.
- 17 La preparación consiste en limpieza con chorro de arena (sand-blast) hasta metal blanco y aplicación de protección anticorrosiva.
- 18 Se realiza el conformado de la envolvente en la tubería, se presenta y se miden los claros entre envolvente y ducto los cuales deben ser establecidos en el procedimiento calificado, se prepara la superficie interna de la misma con chorro de arena hasta metal blanco y aplicación de recubrimiento anticorrosivo.
- 19 Una vez conformada y que sean los adecuados se procede a realizar la soldadura, el proceso es supervisado por un inspector de soldadura calificado.
- 20 Terminada la soldadura se realizan los END correspondientes: (líquidos penetrantes, partículas magnéticas, etc.).
- 21 Si los END determinan que la soldadura es aceptable de acuerdo a norma se procede a aplicar chorro de arena hasta metal blanco y aplicación de recubrimiento anticorrosivo.
- 22 Posteriormente se realizan las pruebas al recubrimiento como son (prueba de adherencia, medición de espesor, prueba dieléctrica). Si las pruebas cumplen con las especificaciones de la norma se procede al tapado de la excavación.
- 23 Se elabora el acta correspondiente de la reparación efectuada para tener el proceso documentado y se actualizan las condiciones de integridad del

ducto, entonces se pueden determinar la nueva PMPO y TVR que se tienen con la rehabilitación realizada.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

De la revisión bibliográfica relacionada con los ensayos no destructivos y técnicas de reparación de defectos en tubería de conducción se concluye lo siguiente:

En la actualidad no se cuenta con una metodología para establecer el modo adecuado para lograr una reparación exitosa, es importante conocer y tener un sistema de detección de posibles fallas, es conveniente una verificación periódica mediante ensayos no destructivos, para minimizar las pérdidas millonarias por derrames de hidrocarburos.

En la industria petrolera específicamente en el área de mantenimiento se utiliza a nivel de operaciones el procesos convencional de soldadura para la reparación de la tubería de conducción grado API X52, dicho proceso es el SMAW ya que gracias a su características es el ideal para una reparación en campo.

Es de suma importancia revisar periódicamente su integridad estructural ya que con los mantenimientos preventivos se logra reparaciones menores con un alto grado de éxito. Dichos mantenimientos o revisiones disminuyen hasta en 70% reparaciones mayores o inclusive sustituciones parciales o totales de ductos.

La selección de envoltente para reparación involucra más que el material y el proceso de soldadura, si no las condiciones a las cuales va a estar sometido durante servicio, es importante conocer las condiciones para verificar la periodicidad del mantenimiento y así prolongar su vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

1. O'Brien, R. L. Welding Handbook Volume 1: Welding Science & Technology. 9th Edition. AWS. (2001). p. 298-313
2. NRF-001-PEMEX-2007. Tubería de Acero para Recolección y Transporte de Hidrocarburos.
3. NRF-026-PEMEX-2008. Protección con recubrimientos anticorrosivos para tuberías enterradas y / o sumergidas.
4. R J Eibar, D J Jones, "Analysis of Reportable Incidents for Natural gas Transmission and Gathering Lines June 1984 through 1990", AGA Report NG-18 Report Number 200, Aug. 1992.
5. NRF-030-PEMEX-2009. Diseño, Construcción, Inspección y Mantenimiento de Ductos Terrestres para Transporte y Recolección de Hidrocarburos.
6. Hopkins, P., Haswell, J., "Practical defect assessment Methods for application to UK gas transmission pipelines" The Institute of Materials Griffinth Conference, Sheffield, UK, September 1995.
7. NACE INTERNACIONAL; Pipeline Integrity Management Seminar; June 18-20, 2003 Houston, TX.
8. AWS D1.1/D1.1M:2006 An American National Standard Structural Welding Code-Steel.

9. T. Obinata; Recomendaciones para la fabricación de aceros HSLA destinados al servicio en ambiente amargo. "The Nippon Steel Corporation".
10. ASME B31G-1991(Reaffirmed 2004) Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping.
11. Andrew Palmer and Associates (A Division of SAIC Ltd); Alberta, Canadá, 1991 – 208,000km¹ Edited by Linda Garverick; Corrosion in the Petrochemical Industry. ASM International. 1995. Pags.372 – 377.
12. Andrew Palmer and Associates; Advance Methods for Defect Assessment in Pipelines; The Cophorne Newcastle – 1999.
13. NRF-004-PEMEX-2003. Protección con Recubrimientos Anticorrosivos a Instalaciones Superficiales de Ductos. Revisión.
14. NRF-033-PEMEX-2003. Lastre de Concreto para Tuberías de Conducción.
15. O. I. Radkevych, O. S. P'yasets'kyi, and I. I. Vasylenko. Corrosion-mechanical resistance of pipe steel in hydrogen-sulfide containing media Materials Science, Vol 36, No. 3. 2000.
16. Pipeline Repair Methods –In-Service Welding Course. PONENTE: Wiallam A Bruce (CC TECHNOLOGIES)

LISTA DE TABLAS

Número	Tablas	Página
2.1	Clasificación general de la tubería de conducción o transporte	13
2.2	Métodos de inspección y monitoreo de tubería de conducción	21
2.3	Clasificación del método de reparación por envolveres	26
2.4	Ventajas y desventajas de envolveres metálicas Tipo A y B	
2.5	Principales defectos a reparar por el método de envolveres	

LISTA DE FIGURAS

Número	Figuras	Página
2.1	Proceso de soldadura SMW	6
2.2	Efecto del amperaje sobre la velocidad de depositación	11
2.3	Registro de seguridad conforme al número de fallas en tuberías terrestre comparado con otros medios de transporte de combustible	14
2.4	Principales causas de falla cuando se transporta gas natural húmedo y amargo	15
2.5	Principales causas de falla cuando: a) se transporta gas dulce y b) petróleo	15
2.6	Corrosión bacteriológica localizada en el cordón de soldadura circunferencial	17
2.7	Agrietamiento inducido por hidrógeno y corrosión bajo esfuerzo en acero al carbono de baja aleación	18
2.8	Etapas del programa de rehabilitación y reparación	19
2.9	Instalación de una envolvente metálica	24
2.10	Las camisas metálicas, generalmente se fabrican a partir de 2 medias cañas, con material igual grado al tubo a reparar o grado superior	26
2.11	Variaciones comunes del encamisado tipo A; a) Camisa completa, soldada longitudinalmente, b) Camisa de media caña sin soldadura, c) Sección de una camisa forjada marca Plidco	27
2.12	Encamisado completo tipo B con soldadura circunferencial y soldadura longitudinal sin espacio anular, diseñado como contenedor de presión	28
2.13	Encamisado completo tipo B con soldadura circunferencial	29

	y soldadura longitudinal con espacio anular, diseñado como contenedor de presión	
2.14	Etapas del proceso de encamisado a) Método de fijación b) soldadura en un tubo con fuga c) Doble O´ring utilizado para contener la fuga d) reforzamiento en tándem, con penetración total en la soldadura circunferencial intermedia	31
2.15	Inspección visual a tubería de conducción	32
2.16	Inspección con el método de partículas magnéticas a tubería de conducción	34
2.17	Inspección con el método de ultrasonido a tubería de conducción	35
2.18	Equipo instrumentado tipo flujo magnético	38
2.19	Principio de detección de defectos por fuga de flujo magnético	38
2.20	Principio de detección de defectos por ultrasonido	40
2.21	Definición de vida útil desde el punto de vista de la mecánica de fractura	41
3.1	Agrietamiento inducido por hidrógeno por inspección ultrasónica	52
3.2	Agrietamiento por presencia de Sulfuros de Mn e inclusiones de óxido de aluminio	53
3.3	Microscopía electrónica de barrido. Agrietamiento por presencia de Sulfuros de Mn e inclusiones de óxido de aluminio	53

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Nombre:	Enrique Hernández Bartolo
Grado a obtener:	Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.
Título de Monografía:	Reparación de defectos en ductos en servicio de acero API 5L X52 para transporte de hidrocarburos por medio de envolventes metálicas.
Títulos obtenidos:	Ingeniero Electromecánico
Universidad:	Instituto Tecnológico de Minatitlán (ITM),
Campo profesional:	Ingeniería, docencia
Experiencia profesional:	Supervisor de mantenimiento a Ductos de la GTDH Sur de Pemex Exploración y Producción.
Lugar y fecha de nacimiento:	Nanchital, Veracruz, 14 de febrero de 1971
Nombre de padres:	Gilberto Hernández de la O (<i>f</i>), Luz María Bartolo Alfonso