



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ASPECTOS FUNDAMENTALES EN LA INSTALACIÓN Y
MANTENIMIENTO DE TUBERÍAS PARA TRANSPORTE
DE HIDROCARBUROS**

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
(Á R E A M E C Á N I C A)
P R E S E N T A :
ARMANDO LEÓN ROSARIO

DIRECTOR: DR. ARTURO BARBA PINGARRÓN



MEXICO, D.F.,

MARZO, 2002.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS:

A la Facultad de Ingeniería, UNAM, por darnos una formación profesional Integral que nos ayude para ser gente de provecho para México y la sociedad.

A todos aquellos compañeros, amigos y profesores que contribuyeron a mi formación, sin desear omitir alguno, gracias a todos.

A mi asesor, el Dr. Arturo Barba Pingarrón, por su ayuda y facilidades otorgadas gracias en verdad.

DEDICATORIAS

A mi madre:

Por ser la base de una familia muy sólida.
Por su amor y cariño incondicional.
Por los consejos y el apoyo que siempre sentí de ella.

A mi padre:

Por ser mi ejemplo a seguir.
Por haberme enseñado, que con esmero, dedicación y honradez
siempre alcanzaré las metas que me proponga.
Por ser la persona que más admiro.

A mis hermanos:

Ricardo y Luis Alberto. Por su valiosa compañía y su gran amistad.

A Sandy:

Por estar cerca de mí en momentos determinantes para la terminación
de ésta tesis. Gracias por tu cariño y motivación.

A mis amigos:

Mariano García del Gallego
Javier Muñoz Perez.

ÍNDICE

PAG.

INTRODUCCIÓN.

i

CAPITULO 1

GENERALIDADES SOBRE LA INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE.

1.1	Antecedentes.	1
1.2.	Aspectos comunes y esenciales previos a la construcción de una tubería de transporte.	2
1.2.1	Clasificación de tuberías de transporte.	3
1.2.2	Actividades previas a la realización del proyecto de la instalación de la tubería.	3
1.3.	Construcción.	5
1.3.1	Trazo.	5
1.3.2	Apertura del derecho de vía.	6
1.3.3	Excavación de la zanja.	7
1.3.3.1	Profundidad de la zanja.	7
1.3.3.2	Ancho de la zanja.	7
1.3.4	Carga, transporte y tendido de tubería.	8
1.3.5	Doblado y alineado.	10
1.3.5.1	Doblado de tubería.	10
1.3.5.2	Aplicación de la fuerza al tubo.	11
1.3.5.3	Limpieza de biselos.	12
1.3.5.4	Alineado.	13
1.3.6	Soldadura.	13
1.3.7	Protección mecánica.	14
1.3.7.1	Recubrimiento anticorrosivo.	14
1.3.7.2	Recubrimiento y protección catódica.	15
1.3.7.3	Tipos de recubrimiento.	15
1.3.7.4	Preparación de superficies.	17
1.3.7.5	Limpieza con chorro de arena.	18
1.3.7.6	Abrasivos para limpieza.	18
1.3.8	Bajado y tapado.	19
1.3.8.1	Bajado.	19
1.3.8.2	Tapado.	20
1.3.9	Prueba hidrostática.	20
1.3.9.1	Limpieza interior.	21
1.3.9.2	Llenado y levantamiento de presión.	22
1.3.9.3	Ejemplo de calculo de prueba hidrostática.	22

CAPITULO 2

TUBERÍA PARA TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.

2.1	Clasificación de tuberías de transporte.	23
2.2.	Especificaciones.	23

2.3.	Diseño.	23
2.3.1	Clasificación de localizaciones.	24
2.3.2	Presión máxima de operación.	26
2.3.3	Presión de diseño.	26
2.3.4	Temperatura de diseño.	26
2.3.5	Esfuerzo de trabajo máximo permisible.	26
2.3.6	Espesor mínimo.	27
2.4.	Características y requerimientos de materiales, inspección y pruebas.	28
2.4.1	Tubos de acero.	29
2.4.2	Pruebas para calificación de materiales.	30
2.5.	La prueba hidrostática (prueba de resistencia).	35
2.6.	Recubrimientos anticorrosivos para tubería.	38
2.6.1	Tipos de recubrimientos.	38
2.6.2	Clasificación de los recubrimientos para tubería.	39
2.7	Válvulas de seccionamiento.	41

CAPITULO 3

SOLDADURA.

3.1.	Consideraciones de construcción.	42
3.2.	Definición de Términos.	42
3.2.1.	Proceso de soldadura.	42
3.2.2.	Proceso de soldadura de Arco eléctrico, con electrodo recubierto.	43
3.2.3	Equipo de soldar.	44
3.2.4	Soldador calificado.	44
3.2.5	Cordones de soldadura.	44
3.3.	Calificación del procedimiento de soldadura.	46
3.3.1	Especificaciones del procedimiento.	46
3.3.2	Ensayo (pruebas) en las soldaduras para calificación del procedimiento para uniones a tope.	49
3.4.	Calificación del soldador.	52
3.4.1.	Calificación sencilla.	52
3.4.2.	Calificación múltiple.	53
3.4.3.	Examinación visual.	54
3.4.4	Calificación del soldador por radiografía.	54
3.4.5.	Registro de soldadores calificados.	54
3.5.	Diseño y preparación de una junta para soldadura de producción.	56
3.6	Inspección de soldaduras mediante el procedimiento radiográfico. (ensayo no destructivo).	57
3.6.1.	Detalles del procedimiento radiográfico.	57
3.7.	Defectos de soldadura.	60

CAPITULO 4

DEFECTOS QUE SE PRESENTAN EN LAS TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN.

4.1.	Laminaciones en tuberías de conducción.	75
4.1.1.	Tipos de laminaciones.	75
4.1.2.	Estudio de laboratorio del comportamiento mecánico de las laminaciones.	78
4.1.3.	Evaluación de la severidad de las laminaciones.	79
4.1.4.	Categorías de severidad en las laminaciones.	80
4.1.5.	Efecto en la integridad por tipo de laminación.	80
4.2.	Reparación de tuberías con laminación.	81
4.3.	Identificación de defectos.	82
4.4.	Valoración de los defectos.	83
4.5.	Técnicas de reparación.	84

CAPITULO 5

CORROSIÓN Y PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN ENTERRADAS.

5.1	Aspectos generales de la corrosión en oleoductos.	88
5.2.	Formas de la corrosión.	88
5.3.	Química y electroquímica de la corrosión.	89
5.3.1.	Corrosión en ácidos.	89
5.3.2	Corrosión en soluciones neutras y alcalinas.	89
5.3.3	Corrosión en otros sistemas.	90
5.3.4	Productos de la corrosión.	90
5.3.5	Electroquímica de la corrosión.	90
5.4.	Reacciones anódicas.	92
5.5.	Reacciones catódicas.	93
5.6.	Potencial de corrosión.	94
5.7	Potenciales de óxido reducción.	94
5.8.	Criterio para corrosión.	95
5.9.	La celda electroquímica.	96
5.10	Prevención de la corrosión por métodos electroquímicos.	97
5.10.1	Protección catódica.	97
5.10.2	Teoría.	97
5.10.3	Aplicación práctica de la protección catódica en la tubería de Conducción enterrada.	98
5.10.4	Sistemas de protección catódica.	99
5.10.5	Protección catódica con ánodos de sacrificio.	100

5.10.6	Tipos de ánodo.	100
5.10.7	Consideraciones sobre diseño.	101
5.11.	Medición de resistividad.	103
5.12.	Medición de potencial.	104
5.13.	Pruebas de requerimientos de corriente.	105
5.14	Relleno.	108
5.15	Protección catódica con rectificadores de corriente alterna.	109
5.15.1	Tipos de rectificadores.	109
5.15.2	Consideraciones sobre el diseño.	109
5.15.3	Eficiencia de los rectificadores.	110
5.15.4	Detalles de instalación.	111
CONCLUSIONES.		114
BIBLIOGRAFÍA.		115
APÉNDICE I Diagramas de flujo con etapas de calidad en la fabricación de tuberías.		116
APÉNDICE II Instrumentos para medir resistencia y resistividad.		119
APÉNDICE III Equipo de inspección interior de fallas en tuberías de conducción.		123
APÉNDICE IV Glosario de términos.		128

INTRODUCCIÓN

Las líneas de la conducción son de vital importancia para el país ya que por medio de ellas se transportan en forma óptima los hidrocarburos que requiere la industria y la población en general.

En nuestro país al momento están constituidos por alrededor de 60,000 km., y son fundamentales para la economía nacional, ya que su costo operativo es mucho menor en comparación con cualquier otro tipo de transporte, porque la productividad es muy alta al conducir grandes cantidades de producto en tan poco tiempo en comparación con cualquier otro medio utilizado para dicho fin. Debido a que las tuberías tienen acceso a cualquier ciudad del territorio nacional donde se proponga llevar a cabo la transportación de un hidrocarburo, ya que pueden ser construidas a través de ríos caudalosos, lagos, pantanos, carreteras y autopistas federales, bordear cerros, etc.

Este trabajo se refiere a los aspectos más importantes en los que puede intervenir la ingeniería mecánica para la construcción y mantenimiento de dichas líneas.

Este es el resultado de conocimientos básicos y experiencias particulares adquiridas en el desarrollo de esta actividad en la que he participado durante los últimos tres años.

Específicamente el propósito de esta tesis, es dar una visión general del proceso de construcción en las tuberías de transporte, lo que permitirá evaluar un proyecto de estas características, para que en un momento dado, se puedan plantear problemas, alternativas, métodos y procedimientos que permitan, en todo caso, aportar mejoras para esta industria de vital importancia en la economía de nuestro país.

En este sentido se proporcionan observaciones, desde cómo supervisar las tuberías durante su construcción, en base a especificaciones, normas establecidas y experiencias adquiridas; hasta como mantener en buenas condiciones la línea de transporte a largo plazo, mediante acciones preventivas.

La primera parte de este trabajo de tesis lo constituyen los tres primeros capítulos, referentes a aspectos fundamentales de la construcción de una línea de transporte de hidrocarburos. Un panorámica muy general del procedimiento de construcción, se expone en el capítulo 1. El capítulo 2, se refiere a la tubería de transporte, dado que ésta es la materia prima fundamental. La importancia de la soldadura como el método de unión de la tubería de transporte, y el estricto control de calidad hacia éste proceso por lo peligroso que puede llegar a ser una mala aplicación del mismo, está referido en el capítulo 3.

Los capítulos 4 y 5, son relativos a problemas que pueden presentarse en las tuberías, específicamente el capítulo 5 está dedicado al problema de la corrosión en tuberías enterradas y al sistema de protección catódica como el principal método de prevención.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES SOBRE LA INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE

1.1 ANTECEDENTES

Desde tiempos muy remotos, el hombre al darse cuenta de que el fuego le era necesario, tuvo que buscar algún combustible entre lo que tenía a la mano. El hecho fue que hubo de controlar el fuego y como consecuencia controlar también lo que lo provocaba con seguridad. Al pasar el tiempo, fue seleccionando sus fuentes de abasto y a la vez ideando formas de almacenamiento, como gavillas de leña de ramajes secos, algunas tierras impregnadas que arían y así asegurarse de algo que más tarde fuera a ser dependiente: EL COMBUSTIBLE COMO ENERGETICO; pues bien para llevar la leña seca del bosque al lugar donde el fuego ardía hubo de arrastrar las ramas o sencillamente cargarlas, ya sea en los brazos o en la espalda, esperar a que secara en un lugar donde la tenía amontonada para que ardiera mejor y luego darle el uso como combustible, el hombre estaba entrando en una problemática, la cual por generaciones ha tenido, esto es:

SELECCIÓN, LOCALIZACIÓN DE FUENTES ABUNDANTES Y SEGURAS, TRANSPORTE, PROCESO DE PURIFICACIÓN, ALMACENAMIENTO Y USO CONTROLADO DEL COMBUSTIBLE.

En lo referente al transporte de combustible en la actualidad todos los países del orbe han desarrollado técnicas tomando en consideración el tipo de combustible por su naturaleza física y peligrosidad, topografía del terreno por donde lo transporta, clima, lugar donde se encuentran los sitios de explotación, distancia a los lugares de consumo, etc.

México se encuentra entre los países productores de petróleo, carbón natural, gas combustible, uranio y algunos otros combustibles o productores de energía. Para esto, los técnicos con ayudas de aparatos modernos han descubierto centros de explotación ya sea siguiendo antiguas rutas o nuevas, los cuales se encuentran en diversas partes de la república en tierra o submarinas, y los centros de consumo son nacionales o extranjeros, de tal manera, que los tipos de transporte son diversos e importantes como: carros tanque (ferrocarril), autos tanque (carretera), buques tanque (marítimo) y líneas de conducción (DUCTOS).

Los yacimientos petroleros en la república están localizados en todo el territorio nacional, incluyendo las plataformas marinas, los más importantes se encuentran a lo largo de la costa del Golfo de México en los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche, en el altiplano se localizan algunos de menor importancia como en el estado de Coahuila y en la península de Baja California en los límites de los estados que la forman; las plataformas continentales que contienen yacimientos importantes están frente a las costas de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche.

Todos estos campos productores tienen sus centros de separación, pues por lo general el petróleo crudo viene asociado con gas e impurezas; de ahí pasa a los centros de refinación (Refinerías) donde se procesa para la obtención de subproductos, estos a su vez pueden tener otros procesos o bien directamente pasan a que se les incorporen substancias convenientes para su consumo y pasan a almacenarse para después ser transportados a las plantas de almacenamiento y distribución y de ahí directamente al distribuidor que se encarga de dotar al consumidor.

Las refinerías en México se localizan en las ciudades de Salamanca, Gto.; Reinos, Tamps.; Poza Rica, Ver.; Minatitlán, Ver.; Salina Cruz, Oax.; México, D.F.; Tula, Hgo. y Cadereyta, N.L., Cd. Madero, Tamps. como se puede apreciar en la figura 1, están cerca de los lugares de producción o de los principales centros de consumo, este ya sea directo o para exportación.

Los lugares de consumo son las ciudades principales, ya sea por su número de habitantes o por su industria o por consumo agrícola, y son las ciudades metropolitanas de México D.F., Monterrey N.L., Guadalajara Jal., También es importante mencionar que después de que se han hecho gasoductos, han surgido centros de consumo como cuencas industriales; un ejemplo de ello es Córdoba, Fortín de las Flores, Orizaba, Cd. Mendoza, Nogales en el estado de Veracruz y este mismo en el estado de Puebla, siguiendo la ruta a la Cd. de México; como regiones agrícolas se pueden contar todos los distritos de riego que a consecuencia de su producción surgen industrias agropecuarias, por último, cabe señalar lugares turísticos de gran consumo como Tijuana, B.C.N.

Para ilustrar lo anterior, en el plano (ver figura 1) se pueden observar con cierta precisión los lugares de producción y consumo unidos entre sí por ductos, los cuales forman corredores para poder transportar diferentes subproductos, el nombre del ducto proviene de la anteposición de la palabra que expresa el fluido que se transporta y siempre como sufijo ducto, así tenemos que para diferenciar uno de otro se les denomina: cuando transporta gas (gasoducto), crudo (oleoducto), diversos productos (poliducto) combustoleoducto, o simplemente cuando se transporta gas propano licuado (propanoducto)

Y así cada uno de los ductos de acuerdo a los productos o subproductos que transporta tiene mucha similitud, aunque algunas diferencias de construcción, lo cual ha formado una especialidad en el ramo de la construcción.

Actualmente podemos comprobar que el país es abastecido de combustible a través de una importante red de líneas de conducción de diferentes tipos y tamaños; existen desde poliductos de refinería de 50.8 mm. de diámetro (2") y pocos mts. de longitud hasta gasoductos de 1219.2 mm. de diámetro (48") como el Troncal del Sistema Nacional de Gas con 1329 km.

Podemos mencionar, como base substancial en el desarrollo de esta especialidad, la adecuación de materiales a las especificaciones API*. En un principio los fabricantes de tuberías imponían sus propias especificaciones en cuanto a resistencia de materiales, diámetros nominales, diámetros exteriores, tipos de soldadura etc., de manera que no había coincidencia entre una y otra fabricación, por lo que se vio la imperiosa necesidad de estandarizar las tuberías para unificar criterios y disponer de especificaciones homogéneas.

En la figura 1.1 se hace referencia a la distribución de ductos, refinerías y yacimientos en la República Mexicana.

1.2 ASPECTOS COMUNES Y ESENCIALES PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN DUCTO.

Las líneas de conducción deben construirse previa aprobación del proyecto por la entidad solicitante, en México es únicamente PEMEX.

El ingeniero realizará una inspección en todas las fases de la construcción, por lo que se recomienda, tenga la capacidad y experiencia necesaria para juzgar y decidir.

Es importante señalar que se deben tener conocimiento de los requisitos mínimos de seguridad para el diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección de tuberías de transporte, de acuerdo a las normas internacionales editadas por las siguientes organizaciones:

A.S.T.M.	American Society for testing Materials.
A.P.I.	American Petroleum Institute.
U.S.A.S.I.	United States American Standards Institute.
N.S.P.M.	Normas de Seguridad de Petróleos Mexicanos.

* El API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE) Dicta normas y especificaciones basadas, en el ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS) para todos los productos del mercado internacional que van a estar sometidos a esfuerzos especiales.

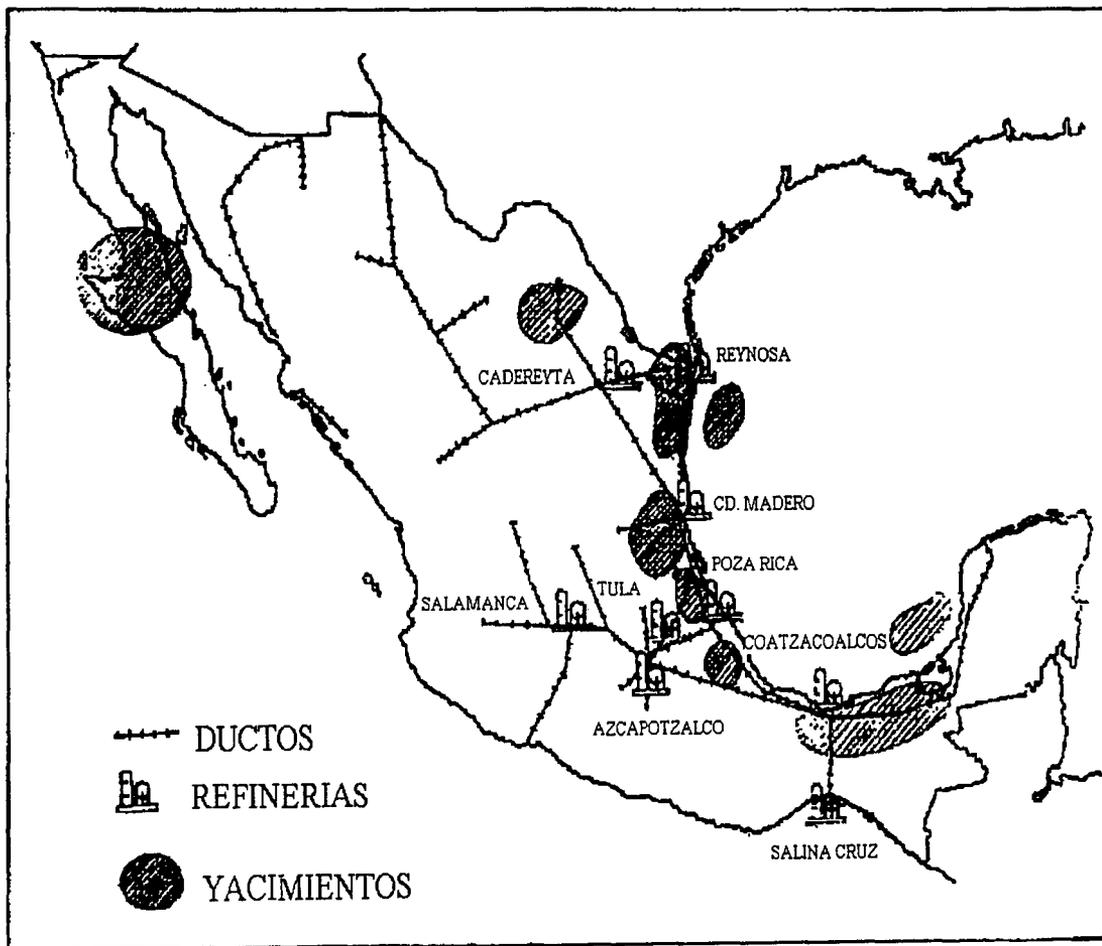


FIG. 1.1 DISTRIBUCIÓN DE DUCTOS, REFINERÍAS Y YACIMIENTOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA.

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE TRANSPORTE

Las tuberías de transporte se clasifican de la siguiente manera: Sistemas para transporte de hidrocarburos líquidos, para transportes de hidrocarburos gaseosos, y para transporte de productos químicos o petroquímicos, según el "American Petroleum Institute".

1.2.2 ACTIVIDADES PREVIAS A LA REALIZACIÓN DE UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE TUBERÍA DE TRANSPORTE

El proyecto de una tubería de transporte debe estar constituido por diferentes partes, desde su proposición, estudio económico, investigación de datos, diseño, etc., hasta planear y organizar todos los aspectos que presenta la construcción al grado de elaborar una ejecución teórica que debe desarrollarse en periodo práctico, y finalmente, un presupuesto que debe apegarse a costos reales.

ASPECTOS DEL PROYECTO

Técnico: este aspecto debe estar totalmente terminado (memoria descriptiva, diseño, especificaciones, diagramas de flujo, etc.) al ser recibido por el supervisor de la entidad solicitante.

Presupuestal: la elaboración del presupuesto de materiales (requisiciones necesarias) y del costo total de la obra (volúmenes de obra), deben también estar terminadas.

Legal: es necesario formular y legalizar el Derecho de Vía (ruta a seguir por el proyecto) habiéndose solucionado las afectaciones a terceros y tramitar la aprobación del proyecto ante las oficinas del gobierno.

Antes de iniciarse la primera fase, es fundamental realizar un minucioso recorrido por la zona, esto nos permitirá tener una visión real y concreta de los problemas prácticos a enfrentar, y así poder realizar un buen programa de obra.

EL recorrido es básico, pues destaca la cuantificación y descripción de las fases de construcción en la observación, y combinada con la experiencia se describe cada una de las fases que el ingeniero crea conveniente y se le adjudicará un porcentaje adecuado tomando en consideración tiempo, grado de dificultad, volumen, erogación, etc. En el recorrido podemos encontrarnos con material muy duro (roca) cuya grado de dificultad para excavar dependerá de la dureza, también se puede encontrar problemas de paso de la tubería en sembradíos propiedad de particulares con los cuales hay que negociar, esos y otros casos deben considerarse en el tiempo efectivo de construcción de la obra, por lo que influirán en el programa previo a la construcción, como se representa en el siguiente ejemplo:

EJEMPLO DE UN PROYECTO

LA DESCRIPCION COMPLETA DE LA OBRA

Programa de construcción del nuevo oleoducto 24" Diam. X 1031 kms de tubería nueva, Nuevo Teapa - Poza Rica - Madero - Cadereyta. Tramo del Km 50 + 000 al Km 100 + 000.

CONCEPTO

TIEMPO CONSUMIDO

1.- Relocalización del trazo	2%
2.- Permisos de cruces y Pago de Afectaciones	3%
3.- Descarga y distribución de materiales	2%
4.- Apertura de la brecha	15%
5.- Excavación de la zanja	17%
6.- Tendido y doblado de tubería	4%
7.- Soldadura	13%
8.- Protección Mecánica	15%
9.- Bajado y tapado	5%
10.- Obras Especiales	10%
11.- Construcción de Instalaciones	4%
12.- Prueba Hidrostática	3%
13.- Limpieza Interior	2%
14.- Limpieza y Reacondicionamiento del Derecho de Vía	4%
15.- Puesta en Operación	1%

El número que esta a la derecha del concepto es un porcentaje dado a cada una de las fases. Esto es de acuerdo a la realización teórica de la construcción de la obra en tiempo.

ACCESORIOS

En lo que se refiere a la construcción de líneas de conducción, además de tubería propiamente, se utilizan válvulas de distintos tipos, sus complementos como bridas, espárragos, empaques, etc., todos de calidad específica. Cuando se proyecta una línea de conducción al hacer el conteo de accesorios, se hacen conjuntos de una especie y se le aplica el número respectivo. Este número consta de cuatro dígitos (0000) y se le asigna el rango; de 4000 a 4999 a tuberías, complementos y aislamientos, que es el género de los materiales más comúnmente usados. Este es el número que como requisito establece Petróleos Mexicanos a nivel nacional y en los cuales se deben basar todos los involucrados en el proyecto de construcción, como supervisores, fabricantes, almacenistas, compañías constructoras, etc. para tener un acuerdo común.

A continuación se muestran los números de requisición de los accesorios más comúnmente utilizados:

De la 4000 a la 4099 Válvulas,
 De la 4100 a la 4199 Bridas,
 De la 4200 a la 4299 Conexiones,
 De la 4300 a la 4399 Conexiones Roscadas,
 De la 4400 a la 4449 Tuberías,
 De la 4500 a la 4599 Empaques,
 De la 4600 a la 4699 Espárragos
 De la 4800 a la 4899 Varios,
 De la 4900 a la 4999 Materiales de Recubrimiento,
 En el Rango de 6000 a 6999 Instrumentación..

Cada requisición consta de partidas y cuando se necesita pedir algún material, habrá de hacerse referencia de la requisición (número completo), partida, cantidad y la descripción correcta del material.

Por ejemplo:

Requisición P-924-53-01-4402

PART. 3
CANT. 120
UNID. MTS

DESCRIPCIÓN. Tubería de acero alta resistencia bajo carbono con recubrimiento interior tipo Epoxico-ducto-aminico con o sin costura en tramos dobles de 12 mts. (40 pies) y con extremos biselados para soldar, fabricada e inspeccionada de acuerdo con la norma API-STD-SLX, grado X-52, de 1321 mm. (52") de Diámetro.

El control de los materiales puede ser de varias formas, la más sencilla es hacer copias de las requisiciones y en esas se circula el material llegado, con un color, y el documento de llegada como: aviso de embarque, remisión o nota, etc., y en cuanto se entregue, poner el número del vale correspondiente, todos los documentos se archivarán cronológicamente para pronta referencia.

Como mencioné anteriormente, la obtención de los materiales es primordial en todos los sentidos de la obra, pues si no los hay, causa demoras y estas a su vez redundan en lo administrativo, lo cual resulta costoso.

1.3 CONSTRUCCIÓN

1.3.1 TRAZO

Generalmente, al iniciar una obra, el trazo proyectado por el personal de ingeniería se pierde debido a que en ocasiones existe un proyecto prolongado, entre el proyecto y la construcción de la obra, por lo cual las referencias (mojoneras, bancos de nivel, etc.) se destruyen o se pierden por ello, al autorizar la construcción se instalarán las referencias faltantes del trazo original.

El sistema usado para el trazo de líneas de conducción, consiste en el levantamiento topográfico, apoyado en el sistema de coordenadas de Punta Gorda (a cada 500 metros) y controlándola con orientaciones astronómicas (a cada 10 kilómetros).

La nivelación está dada en acotaciones cada 20, 40, ó 50 m, y nos servirá para calcular la prueba hidrostática de acuerdo a las condiciones del terreno ya que nos indicaran la potencia necesaria para levantar la presión del agua dentro de la tubería en dicha prueba.

CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN

Durante la construcción de tuberías de conducción se efectúan terracerías para disponer de lo siguiente:

- Derecho de Vía.
- Areas de almacenamiento de tubería.
- Brechas para accesos entre carreteras o ferrocarriles y el Derecho de Vía.
- Desviaciones en el que el Derecho de Vía resulte intransitable al equipo de tracción que no cuenta con orugas.

1.3.2. APERTURA DEL DERECHO DE VÍA

El Derecho de Vía puede definirse como la franja de terreno necesaria para operaciones de construcción y mantenimiento, con dimensiones que proporcionen la amplitud requerida para que dentro de su superficie se pueda hacer la brecha y dentro de ella se excave la zanja, se deposite a un lado el producto de la excavación, pueda depositarse la tubería del otro lado y pueda transitar el equipo de construcción en ambos sentidos. Ver fig. 1.2.

Antes de iniciar la apertura del Derecho de Vía es obligatorio proceder a verificar físicamente las líneas y/o instalaciones existentes, señalando con balizas rojas, letreros y otros señalamientos que permitan al constructor detectar oportunamente la existencia de tuberías en operación.

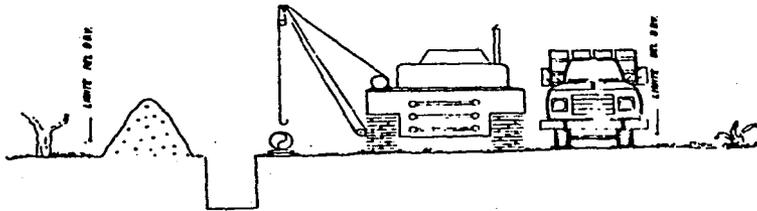


Fig. 1.2 El Derecho de Vía.

En todos aquellos lugares donde el Derecho de Vía cruce canales y arroyos deben ser instalados alcantarillados provisionales de un diámetro tal que no obstruya el paso del agua, evitando represamientos que puedan ocasionar problemas.

En las lomas se dejarán curvas verticales sin profundizar más, entonces puede hacerse la zanja conforme a la razante; ya que las curvas verticales poco pronunciadas se adaptan a un radio muy grande por la flexibilidad de la lingada (una tubería ya soldada). En el tema de doblado veremos con más detalle esa flexibilidad.

Donde los cambios de pendientes sean bastante fuertes se utilizará la dobladora.

El ancho del Derecho de Vía está determinado en las especificaciones particulares; estas deben formar parte de los planos de construcción, de acuerdo a las normas para diámetros:

- De 101.6 mm. A 203.2 mm. - 10 M. (De 4" a 8" - 10 M)
- De 254.0 mm. A 457.2 mm. - 13 M. (De 10" a 18" - 13 M.)
- De 508.0 mm. A 914.4 mm - 15 M. (De 20" a 36" - 15 M.)
- De 1066.8 mm. A Mayores - 25 M (de 42" a Mayores - 25 M.)

Con estas dimensiones queda bien definida la plantilla para el Derecho de Vía.

Para el proyecto de Derecho de Vía se toma en consideración que la tubería está hecha de materiales que permiten doblamientos fuertes sin que se altere de manera inconveniente su sección hidráulica (radio mínimo de 18 veces su diámetro de acuerdo al A.P.I.); esta facilidad permite proyectar curvas verticales y horizontales pronunciadas.

1.3.3. EXCAVACION DE LA ZANJA

Las tuberías de conducción se entierran para protegerlas de daños mecánicos a las que estarían expuestas si se encontraran al descubierto, y para protegerlas de cambios de la temperatura ambiente que les causarían dilataciones y sobre - esfuerzos no previstos. No se permite excavar la zanja, ceqa o trinchera, si el Derecho de Vía no está abierto y conformado. Esta fase se realizará, siempre antes del tendido de tubería.

1.3.3.1. PROFUNDIDAD

La experiencia ha demostrado que, para que resulte una protección eficiente, el espesor de la capa de tierra sobre la línea regular debe ser de acuerdo a la tabla anexa, el espesor en obras especiales es variable.

Para evitar sobre-esfuerzo en la tubería ésta debe reposar en todos sus puntos sobre el fondo de la zanja (ningún tramo debe quedar en banda). Para lograr ésta condición, resulta necesario que en muchos lugares el fondo deba ser profundizado para así nivelar y evitar reforzamientos de la tubería o exceso de dobleces de la misma debido a la maquinaria. La tabla 1.1 presenta las profundidades de excavación de la zanja.

LOCALIZACIÓN	PARA EXCAVACIÓN NORMAL	PARA EXCAVACIÓN EN ROCA USANDO EXPLOSIVOS O MEDIOS SIMILARES	COLCHON MÍNIMO PARA TUBERÍAS QUE TRANSPORTAN LPG.*
Áreas industriales Comerciales y Residenciales.	914.4mm : 90 cm (36 Pulg. : 90 cm)	609.6mm : 90 cm (24 Pulg. : 30 cm)	1219.2mm : 125 cm (48 Pulg. : 125 cm)
Cruzamientos de Corrientes y ríos.	1219.2mm : 125cm (48 Pulg. : 125 cm)	609.6mm : 90 cm (24 Pulg. : 30 cm)	1219.2mm : 125 cm (48 Pulg. : 125cm)
Zanjas de drenaje De caminos o ferro-Carriles.	914.4mm : 90 cm (36 Pulg. : 90cm)	609.6mm : 90 cm (24 Pulg. : 30 cm)	1219.2mm. : 125cm (48 Pulg. : 125cm)
Otras áreas Cualquiera.	914.4 mm : 90 cm) (36 Pulg. : 90 cm)	609.6mm : 90cm (24 Pulg. : 30 cm)	914.4mm. : 90 cm. (36 Pulg. : 90 cm.)

Tabla cortesía PEMEX

* Gas Licuado de Petróleo

Tabla 1.1. Profundidad mínima para la excavación de una zanja.

1.3.3.2 ANCHO DE LA ZANJA

Teóricamente el ancho mínimo de la zanja debiera ser igual al diámetro de la tubería, pero constructivamente es imposible sujetarse a esta dimensión. Cuando la tubería se coloca en la zanja lleva la protección anticorrosiva y este recubrimiento se daña fácilmente si roza con las paredes, lo que puede ocurrir durante el bajado. Bajo estas circunstancias, la zanja debe tener una amplitud mínima de tal manera que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- Que durante el bajado no se dañe el recubrimiento anticorrosivo.

b). Que se pueda excavar con maquinaria.

Las medidas de la zanja son en función del diámetro de la tubería que va a alojar.

El ancho resulta mayor que el de un rectángulo de las dimensiones mínimas, por dos razones:

- Maquinaria.

El ancho mínimo que establece cualquiera de las fórmulas, difícilmente coincide con el ancho de un bote de retroexcavadora ó con el ancho de un cangilón de zanjadora además el constructor generalmente no dispone de una variedad de equipo y debe cotizar en base al equipo con el que cuenta.

- Terreno Natural.

En terreno poco o nada cohesivo, la amplitud entre los bordes de la zanja siempre resulta mayor que la amplitud mínima del fondo por razón de la estabilidad de los taludes.

Generalizando, el ancho de la zanja debe ser treinta centímetros más que el diámetro de la tubería; como la profundidad no se puede definir, tomaremos la altura que hay entre el lomo de la tubería y la superficie del terreno natural, para mayor facilidad le llamaremos colchón.

De manera práctica por experiencia de campo se recomienda que en la línea regular el constructor programe el avance de manera que la longitud de la zanja terminada, adelante del frente de soldadura, equivalga por lo menos a cinco veces el rendimiento diario del frente de soldadura. También es recomendable que la zanja no adelante más de 10 veces el rendimiento diario del frente de soldadura. Con estas medidas se pretende que los trabajos de bajado de la tubería no resulten frenados por derrumbes que sobrevienen con el tiempo en la zanja.

1.3.4 CARGA, TRANSPORTE Y TENDIDO DE TUBERÍA

La carga, el transporte y el tendido de tubería consisten las siguientes operaciones básicas:

- Carga en el almacén donde se concentra la tubería proveniente de la fábrica, y que generalmente estará en alguna ciudad estratégica para la distribución posterior a lo largo de la línea, y además dicha ciudad deberá contar con las vías de comunicación para hacer llegar la tubería. Por ejemplo cuando se recibe la tubería para el tendido de una línea que se construirá a lo largo del Golfo de México, la tubería se puede distribuir por vía marítima en los puertos de Coatzacoalcos, Veracruz y Tampico.
- La transportación se hará, de diversas formas: mediante barcos, ferrocarril y vía terrestre con tractocamiones.
- La descarga en el Derecho de Vía y/o áreas de almacenamiento que la constructora haya predeterminado para ello.
- Tendido de los tubos a lo largo de la zanja.

TRANSPORTE DE TUBERÍA, VÁLVULAS Y CONEXIONES Y ACCESORIOS

Deben determinarse rutas entre las estaciones de Ferrocarril y los puertos y los diferentes tramos del derecho de Vía, tomando en cuenta las brechas de acceso.

Las válvulas se manejarán tomando todas las precauciones necesarias para no golpear las caras de las bridas o biseles, manivelas, vástagos y dispositivos lubricadores. Se evitará que penetre tierra o basura al interior de

las válvulas y en todo lugar donde se almacenen provisionalmente; cuando se trasladen al Derecho de Vía se depositarán sobre tarimas de madera.

Deberá inspeccionarse el funcionamiento y lubricación de las válvulas; las caras de las bridas y demás superficies pulidas de las válvulas se protegerán con una capa de grasa amarilla para evitar la corrosión.

En caso de que las válvulas tengan mucho tiempo expuestas a la intemperie, es necesario desarmarlas, revisarlas y lubricarlas.

Las válvulas así probadas deberán moverse lo menos posible hasta que se instalen definitivamente.

Los empaques de acero, de acero-asbesto en espiral y los de asbesto, no se sacarán de sus cajas sino hasta el momento en que se vayan a utilizar, y si fueran empaques almacenados con anterioridad, se revisarán verificando que se encuentren en buen estado.

Los espárragos, tuercas y accesorios menores, se manejarán y guardarán en cajas de madera, protegidos con aceite y no se sacarán de las cajas hasta el momento de usarse.

TENDIDO DE TUBERIA

El tendido de tubería se deberá efectuar cuando se haya excavado la zanja. Esta fase consiste en acomodar los tubos a un lado de la zanja, a lo largo, sin causarle daños, debiendo traslaparse entre 5 y 10 cms. y cuidando que la maniobra no provoque derrumbes a la zanja. Ver figura 1.3.

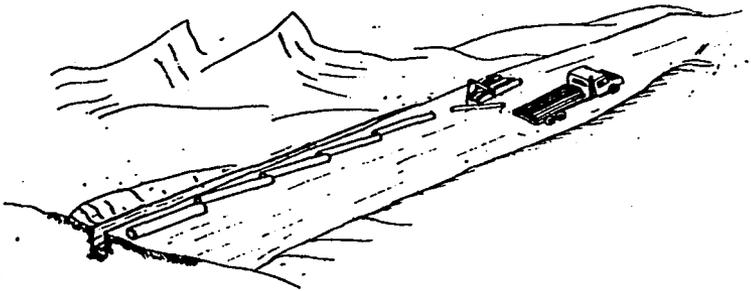


FIG. 1.3. TENDIDO DE TUBERIA

La precaución más importante es que no se dañe el cuerpo y el bisel, y esto se logra haciendo la maniobra adecuada, no golpeando la tubería entre sí, no dejándola caer, etc.; todo debe hacerse con mucho cuidado. El equipo de esta fase es exclusivamente de descarga, con tractor tiende tubos de giro horizontal y vertical y equipado con bandas de bajado de alta resistencia para soportar el peso del tubo.

OBSERVACIONES IMPORTANTES

En todo momento se tiene la obligación de inspeccionar la tubería para detectar daños como golpes, roturas, laminados, etc.

- No se deberá tender tubería en los tramos del Derecho de Vía en que se tengan que usar explosivos para la excavación de la zanja.
- Si el plan de trabajo incluye mayor transportación que tendido, deberá almacenarse la tubería en el lugar que se considere conveniente.
- Durante el tendido el constructor deberá mantener el Derecho de Vía en condiciones para facilitar el tránsito.

1.3.5. DOBLADO Y ALINEADO

1.3.5.1. DOBLADO DE TUBERÍA

Esta fase es la encargada de darle forma definitiva a la tubería cuando ésta se aloje en lugares donde la zanja obligue cambios fuertes de dirección, tanto horizontales como verticales. Debe hacerse en frío (está prohibido hacerse en caliente, para que el material no pierda sus propiedades mecánicas), ya que estas deben doblarse en campo inmediatamente después de calcular el cambio de dirección de la línea pero se cuidará que el tubo no se "chupe", es decir que no se forme una concavidad en el centro del doblé del tubo, también se debe cuidar que el ovalamiento que presente sea menor de 2.5% del diámetro nominal, que sea conforme a la zanja, y se dejará un mínimo de 1.80 m. En los extremos rectos; la costura o soldadura longitudinal no deberá quedar fuera ni dentro del doblé.

Para doblar la tubería se utiliza una máquina dobladora para diámetros de 203.2 mm. (8") o mayores, con dados (zapata) y mandril o solamente zapata. Con un "tractor tiende" tubos se monta el tubo en la dobladora y después lo deposita en el lugar destinado. La figura 1.4 muestra un tubo doblado mediante una máquina dobladora y la figura 1.5 se refiere a los elementos que conforman básicamente la máquina dobladora.



Fig. 1.4. MUESTRA DE COSTURA EN UN TUBO DOBLADO

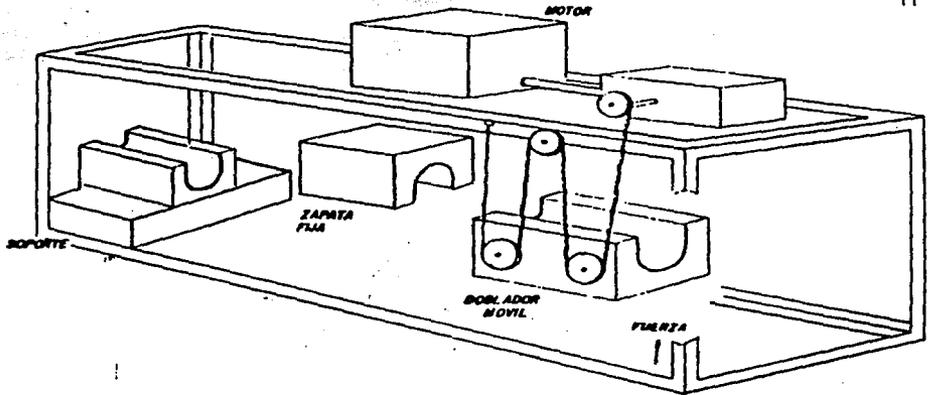


Fig. 1.5. ELEMENTOS DE UNA MAQUINA DOBLADORA

El hacer una curva con una de estas máquinas equivale a darle al tubo piquetes hasta la desviación deseada y en cada piquete se deberá conservar siempre el mismo radio

1.3.5.2 APLICACIÓN DE LA FUERZA AL TUBO

En curvas verticales y horizontales, como en el caso de una loma prolongada o curva de radio muy grande, la tubería no se dobla sino que, debe descansar sobre el terreno dada su flexibilidad. Es decir un tramo de tubos soldados (lingada).

Un tubo solo por propiedad física es bastante rígido, pero una lingada se vuelve flexible, esa flexibilidad es calculada prácticamente en el campo y depende del diámetro del tubo y del espesor de la pared.

En la figura 1.6 se muestra un tubo seccionado. Las secciones representan los piquetes (golpes) que debe dar la máquina dobladora al tubo para realizar una curva, basándose en la siguiente tabla.

DIÁMETRO NOMINAL DEL TUBO EN PULGADAS	RADIO MÍNIMO DE DOBLEZ EN DIÁMETROS
304.8 mm y Menores (12" y Menores)	18 - 457.2 mm
355.6 mm (14")	21 - 533.4 mm
406.4 mm (16")	24 - 604.6 mm
457.2 mm (18")	27 - 685.8 mm
20 y Mayores	30 - 762.0 mm

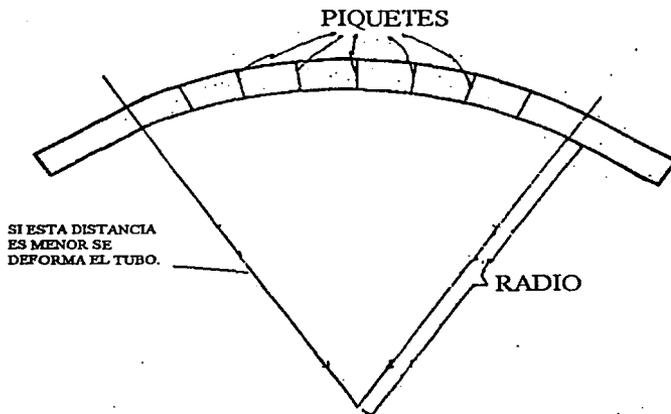


Figura 1.6 Golpes (piquetes) que aplica la máquina dobladora a un tubo.

Para ilustrar lo anterior en la figura 1.7 se muestra una lingada* de 304.8 mm \varnothing (12") con un espesor de 7.62mm. (0.300") de curvatura, donde hace una catenaria de cincuenta centímetros por cada tubo soldado en la lingada*.

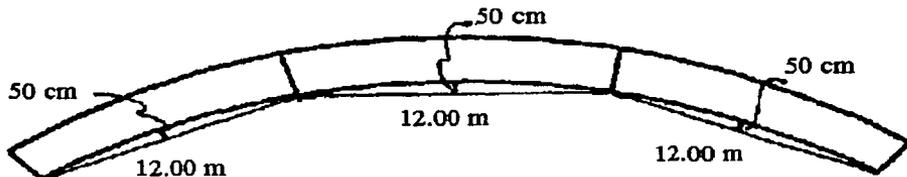


Fig.1.7 TRAMO DE TUBOS SOLDADOS (LINGADA)

1.3.5.3 LIMPIEZA DE BISELES

Delante de la cuadrilla de soldadura, va el equipo de limpieza de biselés, el bisel debe estar perfectamente limpio de impurezas a metal blanco (superficie metálica blanca después de ser limpiada por medios abrasivos), no deberá tener abolladuras ni ovalamientos; se limpia 25.4 mm. (1") de pintura interior. En la limpieza se pueden descubrir laminaciones, pues aparecen unas rayitas de color café donde el acero al laminarse se traslapa sin fundirse (no confundirla con la costura que presenta un cambio de color siempre metálico)

* El término lingada se utiliza, para referirnos a un tramo de dos o más tubos soldados p.ej. : lingada de dos tubos, lingada de 10 tubos etc.

La limpieza del bisel se hace por medios semi-mecánicos, por medio de una planta eléctrica; en la extensión conectada a dichas plantas se colocará un disco abrasivo.

El bisel completo tiene dos caras: la primera que va del exterior al centro a 30° y una segunda que es vertical (Ver figura 1.8).

No se permite biselar los tubos a mano, la tubería que se va construyendo debe ser colocada sobre apoyos, generalmente con polines de madera, o sacos rellenos de arena, dejando un claro mínimo de 40 cm. mínimo entre la parte baja del tubo y el terreno, a fin de tener espacio para finalizar el soldado, así como para ejecutar las fases de inspección radiográfica, reparación de soldaduras y protección mecánica (parcheo de juntas).

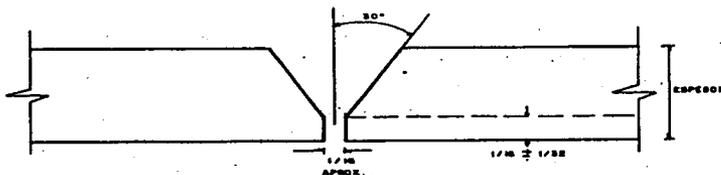


Fig. 1.8 CARAS DEL BISEL

Los tubos deberán quedar alineados circunferencialmente y colinealmente.

1.3.5.4 ALINEADO

La fase de alineado se efectúa después de que la tubería ha sido tendida y doblada en un tramo tal que la soldadura no alcance la fase anterior y se tenga un paro en la fase más costosa. Esta maniobra tiene como fin alinear los tubos bisel con bisel, con una separación adecuada para que pueda iniciarse la soldadura.

La condición del alineamiento es que estando los dos biseles limpios estén separados circularmente con la misma distancia y fijos para poder soldar. El espacio entre biseles debe ser de 1.58 mm. los tubos deberán de quedar alineados circunferencial y colinealmente (0.063").

1.3.6 SOLDADURA

La soldadura es la unión de dos piezas mediante fusión superficial, seguida de solidificación, de los puntos en que ambas se hallan en contacto, directamente o con interposición de una tercera materia más fundible.

La soldadura de tubos es una de las fases más importantes y a la que mayor atención se debe prestar durante la construcción del ducto, por constituir la continuidad de la hermeticidad y resistencia del mismo.

Por lo anterior en este trabajo de tesis se dedica un capítulo entero a este tema. Pero en ésta sección, generalizaré un poco sobre el tema, tan sólo para dar continuidad al proceso de construcción del ducto del que he tratado en el presente capítulo.

Para la fase de soldado, el ingeniero responsable debe basarse en la especificación API / 1104. Este estándar fue preparado por un comité formulador, el cual incluía representantes del Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute), Asociación Americana de Gas (American Gas Association), Asociación de

Contratistas de Líneas de Tuberías (The Pipe Line Contractors Association), Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society), Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos (American Society for Non Destructive Testing) y representantes y fabricantes de tubos e individuos asociados con industrias afines.

El propósito de ésta especificación es presentar métodos para la producción de soldaduras de alta calidad, mediante el uso de soldadores calificados; usando equipos, materiales y procedimientos aprobados. También es su propósito presentar métodos para la producción de radiografías de alta calidad para asegurar un análisis adecuado de la calidad de la soldadura con el uso de técnicos calificados, equipo y métodos aprobados.

Este norma está destinado para aplicarse a la soldadura con gas y de arco eléctrico de la tubería usada en la compresión, bombeo y transmisión de petróleo crudo, productos derivados del petróleo y gases combustibles y a los sistemas de distribución donde sea aplicable.

Los procedimientos de soldadura, así como los soldadores que ejecuten estas labores en el campo, deben ser calificados de acuerdo con lo que especifica la última edición del código ASME Boiler and Pressure Vessel Code, sección IX o por el estándar API-1104, Estándar for Welding Pipelines and Related Facilities. Los soldadores deben realizar las pruebas apegadas a los procedimientos establecidos. Llevándose a cabo al iniciar cada nueva obra y repitiéndose cada vez que cambien las condiciones que sirvieron de base para la calificación.

1.3.7 PROTECCIÓN MECÁNICA

Es sólo una parte de la protección anticorrosiva de una tubería, siendo la otra parte la protección catódica (tema de estudio en el capítulo 5). La función del recubrimiento es la de aislar eléctricamente el tubo minimizando así, el costo de mantener tal protección catódica, que de otra forma sería prohibitiva.

Es necesario ser muy estrictos en esta fase, pues la mayor frecuencia de fallas son debidas a la corrosión, las causas de éstas son factores que se descuidaron en su aplicación; la soldadura falla poco o muy poco porque se hace prueba hidrostática cubriendo las fallas posibles, sin embargo, en los recubrimientos no nos es posible descubrir donde podrá estar un punto de corrosión si no se hacen las pruebas de campo continuamente.

1.3.7.1 RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS

El uso de recubrimientos para el control de la corrosión de las estructuras metálicas se basa en el hecho de que, si dichas estructuras son aisladas del medio ambiente que las rodea la corrosión no podrá ocurrir. Por tal motivo, los recubrimientos deberán tener las siguientes características.

- a).- Buenas propiedades de aislamiento eléctrico.
- b).- Buena adherencia sobre las superficies metálicas en las que son aplicadas.
- c).- Buena resistencia a los agentes corrosivos. (agua, iones y gases)
- d).- Estabilidad de sus propiedades a través del tiempo.

Los recubrimientos son muy efectivos cuando se utilizan en forma adecuada, sin embargo, en la práctica han demostrado que por sí solos no son la mejor respuesta al control de la corrosión ya que con el tiempo se deterioran. Este hecho es el mejor argumento a favor de la aplicación complementaria de la protección catódica.

1.3.7.2 RECUBRIMIENTOS Y PROTECCIÓN CATÓDICA

La corriente necesaria para alterar el potencial eléctrico de una estructura metálica enterrada o sumergida, hasta niveles de protección, es una función expuesta al medio agresivo. De ahí que si con los recubrimientos se reduce considerablemente esa área, la corriente de protección registrará también una reducción importante que se traducirá en un ahorro económico por concepto de energía eléctrica. Esto se debe a que únicamente se requerirán proteger las pequeñas áreas metálicas expuestas al medio corrosivo que resulten de las deficiencias del recubrimiento.

En los últimos años, los trabajos de control de corrosión de tuberías y de todo tipo de estructuras metálicas enterradas o sumergidas, ha comprendido el uso de buenos recubrimientos y de protección catódica (VER CAPÍTULO 5).

1.3.7.3 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS

Existe en la actualidad una inmensa variedad de recubrimientos anticorrosivos, sin embargo solo nos ocuparemos de aquellos sistemas de recubrimientos que se han desarrollado para tuberías y otras estructuras susceptibles de ser protegidas catódicamente. Los sistemas más comunes son los siguientes:

a).- Sistema Primario - Esmalte - Enrollado (simple o doble)

Este sistema se usa ampliamente para recubrir tuberías enterradas. Consiste en la aplicación de una pintura base previa limpieza de tubería, la cual se aplica en forma de película a un espesor aproximado de tres milésimas de pulgada en película húmeda. El objeto de este "primario" es favorecer la adhesión del esmalte caliente que se aplica una vez que el citado "primario" se encuentra seco.

La temperatura del esmalte debe ser tal que permita su aplicación en forma de película continua a un espesor mínimo de 0.093", una vez que haya sido reforzado con una capa de fibra de vidrio en resina. Por lo general la temperatura está comprendida entre 200 y 240°C.

Simultáneamente con la aplicación del esmalte, la tubería se forra en forma de espiral con tela de fibra de vidrio en resina (vidroflex u otra semejante). Este forrado se hace con un traslape mínimo de ¼" y máximo de ¾" de modo que dicha tela queda embebida y centrada en el esmalte sin mostrar arrugas ni torcimientos.

Finalmente la tubería se envuelve con fieltro o revestimiento exterior (vidrio mate). La envoltura puede ser simple o doble dependiendo de las especificaciones particulares del caso.

Este procedimiento a la fecha ya tiene muy poca o casi nula aplicación debido a los nuevos recubrimientos líquidos epóxicos. (ver fig. 1.9)

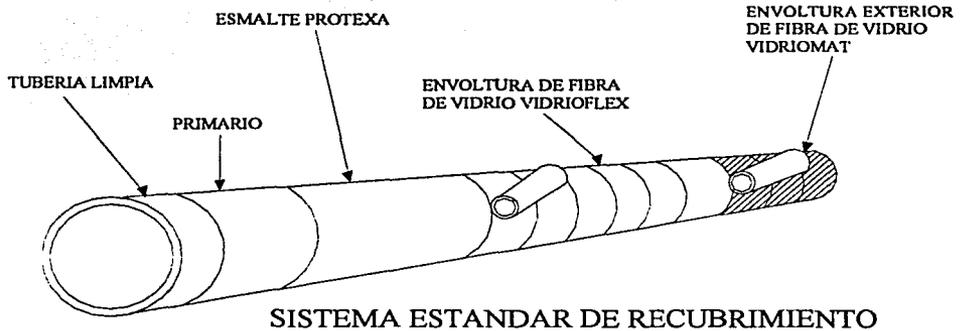


Figura 1.9 Recubrimiento Mecánico en una tubería del tipo Primario-Esmalte-Enrollado.

b).- Sistema epoxi – modificado con alquitrán de hulla.

Es en la actualidad el procedimiento aplicado en las nuevas líneas de conducción, por las propiedades mecánicas, fácil aplicación y costo.

Este sistema se usa en Petróleos Mexicanos en casi todos los tanques de almacenamiento y de deshidratación del petróleo crudo.

Estos recubrimientos combinan las propiedades de impermeabilidad de la hulla con la buena resistencia a los agentes químicos de la resina epoxi.

El sistema consiste en la aplicación previa limpieza de las superficies metálicas, de dos capas de recubrimiento epóxico modificado con alquitrán de hulla a un espesor final de película seca de 0.032" mínimo.

Los recubrimientos con líquidos epóxicos son curados a temperatura ambiente, consisten en dos fases de recubrimiento líquido epóxico termoendurecible, diseñado para proteger de la corrosión al metal pueden ser aplicados al aire libre en el campo con compresora.

CARACTERÍSTICAS

- Son 100% consistentes, no solventes.
- Alto rendimiento, más de 20 milésimas de pulg. (508 micras) en una aplicación.
- Razón de mezcla 1 a 1 ya sea por peso o por volumen.
- Aplicable ya sea con rodillo, brocha ó compresora.
- Alto nivel de adhesión
- Aplicable a temperaturas debajo de 13 grados centígrados.
- Larga duración.

PASOS GENERALES DE APLICACIÓN

- Remover el aceite, la grasa y otras partículas acumuladas en la superficie.

- Limpieza con chorro de arena sílica a presión (sand blasteo) hasta obtener una superficie casi blanca de acuerdo con NACE* No. 2
- Aplicar el recubrimiento líquido epóxico de acuerdo al espesor especificado.
- Inspeccionar visual o eléctricamente el recubrimiento, para hallar defectos.
- Reparar defectos.

La figura 1.10 ilustra el procedimiento de aplicación de este tipo de recubrimiento.

En tuberías de diámetro pequeño, especialmente en redes de distribución de gas u otros servicios, suele emplearse ciertos aislantes del tipo polyken (cinta plástica aislante), las cuales se enrollan a la tubería previamente limpia, en forma traslapada.

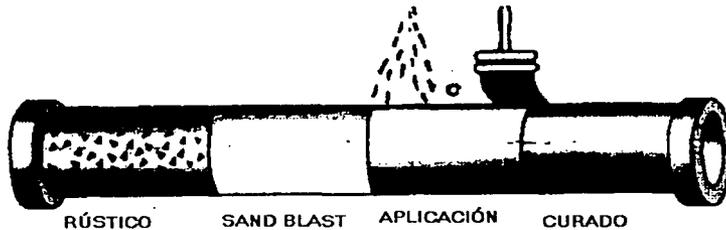


Figura 1.10 Aplicación de recubrimientos líquidos epóxicos.

1.3.7.4 PREPARACIÓN DE SUPERFICIES

Uno de los pasos más importantes para obtener un buen trabajo de recubrimiento, es la preparación propia de la superficie. Un recubrimiento no puede tener una fuerte adhesión sobre una superficie metálica por la presencia del aceite, humedad, escamas, etc., La presencia de los factores anteriores proporcionan un anclaje débil y causa la pérdida de adhesión. Las impurezas como el aceite o el agua pueden evitar la adhesión cuando están presentes aún en cantidades tan pequeñas como para ser invisibles. Además de evitar la adhesión, algunas impurezas como escamas o suciedad contribuyen al rompimiento por el paso del agua o a través de él, causando ampollamientos y corrosión bajo la película del metal.

El principal problema en preparar el acero para la aplicación de recubrimientos es remover completamente la escama de laminación y el óxido.

La escama de laminación es una capa dura de color negro azulado formada sobre las hojas de acero durante la manufactura. Frecuentemente se adhiere el acero nuevo estrechamente, pero generalmente se afloja con el tiempo, debido a diferencias en coeficientes de expansión.

Si un recubrimiento se aplica sobre una escama, éste llegará a aflojarse, puesto que la escama es más baja en la serie galvánica, acelera la corrosión del acero, por lo tanto debe ser completamente removida para obtener los mejores resultados.

*NACE (National Association of Corrosion Engineers.)

El óxido es familiar a quién nunca ha visto una estructura de acero protegida,. Varía en color, de rojo claro a café oscuro y puede ser flojo ó duro y quebradizo. Pero en cualquier caso proporciona un anclaje débil, contribuye al debilitamiento de un recubrimiento aplicado sobre él y favorece a la corrosión. Para los mejores resultados debe ser completamente removido.

El método a utilizar para la remoción de escamas y orín, es la limpieza con chorro de arena (sand blast).

1.3.7.5 LIMPIEZA CON CHORRO DE ARENA

La limpieza con chorro de arena es el mejor método a causa de que es efectivo para remover la escama y el orín, dejando una superficie áspera para proporcionar un anclaje para el recubrimiento.

La limpieza ideal con chorro de arena remueve completamente todo el orín y la escama, resultando una superficie de un color gris uniforme sin áreas negras enmohecidas o sombreadas. Sin embargo en la práctica, el grado a la cual la superficie se limpia con chorro de arena varía considerablemente dependiendo de la velocidad de la limpieza, cantidad de aire y tipo de abrasivo.

Dentro de los estándares establecidos para los diferentes niveles de limpieza, se encuentra el de limpieza a metal blanco que es seleccionado para la limpieza de tubería por ser el más efectivo, ya que todas las trazas de orín, escamas, pintura vieja y otra materia extraña son removidas produciendo un acabado gris uniforme.

1.3.7.6 ABRASIVOS PARA LA LIMPIEZA

Los diferentes tipos de abrasivos que se emplean, actúan de manera directa y producen tipos característicos de anclaje de superficie. El anclaje o perfil resultante de la limpieza es extremadamente importante en su efecto sobre el comportamiento del recubrimiento. Si la superficie es demasiado lisa no habrá un anclaje adecuado para el recubrimiento. Por otra parte si la superficie es demasiado rugosa, los picos del anclaje se proyectarán a través del recubrimiento y quedarán sin protección.

Algunos de los abrasivos más frecuentemente empleados y sus características son las siguientes:

Arena sílica

Disponibles en un amplio rango de grados y dimensiones de partículas, que van de la malla 8 a partículas muy finas que atraviesan la malla 80.

Ordinariamente la arena no debe ser más gruesa que la malla 16, o de lo contrario tenderá a golpear la superficie sin obtener pequeñas depresiones. En general los granos grandes no limpian tan rápido como los pequeños, aunque naturalmente hay un límite en que tan pequeños deben ser los granos.

Es también importante usar arena dura que no produzca exceso de polvo. La arena sucia y algunos tipos de arena limpia se rompen produciendo grandes volúmenes de polvo. Por tanto la calidad de la limpieza es inferior. Las arenas más eficientes y por tanto más económicas, son las cuarzosas o de sílice.

Granalla de Acero

Algunas veces empleada en lugar de la arena, la granalla es dura y de forma angular.

La granalla tiene varias ventajas sobre la arena, produce menos polvos, corta más rápido y puede reutilizarse. Sus desventajas son su alto costo y su tendencia a producir una rugosidad excesiva. La granalla gruesa dará un anclaje que produce picos en el metal. Cuando el recubrimiento se aplica, éste tiende a dejar

libres los picos del anclaje de modo que se requerirán manos extras de recubrimientos para obtener una película satisfactoria sobre tal superficie.

Además la granalla empleada en periodos largos en condiciones de humedad, tenderá a enmohecerse. En esta condición contaminará el acero.

De acuerdo con el Steel Structures Paint Council, la altura máxima del perfil producido por varios tipos de abrasivos es como sigue:

<u>ABRASIVO</u>	<u>DIMENSION MÁXIMA DE LA PARTÍCULA</u>	<u>ALTURA MÁX. DEL PERFIL.</u>
Arena muy fina	Retenida en malla 80	1.5 mils.*
Arena Fina	“ “ 40	1.9 “
Arena Media	“ “ 18	2.5 “
Arena Gruesa	“ “ 12	2.8 “
Granalla # G-50	“ “ 25	3.3 “
“ # G-40	“ “ 18	3.6 “
“ # G-25	“ “ 16	4.0 “
“ # G-16	“ “ 12	8.0 “

*Milésima de pulgada

Tabla 1.2. Tipo de abrasivos para limpieza, y altura máxima del acabado (perfil).

1.3.8 BAJADO Y TAPADO

1.3.8.1 BAJADO

En esta fase se efectúa el trabajo necesario para remover la tubería de los apoyos (polines, costales de arena, etc.), y colocarla en su posición final de la zanja; lo cual debe hacerse sin dañar el recubrimiento exterior (protección mecánica), soportando la tubería con bandas de tela para levantar grandes pesos.

Se recomienda se inicie por la mañana la operación de bajado, (salvo casos especiales), a estas horas la tubería está fría, por lo tanto contraída.

Se utilizan tantos tractores como sean necesarios para levantar y mover la tubería hasta el centro de la zanja para luego depositarla, en el fondo.

Durante el bajado se debe tener en consideración lo siguiente: La zanja debe estar bien preparada, ya sea con cama, sin aristas de roca o raíces, etc., no debe haber costales bajo el tubo o solo que estos estén seguidos sin dejar espacio. La protección mecánica no debe estar deteriorada, la tubería al bajar no debe estar torcida; la tubería debe estar descansada a todo lo largo de la zanja, sobre todo en las curvas verticales, si éstas no caen en su sitio, deberá corregirse.

1.3.8.2 TAPADO

El procedimiento de tapado es muy diverso dependiendo del tipo de material con el que se trabaje; lo normal es que un tractor con cuchilla frontal colocado en ángulo, se barra el mismo producto de la excavación que está a un lado de la zanja y caiga sobre el tubo, quedando una parte fuera, haciendo una pequeña loma, por lo que el mismo tractor le da unas pasadas arriba para compactar una pequeña porción casi superficial; a esta operación se le llama bandeo. En terreno rocoso no deberá bandearse.

Si el lecho es rocoso consecuentemente con lo que se tapará será roca, en tal caso se procederá a colocar, arriba de la tubería, un colchón de 10 cm ó más de material suave, para que al caer no dañe el recubrimiento o la tubería. También se colocan diversos materiales siempre y cuando cumplan con la función protectora. Ver figura 1.11.

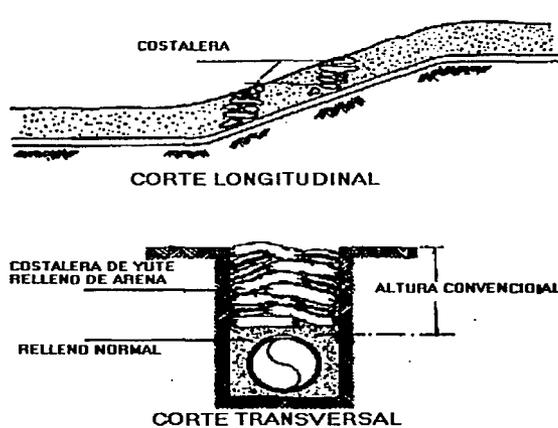


Fig. 1.11 Ilustración del bajado y tapado de tubería

1.3.9. PRUEBA HIDROSTÁTICA

La prueba hidrostática es una prueba general a toda la tubería ya colocada en su sitio, dependiendo de su longitud puede hacerse de tramo en tramo, también puede hacerse con cierta parcialidad, por ejemplo antes del lanzamiento de las lingadas en el cruce de un río se hace una prueba y posteriormente se tiene que efectuar otra ya cuando la tubería esté en su lugar, pues el lanzamiento obliga a mover la tubería y no se puede estar seguro de que la haya dañado algún medio mecánico o un esfuerzo que en el movimiento de lanzado la debilite.

La prueba consiste en levantar presión al agua con que previamente se ha llenado y que ésta actúe sobre las paredes internas de la tubería, constatando así, que la soldadura es buena y que la tubería instalada está dentro de los requisitos del proyecto, además se tendrá que demostrar que se ha llevado a cabo.

Como su nombre lo indica, se hace con agua y la presión debe permanecer estática cuando menos un lapso de 24 horas sin movimientos del agua como entradas, salidas o golpes de ariete, etc., salvo el caso ineludible de la discontinuidad de la presión producida por la temperatura.

La presión a que será sometida el agua y así la tubería, es determinada en el proyecto, lo mismo que la longitud máxima de la prueba, como también la diferencia entre la presión máxima y mínima (columna o diferencia máxima de nivel), que en este caso esa diferencia es agregada a la presión para que sea excluida en el punto más bajo, logrando así que no se pase de lo requerido y así tener una referencia mínima de la presión que puede soportar la tubería, para no excederse ya que puede llegar a reventar.

1.3.9.1 LIMPIEZA INTERIOR

La soldadura desprende bolitas de acero y escoria y en muchas ocasiones se quedan dentro de la tubería, polines, herramienta, ropa y otras cosas que obligan a efectuar una limpieza posterior; esta limpieza se hace con un empaque especial llamado diablo, el cual está constituido, por la naturaleza de su función, con cepillos para que rasque las paredes de la tubería en el caso de que no tenga pintura interior, o copas de hule para acarrear lo que deja el diablo de cepillos y el agua acumulada por condensación a lo largo de la tubería. Los elementos del diablo son esencialmente el empaque funcional de neopreno, en forma circular llamada copa y un alma de acero que lo estructura. Esta alma deberá ser del 90% del área correspondiente al diámetro interior de la tubería. (ver figura 1.12)

Se correrán los diablos de limpieza impulsados por aire en secciones de tubería colocando en el extremo, corriente arriba de la tubería, una trampa de diablo removible (hecha del mismo tubo) para alojar dicho diablo e introducirlo después a la tubería, y con las conexiones necesarias para inyectar aire a presión utilizando una compresora con la capacidad apropiada. Corriente abajo del tramo de la tubería, se debe colocar otra trampa receptora con un tubo perforado para que se expulse el aire que desaloja el diablo en la línea. Ambas trampas se soldan a la tubería y se cortan después para seguir utilizando las trampas en los tramos subsiguientes.

Esta corrida deberá ser hecha con precaución; al estar corriendo el diablo deberá haber trabajadores a lo largo de la línea que detecten su paso, ya sea en las instalaciones o excavaciones (sondeos) hechos previamente, para detectar con más o menos precisión en el lugar donde se pueda detener o atorar.

Si llegara a atorarse, deberá cortarse la tubería, sacar el diablo, reparar la tubería, anotar las causas que lo detuvieron y volver a correr el diablo.



Fig. 1.12 DIABLOS DE LIMPIEZA.- Con discos de Poliuretano en cada extremo.

1.3.9.2 LLENADO Y LEVANTAMIENTO DE PRESIÓN

Al llenar la tubería con agua después de la limpieza interior, debe correrse un diablo de copas para llenado, con esto se evitan burbujas de aire, lo cual es muy conveniente pues éstas provocan tardanza en la levatada de presión y variaciones en la gráfica de prueba hidrostática.

El agua debe ser dulce y limpia y el equipo de bombeo con que se efectúe el llenado deberá ser del gasto y presión adecuada.

La presión se mide colocando manómetros en ambos extremos de tramo del cual se está haciendo la prueba, esto comprueba el cálculo del proyecto de la misma y además se coloca en el extremo conveniente un manógrafo para que quede plasmado el desarrollo de la prueba.

Los manógrafos y el manómetro deberán ser calibrados, antes de la prueba por un laboratorio de instrumentación especializado, en donde extenderán un certificado de calibración. La prueba termina cuando se cierra la gráfica; se deja una hora más para que la coincidencia de las líneas sea más notoria.

La gráfica viene siendo el documento más importante de la obra, ésta forma parte del acta entrega del contratista. Después de la prueba, se quitan los instrumentos y se empieza a desfogar poco a poco hasta que se acabe la presión o se pasa el agua al tramo siguiente para aprovecharla en otro llenado; después se corre un diablo para desalojar el agua de prueba.

1.3.9.3 EJEMPLO DE CÁLCULO DE PRUEBA HIDROSTÁTICA

Una vez enterrada la tubería deberá probarse hidrostáticamente para verificar que no exista ninguna fuga, es decir probar la hermeticidad de las soldaduras para garantizar el funcionamiento seguro de la tubería una vez entrada en operación. Para llevar a cabo la prueba hidrostática se debe someter a presión una vez llenada de agua inyectando aire, mediante una bomba, dicha presión dependerá de ciertos factores que a bajo se describen con un ejemplo.

A continuación se muestra un proyecto de prueba hidrostática, donde se observan los datos a que se ha llegado en el cálculo, de ahí se checan en campo para observar los lugares indicados.

En lo que se refiere al suministro de agua, éste no necesariamente deberá estar en puntos elegidos o calculados. Pues puede llenarse desde cualquier lugar y en uno o más puntos donde el agua esté localizada.

Hay ocasiones en que al hacer una combinación para un cálculo de espesor o sacar la presión máxima a que puede someterse un tubo se utilizan fórmulas prácticas, para éste se dan algunas con la descripción de datos, constantes y factores.

$$P = \frac{2 S T}{D} \quad (\text{Fórmula de Barlow})$$

DONDE:

P = Presión en libras por pulgada cuadrada.

2 = Constante para S.

S = Resistencia mínima especificada a la cedencia en libras por pulgada cuadrada en tubería nueva y no usada; se tendrá cuidado de conocer sus especificaciones.

T = Espesor de pared de la tubería en pulgadas expresado en milésimas.

D = Diámetro nominal exterior en pulgadas.

Por supuesto que ésta no es la fórmula para diseñar la tubería porque para ello en la ingeniería utiliza más factores como:

F = Factor de diseño basado en la densidad de población.

E = Eficiencia de la costura longitudinal.

T = Factor que corresponde a la temperatura.

Entonces de acuerdo a los requisitos mínimos de seguridad para calcular la presión de diseño en función nominal de pared de un tubo deberá aplicarse la fórmula:

$$P = \frac{2 S T}{D} \cdot F \cdot E \cdot T$$

Se recomienda que el tramo a probar tenga una longitud de 30 kms. como máximo.

CAPÍTULO II

**TUBERÍA PARA TRANSPORTE
DE HIDROCARBUROS.**

Este capítulo tiene como objetivo establecer los requisitos mínimos para el diseño, selección de materiales y pruebas de tuberías, para el transporte de líquidos tales como el petróleo crudo, que es nuestro objetivo de estudio, pero no obstante estas aplicaciones también son válidas para la transportación de otros líquidos como, gasolina natural, gases licuados, amoniaco, anhídrido líquido, condensados y productos derivados de la refinación del petróleo.

2.1 CLASIFICACIÓN DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE

Las tuberías de transporte se clasifican de la siguiente manera: Sistemas de transporte de hidrocarburos líquidos, para transporte de hidrocarburos gaseosos, para transporte de productos químicos y petroquímicos.

Las combinaciones del carbono con el hidrógeno son muy numerosas, variadas e importantes. Ciertos hidrocarburos son gaseosos, como el metano; otros son líquidos como el benceno, y otros sólidos como el naftaleno. Los hidrocarburos se utilizan generalmente como combustibles y lubricantes, así como en la industria química. El petróleo y el gas natural no son sino mezclas de hidrocarburos.

La norma de "Sistemas de Transporte de Petróleo por Tubería" establece una cantidad mínima de requisitos que deben ser cumplidos en los materiales y en la ejecución de la obra, y deben ser verificados sobre la base de inspecciones para la determinación de aceptaciones o rechazos en ambos aspectos.

2.2 ESPECIFICACIONES

La información se indica de las especificaciones del API (Instituto Estadounidense del Petróleo). El tipo de tubería que se emplea más comúnmente, en las líneas para la conducción sobre distancias largas, de petróleo y de gas, es el de la serie API-5L X. Estas reglas tiene el significado siguiente:

5L - Especificación que corresponde para tuberías de conducción.

X- Designación de la calidad para tuberías de conducción de alta resistencia.

Los dos guarismos que van luego de la "X" corresponden a los primeros dos dígitos del límite mínimo de fluencia, expresado en lbs/pulg². Por ejemplo: X60 indica un límite mínimo de la fluencia de 60.000 lbs/pulg² (42,2 kg/cm²).

Otras especificaciones son:

5LS - Especificaciones para tubería de acero de línea, soldadura en espiral.

5LX- Especificaciones para tubería de línea, de alta prueba.

5LU - Especificaciones para tubería de línea, de alta prueba tratado térmicamente.

Para la fabricación de líneas se utilizan : tubos con costura longitudinal, tubos sin costura longitudinal y tubos con costura helicoidal.

2.3 DISEÑO

La selección de los distintos elementos que determinan el diseño de las tuberías están controlados por una serie de códigos y normas debidamente autorizadas que marquen las especificaciones para cada caso de diseño y que cubren en su totalidad todos los aspectos para una correcta selección y diseño de una tubería.

A continuación mencionaré algunos nombres y abreviaturas de códigos existentes:

American National Standard Institute	-----	ANSI
American Society of Mechanical Engineers	-----	ASME
American Society for Testing and Materials	-----	ASTM
American Petroleum Institute	-----	API
American Welding Society	-----	AWS
American Standard Association	-----	ASA

El diseño de tuberías para el transporte de hidrocarburos en su fase líquida debe considerar entre otros aspectos lo siguiente:

- a) Características físicas y químicas del fluido.
- b) Presión máxima de operación en condiciones normales de flujo.
- c) Temperatura máxima de operación.
- d) Especificaciones del material seleccionado de acuerdo con la TABLA 2.5 de éste capítulo.
- e) Cargas adicionales. En el diseño de tuberías deben considerarse las cargas que pueda preverse actuarán sobre la tubería, de acuerdo con las características de las regiones que atraviesa y las condiciones de trabajo, tales como:
 1. Cargas vivas como lo son el peso del producto (agua para efecto del cálculo), la nieve, el viento y otros.
 2. Cargas muertas como lo son el peso propio de la tubería, recubrimientos, rellenos, válvulas y otros accesorios no soportados.
 3. Sismos.
 4. Efectos causados por vibración y/o resonancia.
 5. Esfuerzos causados por asentamientos y/o derrumbes en regiones de suelos inestables.
 6. Efectos de contracción y expansión térmica.
 7. Efectos de los movimientos relativos de los equipos conectados.
 8. Esfuerzos por oleajes, corrientes marítimas y fluviales.
 9. Esfuerzos en cruces de vías de comunicación.
- f) Espesor adicional por desgaste o margen de corrosión.
- g) El derecho de vía debe ser seleccionado para evitar en lo posible, áreas de casas-habitación, edificios industriales y lugares de asamblea pública.
Ninguna tubería podrá ser localizada a una distancia menor de 15m (50 pies) de cualquier casa habitación privada, edificio industrial o área de asamblea pública, en el cual las personas trabajen, se congreguen o reúnan, a menos que se considere como mínimo una cubierta adicional de 30.48 cm (12 pulg)

La entidad que solicita el sistema de construcción de la tubería (en este caso PEMEX), debe proporcionar al constructor, el análisis químico del producto por transportar, además de los antecedentes operativos, de inspección y de mantenimiento de tuberías de transporte que operen con fluidos de la misma naturaleza o semejantes. Asimismo, es importante saber si el ducto transportará productos corrosivos, en este caso se indicarán las recomendaciones precedentes para prevenir su acción.

Estos antecedentes normarán el criterio del diseñador para seleccionar materiales, elementos de protección, margen de corrosión etc.

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOCALIZACIONES

El criterio que debe seguirse para determinar la clase de localización por donde pase una tubería de transporte de hidrocarburos líquidos, será el siguiente: la unidad para la clasificación de la localización será un área unitaria de 400 X 1600 m o sea 200 m a ambos lados del eje de la tubería en un tramo de 1600 m. La clase de localización se determinará por el número de construcciones que se encuentren en el área unitaria. Para fines

prácticos, cada casa o sección de una construcción, destinada para fines de ocupación humana o habitacionales, contará como una construcción por separado.

Localización clase 1. Es la tubería que tiene 10 o menos construcciones en un área unitaria; o en los casos donde la tubería se utilice en la periferia de ciudades, poblados agrícolas o industriales.

Localización clase 2. Es la que tiene más de 10 pero menos de 50 construcciones en un área unitaria de terreno.

Localización clase 3. Es aquella área en donde se cumpla con las siguientes condiciones:

- Cuando en un área unitaria existan 50 o más construcciones destinadas a ocupación humana o habitacional.
- Cuando exista una o más construcciones a menos de 100m del eje de la tubería y se encuentre ocupada normalmente por 20 o más personas.
- Cuando exista un área al aire libre bien definida a menos de 100m del eje de la tubería y ésta sea ocupada por 20 o más personas durante su uso normal, como sería un campo deportivo, un parque de juegos, un teatro al aire libre u otro lugar público de reunión.
- Cuando la tubería pase a 100m o menos de áreas destinadas a fraccionamiento o casas comerciales, aun cuando en el momento de construirse la tubería solamente existan edificaciones en la décima parte de los lotes adyacentes al trazo.
- Cuando la tubería se localice en sitios donde a 100m o menos haya un tránsito intenso u otras instalaciones subterráneas. Considerándose como tránsito intenso un camino o carretera pavimentada con un flujo de 200 o más vehículos en una hora pico de aforo.

Localización clase 4. Es aquella área unitaria donde prevalecen edificios de 4 o más niveles donde el tráfico sea pesado, o denso, considerando como tráfico intenso un camino o carretera pavimentada con un flujo de 200 o más vehículos en una hora pico de aforo; o bien, existan numerosas instalaciones subterráneas.

Cuando exista un agrupamiento o conjunto de construcciones destinadas a fines de construcción humana o habitacionales, que por su número pertenezca a una clase de localización definida de acuerdo con lo anterior, los límites de localización podrán ampliarse de la siguiente manera:

- Una localización clase 4, clase 3, y clase 2, se ampliará hasta 200m, siguiendo el eje de la tubería y contados a partir de los límites del área unitaria.
- Las localizaciones clase 1, clase 2, y clase 3 en que se encuentre una construcción donde se reúnan muchas personas, como sucede en escuelas, hospitales, iglesias, salas de espectáculos, cuarteles, etc., se deben considerar de la clase siguiente, en orden ascendente, y ampliarse hasta 200m en ambos sentidos de la tubería contados a partir de los límites del área unitaria.
- Debe tomarse un margen de 200 m en ambas direcciones de la tubería al determinarse los límites de un área clasificada, excepto cuando existan barreras físicas o factores de otra índole que limiten la expansión futura de las áreas pobladas, en cuyo caso los márgenes del área clasificada que deben ampliarse, quedarán delimitadas por dichas barreras, sin exceder la distancia marcada.

La tabla 2.1 contiene los factores por la clase de localización que se utilizan en muchas de las fórmulas de diseño.

Clase de Localización	Factor de Diseño
1	0.72
2	0.60
3	0.50
4	0.40

TABLA 2.1 FACTOR DE DISEÑO "FD" POR CLASE DE LOCALIZACIÓN

2.3.2 PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN

Es la presión máxima en cualquier punto de la tubería que pueda desarrollarse operando el ducto al 100% de su capacidad en condiciones de flujo regular, uniforme y constante; también debe tomarse en cuenta la columna estática sobre el punto considerado y la presión requerida para compensar las pérdidas por fricción.

2.3.3 PRESIÓN DE DISEÑO

Es el valor de la presión (P) usado en la fórmula de diseño (la cuál se analizará en el inciso 2.3.5) el cual debe ser mayor o igual a la presión máxima de operación en condiciones estables y ésta a su vez, debe ser mayor de 1.06 kg/cm² (15 lb/pulg²).

2.3.4 TEMPERATURA DE DISEÑO

Es la temperatura tomada como referencia para considerar la resistencia del material. Debe ser mayor o igual a la temperatura máxima de operación en condiciones estables y ésta a su vez debe estar comprendida entre 28.9 °C (-20°F) y 121.1°C (250°F)

2.3.5. ESFUERZO DE TRABAJO MÁXIMO PERMISIBLE

Es el valor de esfuerzo a la tensión más grande al que puede someterse una tubería, considerando su resistencia, la eficiencia de soldadura y las tolerancias de especificación, sin que sufra deformaciones permanentes. Este valor se manejará en la ecuación de diseño por presión interna y se calculará de la manera siguiente:

$$S = F \cdot E \cdot R$$

En donde

S = Esfuerzo de trabajo máximo permisible (lb/pulg²).

F = Factor de diseño (adimensional), basado en la densidad de población. De acuerdo a la sección de CLASIFICACIÓN DE LOCALIZACIONES que mencionará más adelante, será : 0.72 para clases de localización 1 y 2, y de 0.60 para las 3 y 4 según la tabla 2.1.

E = Eficiencia (adimensional), de la junta soldada de acuerdo con la tabla 2.2 (correspondiente a la tabla 402.4.3 del Código ANSI B31.4)

R = Resistencia mínima especificada a la cedencia (lb/pulg²), de acuerdo a la tabla 402.3.1 y 423.1 del Código ANSI B31.4 para materiales nuevos de especificación conocida y aprobada. En el caso de materiales usados de especificación conocida y aprobada o de materiales nuevos o usados de especificación desconocida, se asignará el valor de "R aplicable según la sección 2.7 de este capítulo.

Número de especificación	Clase de tubería	Factor "E"
ASTM A 53	Sin costura	1.00
	Soldado por resistencia eléctrica	1.00
	Soldado por traslape en horno	0.80
	Soldado a tope en horno	0.60
	Sin costura	1.00
ASTM A 106	Soldado (arco) por fusión eléctrica de paso sencillo o doble	0.80
ASTM A 134	Soldado por resistencia eléctrica	1.00
ASTM A 135	Tubo de acero soldado en espiral	0.80
ASTM A 139	Sin costura	0.80
ASTM A 211	Soldado por resistencia eléctrica	1.00
ASTM A 333	Soldado por arco sumergido doble	1.00
ASTM A 381	Soldado por fusión eléctrica	1.00
API 5L*	Sin costura	1.00
	Soldado por resistencia eléctrica	1.00
	Soldado por presión y calentamiento eléctrico (Flash)	1.00
	Soldado por inducción eléctrica	1.00
	Soldado por arco sumergido	1.00
	Soldado a tope en horno	0.60

* Esta especificación cubre también la API 5LX, 5LS, 5LV

TABLA 2.2 FACTOR DE EFICIENCIA DE JUNTA SOLDADA LONGITUDIAL "E".

2.3.6 ESPESOR MÍNIMO

El espesor mínimo necesario de la pared de un tubo, sometido exclusivamente a presión interna se calculará con la fórmula siguiente:

$$t = PD/2Sfd$$

en donde:

t = Espesor de pared mínimo requerido de un tubo sometido exclusivamente a presión interna (pulgadas)

P = Presión de diseño (lb/pulg²), de acuerdo con el inciso 2 de éste capítulo.

D = Diámetro exterior en pulgadas.

S = Esfuerzo de trabajo máximo permisible (lb/pulg²) de acuerdo con el inciso 4 de éste capítulo.

Fd = Factor de diseño (adimensional), basado en la densidad de población. Tabla 2.1.

Espesor mínimo requerido. Es el valor calculado con la fórmula señalada en éste inciso, incrementándose con las tolerancias obtenidas en el análisis y evaluación de los factores de diseño mencionados en los incisos d) al h) a principio de la sección V de éste capítulo el cual nunca será menor al indicado en la tabla 2.3. (correspondiente a la tabla 404.1.1 del código ANSI B31.4)

La suma de los esfuerzos longitudinales producidos por presión, cargas vivas y muertas y aquellos producidos ocasionalmente por vientos o sismos, no deben exceder de un 80% del valor de la resistencia mínima especificada a la cedencia del tubo. No es necesario considerar las cargas de viento y los sismos como si actuaran simultáneamente, pero se tomará en cuenta para éste cálculo el mayor valor del esfuerzo para cualquiera de estas condiciones.

El espesor mínimo requerido en una tubería conectada a un equipo u otra tubería, que opere con diferente presión, debe calcularse con la presión de diseño mayor que se tenga.

Diámetro Nominal (pulg)	Diámetro Exterior (Pulg)	Tubo de Extremo Plano	Tubo de Extremo Roscado	Estaciones de Compresión
1/8	0.340	0.037	0.088	0.119
3/8	0.675	0.041	0.091	0.126
1/2	0.840	0.046	0.109	0.147
3/4	1.050	0.048	0.133	0.154
1	1.315	0.053	0.133	0.179
1 1/4	1.660	0.061	0.140	0.191
1 1/2	1.900	0.065	0.145	2.200
2	2.375	0.075	0.154	0.218
2 1/2	2.875	0.083	0.203	0.203
3	3.500	0.083	0.216	0.216
3 1/2	4.000	0.083	0.226	0.226
4	4.500	0.083	0.237	0.237
5	5.563	0.083	0.258	0.258
6	6.625	0.083	0.280	0.280
8	8.625	0.125	0.322	0.322
10	10.750	0.156	0.365	0.365
12	12.750	0.172	—	0.250
14	14.0	0.188	—	0.250
16	16.0	0.188	—	0.250
18	18.0	0.188	—	0.250
20	20.0	0.219	—	0.312
24,26,28,30	24,26,28,30	0.250	—	0.500
32,34,36	32,34,36	0.312	—	0.500
38,40	38,40	0.344	—	0.500
42,44,46,48	42,44,46,48	0.438	—	0.562
52,56	52,56	0.500	—	0.625
60,64	60,64	0.625	—	0.625

Tabla 2.3 ESPESOR MÍNIMO NOMINAL DE PARED PARA TUBO DE ACERO (PULGADAS)

Margen de corrosión

El espesor adicional como margen de corrosión, lo determinará el diseñador en función de los resultados estadísticos que se tengan en los manejos de los productos, y de la eficiencia de los sistemas de prevención o control que se adopten, considerando la vida útil de la tubería de por lo menos 10 años.

Por lo anterior debe considerarse el estudio y diseño del sistema de protección catódica respectivo (ver capítulo 5).

2.4 CARACTERÍSTICAS Y REQUERIMIENTOS DE MATERIALES, INSPECCIÓN Y PRUEBAS

La tubería destinada al transporte de hidrocarburos en fase líquida, debe ser de acero. Todos los tubos conexiones y accesorios que vayan a instalarse, deben estar identificados como a continuación se indica: El

constructor de la línea debe llevar un registro de los tubos, conexiones, válvulas etc., que se usen en la construcción, anotando: especificación del material, número de pedido para su adquisición, proveedor o lote y número de serie en el orden de fabricación, así como su localización por pieza referida al desarrollo de la línea, entregando un juego de documentos a la entidad solicitante cuando se termine la construcción.

2.4.1 TUBOS DE ACERO

VENTAJAS DE LOS TUBOS DE ACERO

Resistencia a la tensión.

Los tubos de acero generalmente soportan esfuerzos de trabajo en la pared del orden de 1000 a 2000 Kgs/cm² lo cual permite que la relación Diámetro/Espesor sea más elevada, normalmente mayor de 100. La resistencia a la compresión es similar a la de la tensión.

Vida Útil

De acuerdo a referencias estadísticas existen líneas de tubería de acero instaladas con una vida útil de entre 80 y 100 años de servicio. Es fundamental al evaluar el proyecto compararlo con otros materiales.

Costo

En cuanto al tubo se refiere es necesario evaluar el costo total inicial, tomando en cuenta el trazo, complementándolo con la duración del servicio.

Los costos de instalación de tubería son más bajos ya que gracias al menor peso es más ágil la maniobra, las zanjas que se tienen que abrir son más angostas y el tiempo de instalación es más rápido por el menor número de juntas en campo. Otra ventaja que podemos adicionar es que el mantenimiento es más fácil y rápido, por lo tanto más económico.

Capacidad de conducción.

La capacidad de conducción en tubos de acero aumenta en función del incremento de la relación velocidad/presión de operación. Como dato informativo podemos comentar que el acueducto Minatitlán-Monterrey fue instalado en 1954 con una capacidad de conducción de 750 lts./seg.; sin embargo, ésta línea por necesidades de demanda operó hasta 1980 con una capacidad de 1200 lts./seg.

Ductilidad del acero

Los tubos de acero aceptan deformaciones de consideración sin fracturarse, adaptándose a la topografía del terreno, ahorrando longitud. Además se afirma que la tubería de acero es ideal para usarse en zonas sísmicas.

Condiciones de emergencia

Los tubos de acero poseen gran resistencia para soportar impactos, vibraciones, deslaves, golpes de ariete, etc.

Hermetismo en juntas

Debido a que la unión de los tubos de acero en campo se realiza mediante juntas soldadas, se logra un hermetismo total que elimina toda posibilidad de fuga en la línea de conducción.

Algunos posibles tipos de acero que se pueden utilizar son:

Acero al carbono. (Definición de "Steel Products Manual, Section 6, American Iron and Steel Institute"). Se acostumbra llamar acero, al acero al carbono, cuando no se especifica o requiere un contenido mínimo de aluminio, boro cromo cobalto, columbio, molibdeno, níquel, titanio, tungsteno, vanadio y zirconio, ni cualquier otro elemento agregado para obtener un efecto de aleación deseado. Además cuando la especificación mínima para el cobre no exceda de 0.4%, ni cuando el contenido máximo especificado de alguno de los siguientes elementos no exceda a los porcentajes anotados: Manganeso 1.65, Silicio 0.60, Cobre 0.60.

En todos los aceros al carbono se encuentran pequeñas cantidades de ciertos elementos residuales contenidos inevitablemente en la materia prima, que no se especifica o requieren, como cobre, níquel, molibdeno, cromo etc. Estos elementos se consideran imprevistos y normalmente no se determinan ni se reportan.

Acero aleado. Por costumbre se considera que el acero es acero aleado cuando se excede el límite máximo del porcentaje de contenido de uno o más de los elementos de aleación siguientes:

Manganeso, 1.65%; Silicio, 0.60%; cobre, 0.60%; o cuando se especifique o se requiera una amplitud definida o una cantidad mínima definida de cualquiera de los elementos siguientes pero dentro de las limitaciones reconocidas del campo de fabricación de los aceros aleados.

Aluminio, Boro, Cromo más del 3.99%, Cobalto, Columbio, Molibdeno, Níquel, Titanio, Tungsteno, Vanadio, Zirconio. O cualquiera otros elementos agregados para obtener los efectos de aleación deseados.

Criterio de selección.

Tubería nueva de especificación conocida. Los tubos, válvulas y conexiones nuevas de especificación conocida, destinados a integrar una tubería para transporte de hidrocarburos en fase líquida, deben satisfacer los requisitos de composición, comportamiento y calidad correspondientes a cualquiera de los materiales que se recomiendan en la tabla 2.5 correspondiente a la última edición del Código ANSI B-31.4

2.4.2 PRUEBAS PARA CALIFICACIÓN DE MATERIALES

Un estricto control de calidad se establece para el proceso de manufactura, para la selección de materia prima y para la aprobación de la tubería terminada.

Los procedimientos de inspección integrada se llevan a cabo en cada fase del proceso, unido a estándares nacionales e internacionales. El programa de calidad está de acuerdo con API especificación Q-1, la cual está incluida en la serie ISO 9000, garantizando la calidad total de la tubería, desde la recepción de la materia prima hasta el despacho del producto terminado.

En el inicio del proceso de producción cada placa es marcada, numerada y sujeta a una muy estricta inspección ultrasónica. Solamente placas libres de defectos son aprobadas y pasan a la siguiente operación.

Como la placa pasa a través de diferentes fases de producción hasta transformarse en tubo, los productos se someten a inspección ultrasónica y de rayos "x", inspección visual y prueba hidrostática. También se analizan sus propiedades químicas y físicas. El tubo terminado posteriormente se mide, se pesa y se almacena para esperar el embarque.

La inspección de tubos debe estar encaminada a comprobar el cumplimiento de las especificaciones al grado que exigen las condiciones y los medios apropiados en las obras como son :

- Verificación de cantidades
- Examen de marca
- Examen de especificaciones de diseño
- Examen visual determinante de los efectos de fábrica
- Examen visual determinante de daños de manejo

Prueba No. 1 Inspección visual.

Consiste en revisar cada uno de los tramos y accesorios antes y durante la construcción para asegurar que se encuentren limpios y libres de defectos o daños mecánicos originados durante su embarque, manejo, instalación anterior, etc., con el criterio siguiente:

- La revisión incluirá superficies interior y exterior, bisels, soldaduras, recubrimiento, rectitud, alineación, etc.
- Se considerarán defectos aquellas anomalías que disminuyan la resistencia o hermeticidad de la pieza inspeccionada, tales como pandeo, aplastamiento, picadura, grieta, deformación, quemadura, laminación, socavado, abolladura, junta longitudinal deficiente, etc.
- Los defectos deben eliminarse totalmente para considerar que la pieza se encuentra en buenas condiciones mecánicas.

Prueba No. 2: Determinación del espesor.

En tubos usados o nuevos cuyo espesor no sea uniforme, debe medirse en cada pieza el espesor de pared mediante el calibrador de precisión, en diferentes puntos del cuerpo del tubo, previamente efectuada la limpieza de las superficies.

En tubos nuevos cuyo espesor sea uniforme, debe medirse en la misma forma y en por lo menos en un 10% de los tramos, pero no menos de 10 piezas, los tramos restantes del lote deben medirse con un calibrador mecánico en posición fija.

Debe considerarse como espesor nominal del lote probado, al espesor nominal inmediato inferior calculado como promedio aritmético de todas las mediciones. El espesor calculado como promedio aritmético no debe exceder en 14% del mínimo encontrado, en el caso de diámetros menores a 50.8 cm (20 pulg) o en 11% del mínimo encontrado en diámetros iguales o mayores de 50.8cm (20pulg).

El espesor nominal determinado debe ser mayor o igual al espesor mínimo requerido de acuerdo con el inciso 2.3.5 de éste capítulo.

Prueba No. 3: soldabilidad.

La soldabilidad debe determinarse de acuerdo al procedimiento que se establezca, conforme a las especificaciones del procedimiento de soldadura API STD 1104, que estudiaremos ampliamente en el capítulo tres. Un soldador calificado debe tomar un tramo de tubo, cortar este en dos carretes, biselar, preparar la junta, soldar, obtener los especímenes y hacer las pruebas. La calificación de las soldadura debe hacerse con las más severas exigencias que se apliquen a una soldadura efectuada bajo las condiciones y procedimientos que se presenten en el campo. Los tubos se consideran soldables siempre y cuando cumplan con los requisitos establecidos en el API STD 1104.

Cuando menos una de estas pruebas debe hacerse por cada 100 tubos, si su diámetro es mayor de 10.16 cm (4 pulg); los tubos con diámetro de 10.16 cm (4 pulg) y menores, requieren una prueba por cada 400 tubos de acuerdo a la tabla 2.4

Diámetro exterior Del tubo (pulgadas)	Número mínimo de soldaduras a prueba.
Menor de 4	Una por cada 400 tramos
De 4 y mayor	Una por cada 100 tramos

TABLA 2.4 NÚMERO MÍNIMO DE SOLDADURAS A PRUEBA

ASTM	ASTM
A53 Tubo de acero negro y galvanizado y sin costura.	A559 Electrodo de acero para soldadura de arco metálico con gas.
A105 Forja de acero al carbón, para componentes de tuberías.	A671 Tubo de acero soldado por fusión eléctrica para temperatura atmosférica y menores.
A106 Tubo de acero al carbón sin costura para servicio de alta temperatura.	A672 Tubo de acero soldado por fusión eléctrica para servicio de alta presión y temperatura moderada.
A120 Tubo de acero negro y galvanizado para uso ordinario.	API 5L Tubo de línea.
A134 Tubo de placa de acero por fusión de arco eléctrico (para diámetros de 16 pulg. y mayores).	6A Equipo para cabezal de pozo.
A135 Tubo de acero soldado por resistencia eléctrica.	6D Válvulas para tubería.
A139 Tubo de placa de acero soldado por fusión (para diámetros de 4 pulg. y mayores).	1104 Estándares para soldadura de tuberías e instalaciones relacionadas.
A193 Materiales para tornillería de acero inoxidable y de aleación para servicio de alta temperatura.	RP5L1 Práctica recomendada para el transporte de tubos por ferrocarril.
A194 Tuercas para espárragos, de acero de aleación para servicio de alta aleación para servicio de alta presión y alta temperatura.	RP5L5 Práctica recomendada para el transporte marítimo de tubos.
A211 Tubo de acero soldado en espiral.	RP5L6 Práctica recomendada para el transporte fluvial de tubos.
A307 Sujetadores de rosca estándar exterior de acero al carbón.	ASME B2.1 Tubos roscados con sello seco.
A320 Materiales para tornillería de acero de aleación para servicio de baja temperatura.	B16.5 Bridas para tubos de acero y accesorios bridados.
A333 Tubo de acero con y sin costura para servicio de baja temperatura.	B16.9 Accesorios de fábrica de acero forjado para soldar a tope.
A354 Tornillería, espárragos y otros sujetadores roscados exteriormente de acero de aleación templado y revenido.	B16.11 Accesorios de acero forjado de embutir y soldar roscados.
A381 Tubo de acero soldado por arco metálico para servicio de alta presión.	B16.20 Ranuras y empaquetaduras de anillo para bridas de acero.
A449 Tornillos y espárragos de acero templado y revenido.	B16.34 Válvulas de acero, bridas o soldables. B18.2.1 Pernos y espárragos cuadrados y hexagonales. B18.2.2 Tuercas cuadradas y hexagonales.

TABLA 2.5 LISTA DE NÚMEROS Y TEMAS DE LOS ESTÁNDARES Y ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES UTILIZADOS EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE.

Prueba No.4 Ensayos de Tracción (Tensión)

Consiste en determinar el comportamiento de esfuerzo aplicado – deformación en un lote de tubos sometidos a tensión, de acuerdo con los procedimientos establecidos en las especificaciones API 5L, 5LS, 5LU ó 5LX.

Resistencia a la tensión. Se llama resistencia a la tensión al esfuerzo de tensión máximo que es capaz de soportar un material. La resistencia última ó máxima a la tensión se calcula con la máxima carga registrada durante una prueba de tensión que se lleva hasta la rotura, entre la sección original del espécimen.

El ensayo de tensión mide la resistencia de un material a la aplicación gradual de una fuerza tensora. Un dispositivo de carga se muestra en la figura (2.1); una probeta típica de un diámetro de 0.500 plg y una longitud de calibración de 2 plg. La probeta se fija en la máquina de ensayo de materiales y se aplica una fuerza F , llamada carga. Un deformímetro o extensómetro se usa para medir el alargamiento de la probeta entre las marcas de calibración cuando se aplica la fuerza.

La fuerza necesaria para producir un cierto grado de deformación es mayor si el diámetro de la muestra es mayor.

Los resultados de un ensayo simple pueden aplicarse a todos los tamaños y formas de probeta para un material dado si se transforma la fuerza a esfuerzo, la distancia entre las marcas de calibración a deformación. El esfuerzo y deformación de uso en ingeniería se definen mediante las siguientes ecuaciones.

$$\text{Esfuerzo} = \sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\text{Deformación} = \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Donde A_0 es el área original de la sección transversal de la muestra antes de iniciar la prueba, l_0 es la distancia original entre las marcas de calibración y l es la distancia entre las marcas después de aplicar la fuerza F .

La deformación (de uso en ingeniería) indica que tanto se deforma por cada unidad de longitud del metal para cierto esfuerzo aplicado. Si la pieza metálica tiene una longitud de 10 plg se multiplica la deformación (unitaria) por 10 para determinar el valor total de la variación de longitud de la pieza, suponiendo que se deforme uniformemente.

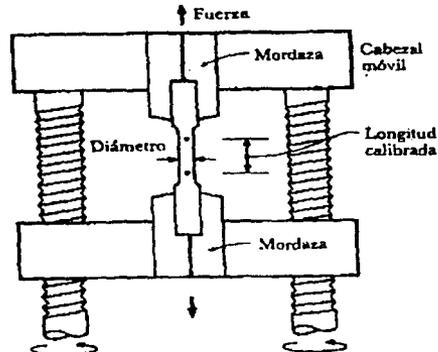


FIG. 2.1 Se aplica una fuerza tensora por medio del cabezal móvil a una probeta o muestra del material en el ensayo de tensión.

ESFUERZO DE CEDENCIA.

Se llama esfuerzo de cedencia sobre un material, al esfuerzo específicamente delimitado al desviarse la proporcionalidad lineal de los esfuerzos y las deformaciones (zona elástica). Se expresa en términos de deformación:

0.2% de la deformación por el método de llenado a presión y vaciado posterior.

0.5% de la deformación por el método de la extensión total bajo carga.

Límite de fluencia. Se llama límite de fluencia de un material determinado en prueba de tensión, a aquel en donde el esfuerzo aplicado ha llegado al máximo antes de que el material cambie de comportamiento elástico a comportamiento plástico. Debe hacerse notar que sólo los materiales que presentan el fenómeno de cedencia tienen un límite de fluencia.

Resistencia de fluencia mínima especificada, es la prescrita por la especificación del material de los tubos que se compran en fábrica.

El valor de la resistencia mínima especificada a la cedencia, aplicable en la fórmula 1 del tema 4 de este capítulo, se obtendrá de la manera siguiente:

- a) Tubería nueva de especificación conocida de acuerdo a la Tabla 2.6
- b) Tubos usados de especificación conocida, excepto ASTM A 120. De la tabla 2.6 si satisface los requisitos de prueba visual y de espesor de este capítulo.
- c) Tubos nuevos o usados de especificación desconocida o ASTM A 120. De cualquiera de los procedimientos que se describen a continuación:

1. El menor de los valores siguientes:

- a) El 80% del promedio aritmético de los resultados obtenidos en las pruebas de tensión establecidas en las especificaciones API 5L Y 5LU.
- b) El más bajo de las pruebas de tensión mencionadas en el inciso anterior, sin exceder de 3 662 kg/cm^2 (52 000 lb/pulg^2).
- c) 1 690 kg/cm^2 (24 000 lb/pulg^2) si la relación entre el promedio de resistencia a la cedencia y resistencia a la tensión excede 0.85.

2. De 1 690 kg/cm^2 (24 000 lb/pulg^2). Si no se llevan a cabo las pruebas de tensión establecidas en las especificaciones API 5L, y API 5LU.

ESPECIFICACIÓN	GRADO	TIPO*	RMEC (lb/pulg ²)
API 5L	A25	BW, ERW, S	25 000
API 5L	A	ERW, S, DSA	30 000
API 5L	B	ERW, S, DSA	35 000
API 5L	X42	ERW, S, DSA	42 000
API 5L	X46	ERW, S, DSA	46 000
API 5L	X52	ERW, S, DSA	52 000
API 5L	X56	ERW, S, DSA	56 000
API 5L	X60	ERW, S, DSA	60 000
API 5L	X65	ERW, S, DSA	65 000
API 5L	X70	ERW, S, DSA	70 000
API 5L	X80	ERW, S, DSA	80 000
ASTM A 53	Tipo F	BW	25 000
ASTM A 53	A	ERW, S	30 000
ASTM A 53	B	ERW, S	35 000
ASTM A 106	A	S	30 000
ASTM A 106	B	S	35 000
ASTM A 106	C	S	40 000
ASTM A 135	A	ERW	30 000
ASTM A 135	B	ERW	35 000
ASTM 139	A	EFW	30 000
ASTM 139	B	EFW	35 000
ASTM 139	C	EFW	42 000
ASTM 139	D	EFW	46 000
ASTM 139	E	EFW	52 000

TABLA 2.6 RESISTENCIA MÍNIMA ESPECIFICADA A LA CEDENCIA PARA TUBERÍA DE ACERO COMUNMENTE UTILIZADA EN SISTEMAS DE DUCTOS.

ESPECIFICACIÓN	GRADO	TIPO*	RMEC (lb/pulg ²)
----------------	-------	-------	------------------------------

(Concluye)

ASTM A 333	1	S, ERW	30 000
ASTM A 333	3	S, ERW	35 000
ASTM A 333	4	S,	35 000
ASTM A 333	6	S, ERW	35 000
ASTM A 333	7	S, ERW	35 000
ASTM A 333	8	S, ERW	75 000
ASTM A 333	9	S, ERW	46 000
ASTM A 381	Clase Y - 35	DSA	35 000
ASTM A 381	Clase Y - 42	DSA	42 000
ASTM A 381	Clase Y - 46	DSA	46 000
ASTM A 381	Clase Y - 48	DSA	48 000
ASTM A 381	Clase Y - 50	DSA	50 000
ASTM A 381	Clase Y - 52	DSA	52 000
ASTM A381	Clase Y - 56	DSA	56 000
ASTM A 381	Clase Y - 60	DSA	60 000
ASTM A 381	Clase Y - 65	DSA	65 000

TABLA 2.6 RESISTENCIA MÍNIMA ESPECIFICADA A LA CEDENCIA PARA TUBERÍA DE ACERO COMUNMENTE UTILIZADA EN SISTEMAS DE DUCTOS. (CONTINUACIÓN).

NOTA:

* ABREVIATURAS: BW-Soldado a tope en torno; ERW- Soldado por resistencia eléctrica; S- Sin costura; FW - Soldado por centelleo (Flash); EFW - Soldado por fusión eléctrica; DSA - Soldado por arco sumergible doble.

2.5 LA PRUEBA HIDROSTÁTICA (PRUEBA DE RESISTENCIA)

A la tubería para transporte de hidrocarburos líquidos, ya sea nueva, reparada o en condiciones diferentes a la del diseño se le debe probar hidrostáticamente antes de entrar en operación.

El agua que se utilice debe ser neutra o libre de partículas en suspensión que no pasen por una malla de 100 hilos por pulgada.

La presión de prueba debe ser aquella que produzca un esfuerzo tangencial igual al 90% de la resistencia mínima especificada a la cedencia correspondiente, y se calcula como sigue:

$$Ph = \frac{2 (0.90 R_c)}{D} t \quad \text{ó} \quad Ph = \frac{(1.8 R_c) t}{D}$$

En donde:

Ph = Presión de prueba en lb/pulg²

Rc = Resistencia mínima especificada a la cedencia en lb/pulg², multiplicada por E (eficiencia de junta soldada adimensional).

t = Espesor de pared en pulgadas, calculado con la fórmula correspondiente para un factor de diseño de 0.72.

D = Diámetro exterior en pulgadas.

Precauciones.

Durante la preparación y desarrollo de las pruebas, deben emplearse las técnicas y equipos adecuados para asegurar la protección del personal, del equipo y evitar daños a terceros, para lo cual debe cumplirse con los requisitos siguientes:

- a) Cuando la presión de prueba es capaz de producir un esfuerzo tangencial que exceda al 50% de la resistencia mínima especificada a la cedencia correspondiente, se debe mantener una supervisión más estrecha y con el mínimo número de personas dentro del área de prueba.
- b) Durante la prueba, debe mantenerse supervisión y vigilancia constantes a lo largo del tramo sometido a dicha prueba. La tubería debe probarse en las condiciones en que vaya a operar, ya sea enterrada o superficial.

Procedimiento.

Después de la construcción e inspección de una tubería, se correrán como mínimo tres escudos o tacos de cepillos y copas (diablos), con el fin de limpiar, desincrustar y eliminar rebabas de construcción en el interior de la línea.

1.- Terminada la limpieza, debe incrementarse la presión en la línea mediante el bombeo del fluido de prueba, hasta alcanzar la presión de la prueba de acuerdo a la fórmula.

2.- La longitud máxima de un tramo de tubería sometido a prueba será la que existe entre sus válvulas de seccionamiento; la diferencia de presión hidrostática entre los puntos de mayor y menor elevación del desarrollo no debe exceder del 10%.

3.- No debe usarse aire como fluido de prueba.

4.- Deben localizarse todas las fugas y fallas que ocurran mediante un método eficiente. Posteriormente, deben eliminarse y se repetirá el procedimiento.

5.- Después de alcanzar la presión de prueba debe seguirse el procedimiento siguiente:

- a) Registro de variaciones en la presión durante una hora.
- b) Abatimiento de la presión del sistema al 50%.
- c) Incremento de la presión hasta su valor de prueba, que se mantendrá durante 24 horas.
- d) Para la ejecución de la prueba hidrostática deben emplearse registros gráficos de presión y temperatura.

La prueba se considerará satisfactoria si las variaciones de presión registradas durante las 24 horas indicadas en el inciso c) son debidas a las variaciones de temperatura.

2.6 RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS PARA TUBERÍAS

El uso de recubrimientos para el control de la corrosión de las estructuras metálicas se basa en el hecho de que, si dichas estructuras son aisladas del medio ambiente que los rodea; la corrosión no podrá ocurrir. Por tal motivo, los recubrimientos deberán tener las siguientes características.

- a) Buenas propiedades de aislamiento eléctrico
- b) Buena adherencia sobre las superficies metálicas en las que son aplicados
- c) Buena resistencia a los agentes corrosivos. (agua, iones y gases)
- d) Estabilidad de sus propiedades a través del tiempo.

2.6.1 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS

Existe en la actualidad una inmensa variedad de recubrimientos anticorrosivos, sin embargo solo me ocuparé de aquellos sistemas de recubrimientos que se han desarrollado para tuberías y otras estructuras susceptibles de ser protegidas catódicamente.

Todas las pinturas y recubrimientos que se fabrican, constan de las siguientes componentes:

- a. Resina.
Este término se refiere al aglutinante o sólidos del vehículo componente de la pintura. Las resinas empleadas en los recubrimientos protectores son productos sintéticos tipo alquídico, vinílico, epóxico alquitrán de hulla, fenólico, etc. o alguna combinación de esas y otras resinas.
Los plastificantes se agregan para mejorar la retención de la flexibilidad, a medida que la película envejece, proporcionar resistencia al intemperismo o algunas otras características.
- b. Pigmentos y cargas.
En los primarios los pigmentos inhibidores son adicionados, para reducir o eliminar la corrosión ó eliminar la corrosión bajo la película.
Las cargas son sustancias de diversas composiciones físicas que incrementan la adherencia y reducen la permeabilidad de la película.
Los pigmentos inhibidores más ampliamente usados son el minio ú óxido de plomo, cromato de zinc, cromato de estroncio y otros tipos de pigmento de cromato. El mecanismo de los pigmentos inhibidores reacciona con la humedad, formando complejos químicos que tienen mayor resistencia química que el acero. Por consiguiente, las sustancias químicas los atacarán disminuyendo sus efectos antes que lleguen al acero.
- c. Solventes.
Los solventes son comúnmente usados para mejorar las características de aplicación de los recubrimientos; en otros casos para disolver las resinas (como las vinílicas) de manera que puedan ser aplicadas como recubrimientos líquidos.
- d. Agente curante.

El término agente curante se confunde muchas veces con el término catalizador. Químicamente un catalizador es un agente que promueve una reacción, pero sin intervenir en la reacción misma.

Los agentes curantes o catalizadores se emplean con resinas termofijas cuando se requiere un segundo componente, para obtener una película continua y químicamente resistente. Los ejemplos típicos son los poliuretanos, epóxicos y poliésteres.

El formulador tiene una amplia gama de resinas, pigmentos, cargas, solventes y agentes curantes, entre los cuales deberá elegir para producir un recubrimiento con las propiedades físicas y químicas requeridas y con las características apropiadas de aplicación, ya que aún el recubrimiento óptimo en todos los sentidos no es útil cuando no puede ser aplicado por métodos convencionales.

2.6.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS PARA TUBERÍAS

A) MATERIALES INORGÁNICOS

Recubrimientos vidriados.- Estos son aplicados en el taller directamente, teniendo una alta resistencia química, pero muy pobres propiedades físicas.

Recubrimientos de porcelana.- Este recubrimiento debe ser fundido directamente sobre la pieza a cubrir; tiene alta resistencia a las altas temperaturas, tiene propiedades físicas muy pobres.

Recubrimientos de Silicatos.- Los silicatos inorgánicos son usados como aglutinante para polvo del zinc. El recubrimiento resultante aplicado sobre el acero provee una protección similar al galvanizado en caliente. Los recubrimientos inorgánicos de zinc protegen por medio de una película, dando una resistencia química, así como también una protección galvánica.

Estos tienen una excelente resistencia al intemperismo, excelente resistencia al medio salino, sirven como un excelente primario para recubrimientos orgánicos y no son atacados por los solventes aún en trabajos en inmersión.

B) RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS

1. Tipo Termofijo

Las resinas termofijas, son aquellos polímeros que sufren una reacción química al pasar de la forma líquida, que es aplicada a la de una película sólida infusible.

Hay tres formas para que ocurra esta conversión:

- a.- Catálisis verdadera. Mediante el uso de un catalizador como se indicó anteriormente.
- b.- Reacción con una resina o agente curante
- c.- Reacción con oxígeno del aire.

Una ventaja notable del uso de resinas termofijas en recubrimientos es que por su bajo peso molecular, cuando están en forma líquida, tienen baja viscosidad, por lo que su aplicación es sencilla, y porque una vez curadas alcanzan tan alto peso molecular que su resistencia química es óptima.

A continuación se mencionan varios tipos de resinas termofijas:

1.- Resinas fenólicas

- a) Fenólicas sin modificar o de cadena recta. Estas resinas son duras, resistentes al ácido y son generalmente combinaciones de fenol y formaldehído. Como recubrimientos estos deben ser curados por horno.
- b) Epóxicos Fenólicos horneados. Las resinas mencionadas pueden ser modificadas con epóxicos para aumentar sus propiedades físicas. Los epóxicos fenólicos horneados pueden ser usados para recubrimientos de latas, tuberías y tanques de almacenamiento. Estos tienen la particularidad de tener una buena resistencia al agua tratada, a los álcalis y sales.

2.- Poliésteres

Los poliésteres son productos de la condensación de alcoholes polifuncionales y ácidos orgánicos polifuncionales.

Los poliésteres con resistencia química son usados para recubrimientos de pisos, tanques, tuberías y estructuras. La fibra de vidrio se emplea frecuentemente para reforzar las resinas poliéster.

3.- Epóxicos

Estas son el resultado de la polimerización de un reactivo bisfenol A con epícloridrina. Estas resinas pueden ser endurecidas por una amplia variedad de agentes curantes y las propiedades del producto final dependerá del agente curador, utilizado.

- a) Epoxi-amina. Los epóxicos catalizados con amina son duros, con una resistencia excelente a los álcalis, ácidos y solventes. Tienen un excelente anclaje a superficies limpias. Sus limitaciones son : pobre resistencia al intemperismo, porque calcan y se vuelven quebradizas.
- b) Epoxi-poliamida. Pueden ser formulados para tener resistencia al intemperismo, flexibilidad, brillo y dureza.
- c) Epoxi – alquitrán de hulla. El resultado hace que el recubrimiento tenga una excelente resistencia química, tiene gran uso en la industria marina, química marina y petrolera.
- d) Epoxi-poliéster.- Esta mezcla da por resultado un recubrimiento con excelente brillo y una razonable resistencia al intemperismo. Sin embargo la resistencia química es limitada.

5. Silicones

Las resinas de silicón son básicamente polímeros semi-inorgánicos, los cuáles contienen átomos de silicio con oxígeno o ligados con varios grupos orgánicos.

Sus propiedades generales son alta resistencia al calor, repelentes al agua y buenas características de intemperismo.

Su resistencia química se considera regular.

II. Tipos Termoplásticos

1.- Vinílicos

En general éstos vinílicos tienen buena resistencia a los ácidos y álcalis y excelente resistencia al agua, pero se reblandecen o disuelven por solventes orgánicos. La resistencia continua a la temperatura es de 65°C.

2.- Acrílicos. Poseen excelente resistencia al intemperismo y retención de brillo, buena flexibilidad y resistencia a la alta temperatura. Se emplean principalmente como acabados sobre sistemas químicamente resistentes.

3.- Hule Clorado. Este tipo de resinas se prepara por cloración del hule natural. Tienen excelente resistencia a una amplia variedad de sustancias químicas.

III. Elastómeros

Son recubrimientos elásticos que pueden ser estirados y deformados volviendo a su forma original, al cesar la fuerza que los deforma.

- 1.- Poliuretanos.
- 2.-Recubrimientos de butilo
- 3.-Hules de neopreno
- 4.- Polietileno Cloro sulfonado (Hypalon).

2.7 VÁLVULAS DE SECCIONAMIENTO

Las tuberías de transporte de hidrocarburos en fase líquida, deben contar con válvulas de seccionamiento, espaciadas como máximo 30 Km en localizaciones 1 ó 2 y 12 Km en clases 3 ó 4 de acuerdo con la clasificación que se indica en la sección de clasificación de tuberías de este mismo capítulo.

La localización de las válvulas de seccionamiento, antes mencionada se hará preferentemente en los lugares que por necesidades de operación sea conveniente instalarse, siempre que dicha distancia no exceda en 10% lo estipulado en esta sección las válvulas de seccionamiento deben localizarse primordialmente en los lugares siguientes:

- a) En las áreas de las estaciones de bombeo, regulación y medición.
- b) En la salida y llegada del ducto a las instalaciones.
- c) En lugares estratégicos desde el punto de vista de operación, mantenimiento y seguridad a lo largo del trayecto.
- d) En zonas pobladas.
- e) Antes y después del cruce de ríos, lagos y lagunas que de acuerdo al proyecto se requieran.
- f) Antes y después del cruce de fuentes de abastecimiento de agua para el consumo humano.
- g) El diseñador debe considerar la instalación de otro tipo de válvulas como lo son las de retención, colocadas junto a las de seccionamiento.
- h) En el caso de las líneas de conducción de líquidos con perfiles pronunciados (ascendentes o descendentes), preferentemente cerca de centros de población, debe prevenirse el desalojo del contenido del ducto en caso de fugas. Por ejemplo mediante la instalación cuando sea posible de válvulas de retención antes de la válvula de seccionamiento accionadas por actuador para una rápida operación. En cualquier caso, la ubicación de las válvulas deberá ser tal que tome en cuenta la seguridad pública y que además no se rebase por carga hidrostática la presión interna de la tubería y la capacidad de presión de los componentes del ducto.

Las válvulas de seccionamiento en tuberías de transporte deben reunir las características siguientes:

- a) Ser lubricables, de paso completo y continuado, y contar con accesorios que faciliten su mantenimiento.
- b) Estar ubicadas en lugares accesibles y protegidas de daños que pudieran producir agentes externos.
- c) Contar con mecanismos para accionarlas rápida y fácilmente. De preferencia aquellas de 12 pulgadas y mayores, accionadas por un dispositivo que en caso de falla, de éste permita su operación en forma manual.
- d) Estar debidamente soportadas y anclar la tubería para evitar esfuerzos.
- e) La clasificación presión-temperatura de la válvula, debe ser igual o mayor a las condiciones de diseño de la tubería.

CAPÍTULO III

SOLDADURA

3.1 CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN

En el capítulo I que habla sobre las generalidades de la construcción de un oleoducto, se puntualizó la importancia del procedimiento de soldadura por ser una de las fases más importantes, ya que constituye la continuidad de la hermeticidad y resistencia del oleoducto.

También he mencionado, que para que la calidad del oleoducto sea aceptada a nivel mundial, existe un estándar a la cual tiene que apegarse el constructor de una línea de conducción de petróleo o derivados. Este estándar fue creado por un comité formulador que incluye al Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) y otras instituciones afines a la industria del petróleo (ver capítulo I), el estándar API-1104.

Por lo anterior he considerado que el procedimiento de soldadura y la inspección de la calidad de la misma, deberían ser abordados en un capítulo aparte.

3.2. DEFINICIONES DE TÉRMINOS

3.2.1 PROCESO DE SOLDADURA

La soldadura se define como un proceso para la unión de dos partes metálicas mediante la aplicación de calor con o sin el uso de metal de aporte y con o sin el uso de presión. Esta definición abarca todos los procesos individuales de soldadura utilizados industrialmente.

La soldadura se emplea donde quiera que se desee una unión íntima entre dos piezas metálicas y ha sustituido casi por completo los antiguos métodos de remachado en la construcción de puentes, barcos, calderas, edificios, etc.

Las ventajas evidentes de la soldadura con el estado actual de la tecnología ha llevado a exigir esfuerzos cada vez mayores a una unión soldada. De hecho actualmente se diseña bajo la premisa de que una soldadura resiste tanto o más que el metal base.

Realmente se puede conseguir que una soldadura resista tanto o más que el metal que une si se logran reunir las condiciones siguientes:

1°. El metal de aporte es el adecuado de acuerdo al metal base que se va a unir.

2°. La soldadura se efectúa siguiendo la especificación de un procedimiento que haya demostrado previamente ser capaz de producir una soldadura con las propiedades requeridas (profundizaré este tema más adelante).

3°. La soldadura la aplica un soldador calificado que haya demostrado previamente tener la habilidad necesaria para producir una soldadura sana siguiendo un procedimiento calificado.

Para fines prácticos de este trabajo de tesis sobre líneas de conducción, el proceso de soldadura quedará entendido como la unión mediante juntas soldadas de todos los tramos de tubería que constituyen la línea de conducción. El trabajo de soldadura se realiza en su totalidad por el procedimiento manual de arco eléctrico con electrodo metálico consumible protegido. Los diferentes tramos de tubería que forman la línea de conducción, así como los accesorios, válvulas y conexiones, se soldarán a tope, cada uno con el tramo de tubo o accesorio siguiente, para formar una tubería de conducción continua de un extremo a otro.

3.2.2 PROCESO DE SOLDADURA DE ARCO ELÉCTRICO PROTEGIDO CON ELECTRODO RECUBIERTO

Es el método comúnmente empleado en soldadura de campo y en el cual se usan generadores de corriente continua, impulsados por motores eléctricos para suministrar la corriente para soldar.

Este es el procedimiento de soldadura más empleado en campo, en forma casi exclusiva por su versatilidad de aplicaciones y por sus mínimos requerimientos de equipo especializado.

El metal de aporte es una varilla de acero y es el electrodo, y tiene un recubrimiento que cubre casi la totalidad del alambre, excepto el extremo por el cual se hace contacto para la transmisión de corriente. El recubrimiento del electrodo al entrar en combustión produce gases que rodean y así protegen la zona de fusión para evitar la oxidación que produce el oxígeno del aire, además el recubrimiento actúa como fundente y en algunos electrodos contiene polvo de hierro que contribuye a aumentar el volumen del aporte.

En otras palabras es un proceso de soldadura donde la fusión entre el electrodo del metal de relleno (consumible o aporte) y el metal de la pieza de trabajo (metal base) se logra por medio del calentamiento producido por el arco eléctrico que se forma entre ambos metales. El arco y los metales fundidos son protegidos de la atmósfera por las emanaciones gaseosas producidas al fundirse el recubrimiento (ver figura 3.1).

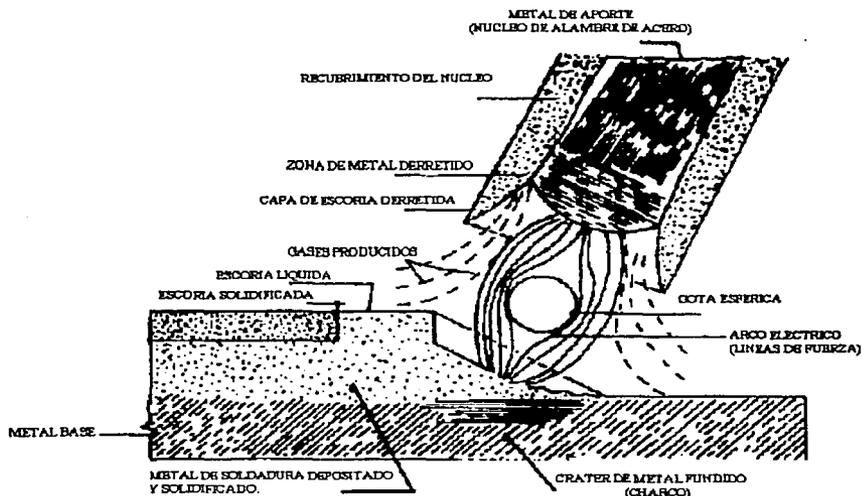


FIG. 3.1. SOLDADURA DE ARCO ELÉCTRICO
PROTEGIDO CON ELECTRODO RECUBIERTO

3.2.3 EQUIPO DE SOLDAR

Las máquinas de soldar serán del tipo de corriente directa, con una capacidad mínima de 300 amperes en el sistema manual. Los accesorios como cables y portaelectròdos, son del tipo y tamaño adecuados para el trabajo, y deben de estar todo el tiempo en buenas condiciones para asegurar soldaduras de buena calidad, continuidad de operación y seguridad para el personal. Los cables para soldar son del calibre "00" (dos ceros) para máquinas de 300 amperes, con procedimiento manual.

3.2.4 SOLDADOR CALIFICADO

El término "soldador" significará la persona ejecutando la soldadura.

El término "Soldador Calificado", significará un soldador quien ha demostrado su habilidad para producir soldaduras que reúnan los requerimientos del estándar API 1104, como son examinación visual, calificación del soldador por ensayo destructivo y calificación del soldador por radiografía. Estos procedimientos de calificación de soldadores los detallaré más adelante.

3.2.5 CORDONES DE SOLDADURA

Una vez hecha la limpieza del bisel (ver capítulo 1) y dependiendo del espesor de la pared de la tubería (cédula), los soldadores deberán ir aplicando, el número de cordones necesarios en la totalidad del perímetro de los dos tubos que se van a unir. Se coloca un soldador en cada extremo de la tubería, para que cada uno aplique los cordones de manera simultánea al cincuenta por ciento.

Ambos soldadores empezarán en la parte superior de la tubería e irán avanzando hasta la parte inferior, recorriendo cada uno la mitad del perímetro por lo que tendrán que soldar en diferentes posiciones. (Ver fig. 3.2)

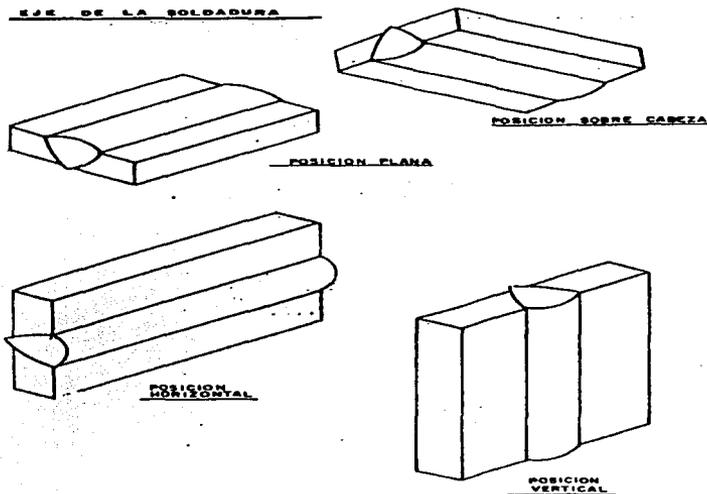


Fig. 3.2. Posiciones que adopta un soldador al ir depositando los cordones a lo largo del bisel.

Cordón de Fondo (o de Raíz)

El término "Cordón de fondo", se usa para el primer cordón, el cual une inicialmente dos secciones de tubo, una sección de tubo a un accesorio o dos accesorios.

El cordón de fondo es depositado con exceso de corriente con el fin de lograr una penetración completa. La limpieza de este cordón de soldadura se limita a limpiar la capa de escoria que lo cubre.

Desde el momento en que se termina de depositar el fondo, puede dejar de sujetarse la lingada para proceder a la limpieza y posteriormente el cordón del "paso caliente".

Cordón de " Paso Caliente"

La escoria incrustada entre el primer cordón y el material base es removida por el segundo cordón, que también es depositado por dos soldadores simultáneamente opuestos; este segundo cordón se denomina "paso caliente" y debe ser depositado también con un exceso de corriente, con el fin de lograr una mayor penetración del arco y fundir las orillas del primer cordón; para facilitar el flujo de la escoria ahí atrapada hacia la superficie, la cual no fue removida por medios mecánicos.

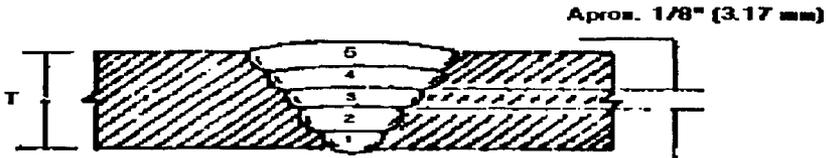
Es bueno depositar inmediatamente el paso caliente para aprovechar el calor residual del fondo; esto elimina roturas bajo cordón; el paso caliente también proporciona resistencia adicional, necesaria para la unión antes de depositar los cordones del relleno.

Cordones de " Relleno y de Acabado o Vista"

El número de cordones de relleno debe ser tal que la soldadura completa tenga una sección transversal sustancialmente uniforme alrededor de toda la circunferencia del tubo. En ningún punto la superficie de la corona debe estar debajo de la superficie exterior del tubo, ni debería elevarse sobre el metal base por más de 1/16 pulg. (1.59mm). El número especificado de cordones puede ser hecho por soldadores de acabado.

La cara de la soldadura completa debería ser aproximadamente 1/8 pulg. (3.17mm) mayor que el ancho de la ranura original. La soldadura completa debe ser totalmente cepillada y limpiada.

El primer cordón deberá estar apropiadamente fundido y penetrar completamente el espesor de la pared del tubo a lo largo de ambos lados del bisel. (ver figura 3.3)



- 1.- Cordón de Fondo o de Raíz.
 - 2.- Cordón de Paso Caliente.
 - 3.- Cordón de relleno.
 - 4.- Cordón de relleno.
 - 5.- Cordón de Vista.
- T - Espesor.

FIG. 3.3 CORDONES DE SOLDADURA

3.3. CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Antes del inicio de una soldadura de producción, debe establecerse y calificarse una especificación del procedimiento detallada, para demostrar que por este procedimiento pueden ser ejecutadas soldaduras que tengan propiedades mecánicas apropiadas. La calidad de las soldaduras debe ser determinada por ensayos destructivos y no destructivos.

Deben ser registrados los detalles de cada procedimiento calificado. Este registro debe mostrar los resultados completos del ensayo de calificación del procedimiento. Estos registros deben mantenerse tanto tiempo como el procedimiento esté en uso.

3.3.1 ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

La especificación del procedimiento debe incluir lo siguiente:

A) Proceso:

Identifica el proceso específico utilizado, ya sea manual, semiautomático o automático o alguna combinación de éstos.

B) Material del Tubo y de Accesorios:

Identifica el material al cual se aplica el procedimiento. Los materiales API STD. 5L, API STD 5LS, API STD. 5LX y aquellos que cumplan con los requerimientos ASTM, pueden ser agrupados, previendo que el ensayo de calificación sea hecho en el material que exhiba el máximo punto de cedencia mínima en el grupo.

Para el propósito de las líneas de conducción, todos los aceros al carbono se agrupan como sigue (según el API-1104)

- (i) De esfuerzo de cedencia mínimo especificado de 42,000 psi (289.58 Mpa) o menos.
- (ii) De esfuerzo de cedencia mínimo especificado de más de 42,000psi (289.58 Mpa), pero menores de 65,000 psi (448.16 Mpa).
- (iii) Para esfuerzo de cedencia mínimo especificado de 65,000 psi (448.16 Mpa) o más, (cada grado debe requerir un ensayo de calificación separado).

NOTA: La clasificación anterior, no implica que todos los materiales de tubo dentro de algún grupo puedan sustituir indiscriminadamente un material, el cual fue usado en el ensayo de calificación, sin considerar la compatibilidad de los materiales base y metales de aporte desde el punto de vista de las propiedades metalúrgicas, mecánicas y los requerimientos de precalentamiento y postcalentamiento.

C) Diámetro del Grupo – Espesor de pared del grupo:

Identifica los rangos de diámetros y espesores de pared sobre los cuales es aplicable el proceso. por ejemplo:

Un cambio en el grupo de diámetro de un grupo a otro grupo en pulgadas y mm.

- (i) Menores de 2 3/8 (60.3)
- (ii) 2 3/8 hasta 12 3/4 (60.3 hasta 323.8) inclusive
- (iii) Mayores de 12 3/4 (323.8)

Un cambio en el espesor nominal de la pared del tubo de un grupo a otro grupo. Los grupos de espesores de pared, en pulgadas y mm. son:

- (i) Menores de 3/16 (4.78)
- (ii) 3/16 hasta ¼ (4.78 hasta 19.05) inclusive
- (iii) Mayores de ¼ (19.05)

D) Diseño de la junta:

Muestra con un bosquejo el ángulo del bisel, tamaño de la cara de la raíz y abertura de la raíz o espacio entre miembros adyacentes. Muestra el tamaño y forma de las soldaduras.

E) Metal de aporte y Número de Cordones:

Designa tamaños y números de clasificación del metal de aporte, número mínimo de cordones, así como la secuencia.

F) Características Eléctricas:

Designa la corriente, la polaridad, muestra el rango de voltaje y amperaje de cada electrodo.

G) Posición (Ya sea soldadura fija o girada):

La "soldadura fija" es en la cual el tubo o ensamble es mantenido estacionario.

La "soldadura girada" es en la cual el tubo o ensamble es girado, mientras que el metal de soldadura se deposita en la parte superior central o cerca de ella.

H) Dirección de soldadura:

Muestra si es ya sea cuesta arriba o cuesta abajo.

I) Lapso de tiempo entre pasos:

Designa el tiempo máximo entre la terminación del cordón de fondeo, y el inicio del segundo cordón, el tiempo máximo entre la terminación del segundo cordón y el inicio de los otros cordones.

J) Limpieza:

Muestra si se han de usar herramientas mecánicas o manuales.

K) Precalentamiento y postcalentamiento:

Especifica los métodos, temperatura, métodos de control de temperatura, rango de temperatura ambiente, cabe mencionar que estos procesos deben seguirse cuando las condiciones del tiempo o los materiales hacen necesario a alguno de ellos o a ambos.

L) Gas de Protección y Razón de Consumo:

Designa la composición del gas y rango de la razón de flujo o consumo.

M) Velocidad de Avance:

En la siguiente página expongo un ejemplo real, de la calificación de procedimientos de soldadura que se utilizó en el proyecto de construcción del oleoducto de 24" diam. De Nuevo Teapa, Veracruz a Cadereyta, Nuevo León. Del año 1999 al 2001.

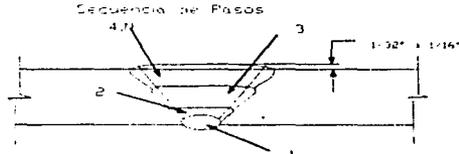
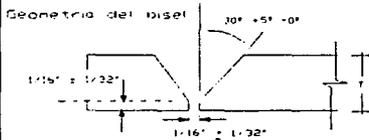
RESIDENCIA ZONA SUR TRABAJOS DE CRUCES ESPECIALES - OLEODUCTO 24"

OBRA: CONSTRUCCION DE CRUCES ESPECIALES OLEODUCTO 24"
EN LA ZONA SUR DEL ELEV. TRAPA - POZA BLCA
PROYECTO: CADREYTA BLOCK 13

CONTRATISTA: CONSTRUCTORA MECANICA CIVIL S.A. DE C.V.
CONVENIO CON: S.E. ENGENIERIA Y LAND CONSTRUCTION CO. LTD
CONTRATO: DZM60-ED-07REZ.0

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)*

Referencia: Standard API 504 B B



NOTAS

Para espesores mayores (T) se podrá usar un mayor número de pasos, aplicados siempre con las mismas condiciones indicadas abajo.

DIAMETRO DEL ELECTRODO Y NUMERO DE PASOS

PASO No	TIPO Y DIAMETRO DEL ELECTRODO	VOLTAJE	AMPERAJE Y POLARIDAD	VELOCIDAD DE APORTE
1. PASO de "RAIZ"	E6010 1/8"	20-24 v	90-130 Amper (+)	7.9 pulg/min.
2. PASO "CALIENTE"	E7010 5/32"	18-22 v	130-170 Amper (+)	10-13 pulg/min.
3. N. "RELLENO" O "VISTA"	E7010 5/32"	20-24 v	130-170 Amper (+)	5-8 pulg/min.

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA NoT-011/99 CON BASE EN LA CALIFICACION DE PROCEDIMIENTOS (PQR) 14/09/99

PARA APLICAR EN: TUBERIA DE CONDUCCION DIAMETROS: 24" ESPESORES: 0.312 0.375 0.500

PROCESO DE SOLDADURA: SMAW ARCO ELECTRICO CON ELECTRODO REVISTIDO APLICACION: M.A.N.U.

TIPO DE MATERIAL BASE: API 5L Gr. X-80

DIAMETRO Y ESPESOR DE PARED CALIFICADOS: DIAMETROS MAYORES A 12 3/4" ESPESORES DE 3/16" A 3/4"

DISEÑO DE JUNTA: VER FIGURA ARRIBA

TIPO DE MATERIAL DE APORTE Y NUMERO DE PASO: AWS A 5.1 T1P E 6010 "FONDEO" Y AWS A 5.5 TIPO E 7010 RESTO DEL "RELLENO"

CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE APLICACION: CORRIENTE DIRECTA POLARIDAD INVERTIDA (ELECTRODO +)

POSICION DE APLICACION: 30 POSICION EN LA EJE DEL TUBO HORIZONTAL

DIRECCION DE LA APLICACION: VERTICAL DESCENDENTE

NUMERO DE SOLDADORES: DOS SOLDADORES PARA CADA PASO

TIEMPO ENTRE PASOS: CINCO MINUTOS ENTRE EL PRIMER PASO Y PASO CALIENTE TIEMPO SIN LIMITE PARA LOS PASOS SUBSECUENTES

FORMA DE ALINEAR Y CONDICIONES PARA REMOSI: USAR ALINEADOR INTERNO Y NO REMOVERLO HASTA QUE ESTE COMPLETO EL PRIMER PASO

LIMPIEZA Y/O ESMERILADO: USAR DISCO ABRASIVO, CARGAS Y CEPILLO DE MADERA. TODO MATERIAL NO METALICO DEBERA SER REMOVIDO

PRECALENTAMIENTO Y TRATAMIENTO TERMICO POST-SOLDADURA: Precalear a 300°F si la temperatura del tubo es menor a 70°F

GAS PROTECTOR Y CANTIDAD DE FLUJO: NO APLICA

TIPO DE PROTECCION: NO APLICA

VELOCIDAD DE APORTE: VER TABLA ARRIBA

TABLAS Y FIGURAS ANEXAS: NO APLICA

ING. _____
GERENTE DE PROYECTO

CMC

CONSTRUCTORA MEXICANA CIVIL, S.A. DE C.V.

RESIDENCIA VERACRUZ, VER.
TRABAJOS DE CRUCES ESPECIALES - OLEODUCTO 24"

OBRA: CONSTRUCCION DE CRUCES ESPECIALES OLEODUCTO 24"
 EN LA ZONA SUR NUEVO TEXAPAPOZARCA
 UBICACION: MAZAMAPAN - E. CARRANZA
 PROYECTO: CADRETTA BLOCK 44

CONTRATISTA: CONSTRUCTORA MEXICANA CIVIL, S.A. DE C.V.
 CONVENIO CON: SKIDMORE OWINGS AND CONSTRUCTION CONSULTANTS
 CONTRATO: 02/16/90-02/16/92

ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

NOMBRE DE LA COMPAÑIA: L.S.L.S.A. POR: ING.
 No. DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA: T 011798 FECHA: 14 DE SEPTIEMBRE DE 1999. SOPORTE DE PQR No. 14 09 99
 REVISION: 01 FECHA: 28 DE OCTUBRE DE 1999.
 PROCESO DE SOLDADURA: S MA W TIPO: MANUAL

JUNTA (QW - 402)

DETALLES

DISEÑO DE JUNTA "V"
 RESPALDO (SD) NO X
 MATERIAL DE RESPALDO (TIPO) N.A.
 (REFERIDO AL RESPALDO Y SUBTADOR)

(X) METAL
 () NO METAL
 () METAL INFUNDIBLE
 () OTRO

METALES BASE (QW - 403)

P.No. API-SL GRUPO 1 Y 2
 O
 ESPECIFICACION DEL TIPO Y GRADO X-60
 A ESPECIFICACION TIPO Y GRADO X-68
 O
 ANALISIS QUIMICO Y PROP. MECANICAS N.A.
 RANGO DE ESPESORES
 METAL BASE #500" RANURA "V" FILETE N.A.
 RANGO DIAMETRO DE TUBERIA 24" RANURA "V" FILETE N.A.
 OTRO

METALES DE APORTE (W - 404)

SPEC No (SFA) 5.5 7010 G
 AWS No (CLASS) A 5.5
 F.No.
 A.No.
 TAMAÑO DE METAL DE APORTE 17"
 RANGO DE ESPESORES
 RANURA 30" N.A.
 FILETE N.A.
 FUNDENTE DEL ELECTRODO RECUBIERTO
 NOMBRE COMERCIAL FUNDENTE
 INSERTO COMBUSTIBLE N.A.
 OTRO

ING. _____
 GERENTE DE PROYECTO

ING. _____
 INO. SUPERVISOR DE DPM

3.3.2. ENSAYO (PRUEBAS) EN LAS SOLDADURAS PARA CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA UNIONES A TOPE

Antes de iniciar la operación de soldadura en línea, debe ser calificada la especificación detallada del procedimiento de soldadura que se usará, así como el material de aporte, para determinar que éstas cumplan con las propiedades mecánicas apropiadas. Para lo cual se seleccionan probetas para pruebas destructivas, las cuales se ejecutan en laboratorio.

Deben unirse dos secciones de tubería siguiendo todos los detalles de la especificación del procedimiento, mencionados en los incisos a) al m) del punto anterior.

A continuación se deben cortar probetas para los diversos ensayos, que exige el estándar API-1104. Los especímenes deben ser enfriados por aire hasta la temperatura ambiente, antes de ser ensayados.

Para obtener el número mínimo de especímenes y los ensayos a los cuales ellos han de ser sujetos, se ha de consultar el API-1104. Para tuberías de diámetros mayores de 12-3/4", que son las que se emplean para los oleoductos generalmente, los ensayos y la localización de las probetas se exponen en la figura (4).

TIPO Y NÚMERO DE ESPECIMENES PARA LA PRUEBA DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO*

Número de Especímenes

Tamaño del tubo, Diám. Exterior Pulgadas (mm)	Tensión	A la Mella	Doblado de Raíz	Cara	Doblado Lateral	Total
<u>Espesor de Pared ½ Pulg (12.7mm) y menores</u>						
Menor de 2 3/8 (60.3)	0	2	2	0	0	4
2 3/8 hasta 4 ½ (60.3 hasta 114.3) inclusive	0	2	2	0	0	4
Mayores de 4 ½ hasta 12 ¾ (114.3 hasta 323.8) inclusive	2	2	2	2	0	8
Mayores de 12 ¾ (323.8)	4	4	4	4	0	16
<u>Espesor de Pared – Mayores de 12Pulg (12.7 mm)</u>						
4 ½ (114.3) y menores	0	2	0	0	2	4
Mayor de 4 ½ hasta 12 ¾ (114.3 hasta 323.8) inclusive	2	2	0	0	4	8
Mayores de 12 ¾ (323.8)	4	4	0	0	8	16

* API-1104

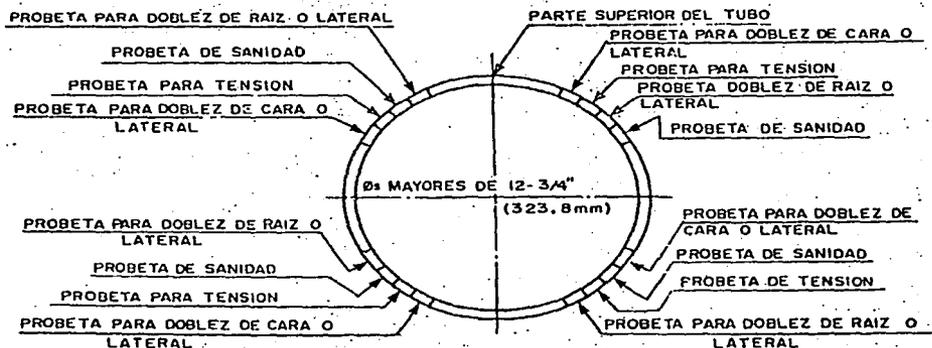


Fig. 3.4 Localización de las Probetas Para Ensayos en las Soldaduras

RESISTENCIA A LA TENSION

Preparación: Los especímenes deben ser de 9 pulg. (230 mm) de largo y 1 pulg. (25 mm) de ancho aproximadamente. Pueden ser cortados a máquina o por corte con oxígeno, no siendo necesaria ninguna otra preparación a menos que los lados estén escalonados, con muescas o no sean paralelos. Deben ser maquinados de tal manera que los lados estén parejos y paralelos.

Método: Los especímenes para ensayo a la tensión deben romperse bajo una carga de tensión con un equipo capaz de medir la carga de la cual ocurre la falla.

La resistencia a la tensión debe ser calculada dividiendo la carga máxima de falla por el área transversal mínima del espécimen, como fue medida antes de la aplicación de la carga.

Requerimientos: La resistencia a la tensión de la soldadura, incluyendo la zona de fusión de cada espécimen debe ser igual o mayor que la resistencia a la tensión mínima especificada del material del tubo, pero no es necesario que sea igual o mayor que la resistencia a la tensión real del material del tubo.

Si el espécimen se rompe fuera de la soldadura y zona de fusión, es decir, en el material del tubo, y reúne los requerimientos de resistencia a la tensión mínimos especificados, entonces la soldadura debe ser aceptada como cumplimiento de los requerimientos.

Si el espécimen se rompe a un valor de resistencia a la tensión abajo del mínimo especificado para el material del tubo, entonces la soldadura debe ser hecha a un lado y hacerse una nueva soldadura de prueba.

PRUEBA DE MELLA (PRUEBA DE SANIDAD)

Preparación : Los especímenes deben ser de 9 pulg. (230 mm) de largo y 1 pulg. (25mm) de ancho aproximadamente, pueden ser cortados a máquina o por oxígeno. Debe hacerse una muesca con sierra en cada lado, y al centro, de la soldadura, cada muesca debe ser aproximadamente 1/8 pulg. (3.17 mm) de profundidad.

Método : Los especímenes deben romperse estirándolos en una máquina de tensión, soportando los extremos y golpeando el centro o soportando un extremo y golpeando el otro con un martillo. El área expuesta de la fractura deberá ser de, al menos 3/4 pulg (19 mm) de ancho.

Requerimientos: Las superficies expuestas de cada espécimen deben presentar penetración y fusión completa. La dimensión más grande de cualquier bolsa de gas, no debe exceder de 1/16 de pulg. (1.59mm) y las áreas combinadas de todas las bolsas de gas no deben exceder al 2% del área de la superficie expuesta. Las inclusiones de escoria no deben exceder de 1/32 de pulg (0.79mm) en profundidad ni 1/8 pulg (3.17 mm) ó ½ del espesor nominal de la pared, cualquiera que resulte menor en longitud. Debe haber por lo menos ¼ pulg (12.7mm) de metal sano entre inclusiones de escoria adyacentes.

PRUEBA DE DOBLADO DE RAÍZ Y CARA

Preparación: Los especímenes deben ser de 9 pulg (230mm) de largo por 1 pulg (25mm) de ancho, aproximadamente, y las orillas largas deben ser redondeadas. Pueden ser cortadas a máquina o por oxígeno. Los refuerzos en los cordones de fondo y de vista deben ser removidos y nivelados con la superficie del espécimen. Estas superficies deben estar lisas y cualquier raya que exista debe ser ligera y transversal a la soldadura.

Método: Los especímenes deben ser doblados en una plantilla de ensayo como se muestra en la figura 3.5. Cada espécimen debe ser colocado en el dado con la soldadura en la parte media. Los especímenes para doblado de cara deben ser colocados con la cara de la soldadura directamente hacia la garganta, y los especímenes para doblado de la raíz deben ser colocados con la raíz de la soldadura directamente hacia la garganta. El émbolo (o macho) debe ser forzado dentro de la garganta hasta que la curvatura del espécimen forme aproximadamente una "U".

Requerimientos: El ensayo de doblado puede considerarse aceptable si no están presentes roturas u otros defectos excediendo 1/8 pulg (3.17mm) ó ½ del espesor nominal de la pared, cualquiera que sea menor, en cualquier dirección en la soldadura o en la zona de fusión después del doblado. Las grietas que se originen a lo largo de las orillas del espécimen durante el ensayo y los cuales sean menor de ¼ de pulg. (6.35mm) medidas en cualquier dirección, no deben ser consideradas, a menos que se observen defectos obvios. Cada espécimen sujeto al ensayo de doblado debe cumplir con estos requerimientos.

RADIO DEL EMBOLO	A = 1 3/4	(44.45 mm)
RADIO DEL DADO	B = 2 5/16 PULG.	(58.74 mm)
ANCHO DEL DADO	C = 2.0 PULG.	(50.8 mm)

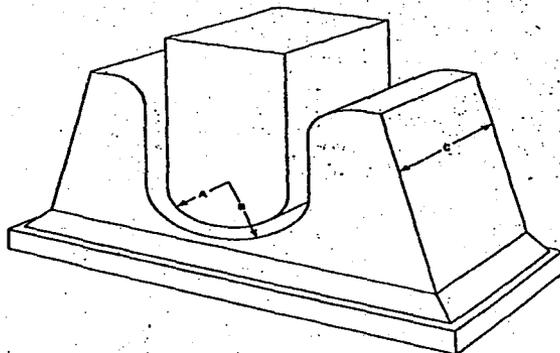


Figura 3.5 Plantilla Para Guía de Ensayo de Doblar (no está a escala)

ENSAYO DE DOBLADO LATERAL

Preparación: Los especímenes deben ser de 9 pulg (230 mm) de largo por $\frac{1}{2}$ pulg (12.7mm) de ancho, aproximadamente, y las orillas largas deben ser redondeadas. Deben ser cortados con máquina, o pueden serlo por corte con oxígeno a aproximadamente $\frac{1}{4}$ pulg (19mm) de ancho, y luego maquinados o esmerilados a una anchura de $\frac{1}{2}$ pulg (12.7mm). Los lados deben ser lisos y paralelos; Los refuerzos de viga y raíz deben ser removidos y nivelados con la superficie del espécimen.

Método: Los especímenes deben ser doblados en una plantilla de ensayo de doblado guiado, similar a la mostrada en la figura 5. Cada espécimen debe ser colocado en el dado con la soldadura o la mitad del espacio y con la cara de la soldadura a 90° con la garganta. El (émbolo o macho) debe ser forzado dentro de la garganta hasta que la curvatura del espécimen este formando aproximadamente una "U".

Requerimientos: Cada espécimen debe cumplir los requerimientos del ensayo de doblado de la raíz y la cara.

3.4 CALIFICACIÓN DEL SOLDADOR

El propósito de la prueba de calificación del soldador es para determinar la habilidad de los soldadores en la ejecución, de soldaduras sanas usando un procedimiento de soldadura previamente calificado. Antes que la soldadura de producción sea ejecutada, los soldadores deben ser calificados de acuerdo a los requerimientos internacionales, por lo que se debe consultar el API-1104.

Antes de iniciar las pruebas de calificación debe permitirse al soldador un tiempo razonable para ajustar el equipo de soldadura empleado en la prueba. El soldador debe usar la misma técnica de soldadura y procederá con la misma velocidad que utilizará si pasa la prueba y se le permite hacer la soldadura de producción.

El soldador debe calificar para la soldadura ejecutando una prueba, uniendo segmentos de tubería de material, diámetro y espesor igual al que se empleará en la producción del ducto.

Cuando son empleados segmentos de tubo, éstos deben ser soportados de tal manera que produzcan las soldaduras típicas de posición plana, vertical y sobrecabeza. Al menos uno de estos botones debe contener el botón típico, el cual es producido en el comienzo o fin de los cordones de soldadura y al menos uno de estos botones debe ser examinados en las pruebas destructivas.

3.4.1. CALIFICACIÓN SENCILLA

Un soldador calificando para realizar la soldadura de producción, debe hacer una soldadura de prueba usando un procedimiento de soldadura calificado para unir dos segmentos de tubería. El soldador debe hacer una soldadura a tope en la posición fija con el eje de los tubos ya sea en el plano horizontal o inclinado con el plano horizontal un ángulo que no exceda 45° .

La soldadura debe ser aceptable si reúne los requerimientos de examinación visual, calificación del soldador por pruebas destructivas, calificación del soldador por radiografía, los cuales explicaré más adelante.

Un soldador, quién ha completado satisfactoriamente la prueba de calificación de soldadura descrita anteriormente, obtiene su certificado de calificación por parte de una compañía de control de calidad, representada por un técnico debidamente acreditado, además el certificado debe ser firmado por un representante de PEMEX o el IMP quien ha presenciado la prueba.

El certificado del soldador, tendrá vigencia durante todo el proyecto.

El soldador que use un nuevo procedimiento debe ser recalificado. Es decir si llegasen a cambiar las variables esenciales que establece el estándar API-1104 para un proyecto:

- a) Un cambio de un proceso de soldadura a cualquier otro proceso, o combinación de procesos de soldadura.
- b) Un cambio en la dirección de soldadura, de vertical ascendente a vertical descendente, o viceversa.
- c) Un cambio en el metal de aporte de un grupo de clasificación a otro grupo de clasificación.
- d) Un cambio en el grupo de diámetro de un grupo a otro grupo. Estos grupos en el diámetro exterior, en pulgadas y milímetros son:
 - (i) Menores de $2 \frac{3}{8}$ (60.3)
 - (ii) $2 \frac{3}{8}$ hasta $12 \frac{3}{8}$ (60.3 hasta 323.8 inclusive)
 - (iii) Mayores de $12 \frac{3}{4}$ (323.8)
- e) Un cambio en el espesor nominal de la pared del tubo de un grupo a otro grupo. Los grupos de espesores de pared, en pulgadas y milímetros son:
 - (i) Menores de $\frac{3}{16}$ (4.78)
 - (ii) $\frac{3}{16}$ hasta $\frac{1}{4}$ (4.78 hasta 19.05) inclusive
 - (iii) Mayores de $\frac{1}{4}$ (19.05)
- f) Un cambio de posición, diferente de la que ya ha sido calificada. Un cambio de posición girada a posición fija o viceversa.
- g) Un cambio en el diseño de la junta (bisel en V a bisel en U).

3.4.2 CALIFICACIÓN MÚLTIPLE

Un soldador calificando para los requisitos de la calificación múltiple, debe hacer completas dos soldaduras de prueba utilizando un procedimiento calificado.

La primera de ellas debe cumplir con los requerimientos de la calificación sencilla.

La segunda prueba de calificación debe consistir en el trazado, corte, ajuste y soldado de una rama de tamaño completo, en una conexión de tubo, por el soldador.

Debe cortarse un agujero de tamaño completo en el tendido de la tubería en una posición horizontal y el eje del tubo ramal extendiéndose verticalmente hacia abajo del tendido. La soldadura acabada debe exhibir una apariencia limpia, uniforme y que revele destreza. (ver fig. 3.6).

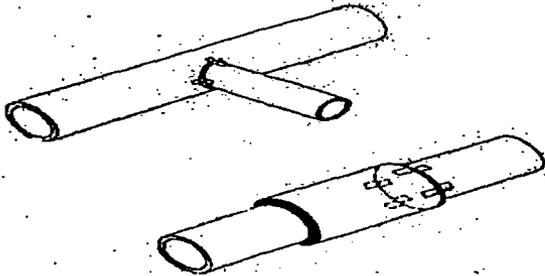


Fig. 3.6 ENSAYO PARA CALIFICACIÓN MÚLTIPLE DE SOLDADOR

La soldadura debe exhibir una penetración completa alrededor de la circunferencia entera. Los cordones de raíz (fondeo) completos, no deben contener ninguna quemada que exceda $\frac{1}{4}$ de pulgada (6.35 mm). La suma de las dimensiones máximas de quemadas separadas sin reparar en cualquier longitud continua de 12 pulgadas (304.8) de soldadura no debe exceder $\frac{1}{2}$ pulgada (12.7 mm).

Tanto para la prueba de calificación simple como para la múltiple, las pruebas de ensayo destructivo, se llevarán a cabo de la misma forma que se explica en 3.3.2.

Los soldadores que han completado felizmente los requerimientos de la calificación múltiple, pueden considerarse calificados para soldar en todas las posiciones, en todos los espesores de pared, diseños de junta, ajustes en todos los diámetros de tubería iguales o menores a aquellos que fueron usados en sus pruebas de calificación.

Solamente si se cambian cualquiera de las siguientes variables esenciales en la especificación del procedimiento de soldadura empleado en la prueba de calificación múltiple, los soldadores usando el nuevo procedimiento deben ser recalificados según lo especifica el estándar API-1104:

- A) Un cambio de un proceso de soldadura a otro proceso de soldadura o a una combinación de procesos de soldadura.
- B) Un cambio en la dirección de soldadura, de vertical ascendente a vertical descendente o viceversa.
- C) Un cambio en el metal de aporte, de un grupo de clasificación, a otro grupo.

3.4.3 EXAMINACIÓN VISUAL

La soldadura debe estar libre de roturas o grietas, falta de penetración, quemaduras sin reparar y otros defectos y debe de presentar una apariencia de limpieza y destreza en su ejecución.

3.4.4 CALIFICACIÓN DEL SOLDADOR POR RADIOGRAFÍA

Deben hacerse radiografías de cada una de las soldaduras de prueba. El soldador debe ser descalificado si cualquiera de estas soldaduras de prueba no cumple con el estándar de aceptabilidad - Ensayo no destructivo- del estándar API-1104.

La inspección radiográfica no debe ser usada con el propósito de localizar áreas sanas o áreas que contengan discontinuidades y después de eso hacer pruebas destructivas en tales áreas para calificar o descalificar a un soldador.

3.4.5 REGISTRO DE SOLDADORES CALIFICADOS

Debe hacerse un registro de las pruebas hechas a cada uno de los soldadores y de los resultados detallados a cada una de las pruebas. La forma contiene los suficientes detalles para demostrar que la prueba de calificación incorpora varios requerimientos exigidos por el estándar API-1104. Es conveniente mantener una lista de soldadores calificados y los procedimientos en los cuales ellos están calificados. Un soldador puede ser requerido a recalificar si existe una duda acerca de su habilidad.

En la siguiente página anexo un ejemplo de un registro de calificación de un soldador.

CMC

CONSTRUCTORA MEXICANA CIVIL, S.A. DE C.V.

RESIDENCIA VERACRUZ, VER.

TRABAJOS DE CRUCES ESPECIALES - OLEODUCTO 24"

OBRA CONSTRUCCION DE CRUCES ESPECIALES OLEODUCTO 24"

CONTRATISTA CONSTRUCTORA MEXICANA CIVIL, S.A. DE C.V.

USUACION EN LA ZONA DE MLEVO TEAPA - POZA RICA

CONVENIO CON SK ENGINTEERING AND CONSTRUCTION CO LTD

PROYECTO E. CARBAZA, VILLA FIZARICA

CONTRATO 07199010/01/00/03

C/ALBERTO BLOQUE 23

REGISTRO DE CALIFICACION DE DESEMPEÑO DEL SOLDADOR	No REPORTE FECHA.
--	----------------------

No MODIFICACION DE SOLDADOR	NOMBRE DE LA COMPANIA: ISISA
NOMBRE DEL SOLDADOR	FECHA DE SOLDADURA 14 DE ABRIL DE 2000
USANDO WPS No. S MA W	REV. I

EL SOLDADOR DE ARRIBA ESTA CALIFICADO PARA EL SIGUIENTE RANGO

VARIABLE	VALORES ACTUALES DE REGISTRO USADOS PARA CALIFICACION	RANGO DE CALIFICACION
PROCESO		
TIPO DE PROCESO S MA W		
RESPALDO N.A.		
ESPECIFICACION DE MATERIAL API-5L-X60		
ESPESOR 0.375" RANURA 1/8" FILETE N.A.	0.375"	0.750"
DIAMETRO 24" RANURA 1/8" FILETE N.A.	24"	36"
METAL DE RELLENO 7010 G		
	ESPEC. No.	
	CLASE E. RECUBIERTO	
	F-No.	
POSICION HORIZONTAL		
AVANCE DE SOLDADURA 1" X MINUTO		
TIPO DE GAS N.A.		
CARACTERISTICAS ELECTRICAS DIRECTA CORRIENTE 170		
	POLARIDAD POSITIVA	
OTROS		

TIPO Y FIG. No.	GUIA DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE DOBLADO		TIPO Y FIG. No.	RESULTADOS
	RESULTADOS	RESULTADOS		
RESULTADOS DE PRUEBA RADIOGRAFICA PARA UNA CALIFICACION ALTERNATIVA DE SOLDADURA EN RANURA POR RADIOGRAFIA				
FOTO	RESULTADOS RADIOGRAFICOS:	ACEPTADOS X	RECHAZADOS	REPORTE No.

RESULTADOS DE SOLDADURA CON FILETES

PRUEBA DE FRACTURA N.A.
LONGITUD Y PORCIENTO DE DEFECTO
PRUEBA MACRO DE FUSION
TAMAÑO DEL FILETE (PIERNA) _____ mm _____ mm CONVEXIDAD _____ mm O CONCAVIDAD _____
PRUEBA REALIZADA POR _____ PRUEBA DE LABORATORIO No.
CERTIFICAMOS QUE LAS DECLARACIONES EN ESTE REGISTRO SON CORRECTAS Y QUE LAS PRUEBAS DE SOLDADURA FUERON PREPARADAS POR EL SOLDADOR Y SON DE ACUERDO A LOS REQUERIMIENTOS DE (ASME SECC IX)

INSPECCIONADO POR _____
FECHA Y FIRMA 14 DE ABRIL DEL 2000ATESTIGADO POR PENEX:
FECHA Y FIRMA 14 DE ABRIL DE 2000RECIBI DE CONFORMIDAD: ING. I. _____
FECHA Y FIRMA 14 DE ABRIL DEL 2000ING. _____
GERENTE DE PROYECTOING. DE CRUZAMIENTOS
SKEC

3.5 DISEÑO Y PREPARACIÓN DE UNA JUNTA PARA SOLDADURA DE PRODUCCIÓN

La soldadura de tubería, como ya se explicó anteriormente, debe ser ejecutada por soldadores calificados usando procedimientos calificados. Las superficies a ser soldadas deben estar lisas, uniformes, libres de laminaciones, rasgaduras, escama, escoria, grasa, pintura y otros materiales dañinos los cuales podrían afectar a la soldadura. El diseño de la junta y el espaciamiento entre los extremos lindantes deben estar de acuerdo con la especificación del procedimiento de soldadura que ha de usar.

El alineamiento de los extremos lindantes de dos tubos debe hacerse lo más preciso que sea posible. Para tubos del mismo espesor de pared, el descentrado no debe exceder de $1/16$ pulg (1.59 mm). Cualquier descentrado mayor, siempre que éste sea causado por variaciones dimensionales, debe ser igualmente distribuido alrededor de la circunferencia del tubo. El martilleo del tubo para obtener un alineado apropiado debería mantenerse al mínimo.

Se utilizan abrazaderas de alineación, las cuales se retiran una vez que se completa el primer cordón de fondo o raíz de tal manera que se libera la tensión de la abrazadera (fig. 3.7)

En campo, los extremos del tubo deben ser biselados por máquina herramienta o con máquina de corte con oxígeno. Los extremos biselados deben ser razonablemente lisos y uniformes y las dimensiones deben estar de acuerdo con el procedimiento de soldadura (Figs. 3.8 A y B)

ALINEADORES

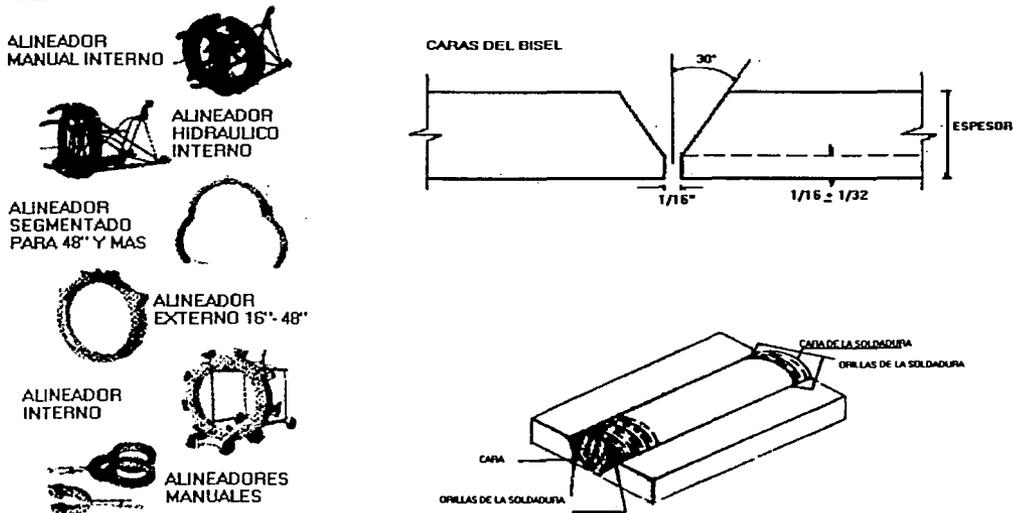


Fig. 3.7 Alineadores para tubería.

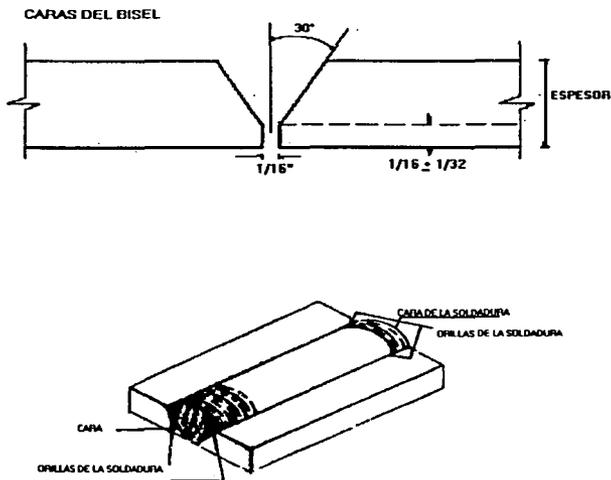


Fig. 3.8 A) Bisel y B) Soldadura aplicada sobre un bisel Conformado con dos Caras de Tubo

Las escamas y escoria deben ser removidas de entre cada cordón y ranura. Pueden ser usadas herramientas mecánicas o manuales.

Cuando las condiciones prevalcientes del tiempo, ponen en riesgo la calidad de la soldadura, esta no debe realizarse ya que puede deteriorarse, por la humedad del aire, vientos con arena o fuertes vientos.

3.6 INSPECCIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE EL PROCEDIMIENTO RADIOGRÁFICO (ENSAYO NO DESTRUCTIVO)

Una inspección radiográfica, debe dar indicaciones de defectos, los cuales deben ser interpretados y evaluados con exactitud. Las soldaduras deben ser evaluadas en base a los "estándares de aceptabilidad en pruebas no destructivas".

La producción de radiografías, para la inspección de soldaduras en un proyecto determinado, se hace mediante el uso de Rayos X o rayos Gamma (figs. 3.9, 3.10 y 3.11). Al igual que como lo indique en el caso de los soldadores, también existe una calificación para los individuos que tienen el compromiso o responsabilidad de la producción y evaluación de radiografías. Debe establecerse y calificarse un procedimiento detallado para la producción de radiografías. Las radiografías que se produzcan con el uso de tal procedimiento deben tener suficiente densidad, claridad y contraste de manera que los defectos en la soldadura o en el tubo adyacente a la soldadura sean claramente visibles.

Deben considerarse los siguientes puntos para evaluar las radiografías:

- a) Una calidad aceptable de la película (libre de velo, libre de irregularidades de procesado que podían ocultar la imagen de un defecto real, y una densidad y contraste aceptables).
- b) El nivel de sensibilidad requerido en el convenio.
- c) Un sistema de identificación aceptable
- d) Técnicas y montaje adecuados
- e) Compatibilidad con los estándares de aceptación.

Todos los requisitos referentes a la calidad de las radiografías resultantes deben aplicarse igualmente a Rayos X y Rayos Gamma.

Los operadores encargados de los equipos de inspección pueden ser llamados para demostrar: la capacidad del procedimiento, la detección de defectos inadmisibles y la habilidad del operador para interpretar apropiadamente las indicaciones dadas por dichos equipos.

3.6.1 DETALLES DEL PROCEDIMIENTO RADIOGRÁFICO

Similar al caso del "Registro de procedimiento de Soldadura", antes de empezar la construcción del proyecto, debe existir también los "Detalles del Procedimiento Radiográfico". Cada uno de los procedimientos debe incluir como mínimo los siguientes detalles:

- a) Fuente de radiación. Tipo de fuente de radiación, tamaño efectivo de la fuente, o tamaño efectivo del punto focal y el voltaje nominal del equipo de rayos X.
- b) Pantallas intensificadoras. El tipo de pantalla intensificadora usada y el espesor si se usa una de plomo.
- c) Filtros o protectores. El tipo y colocación de protectores, diafragmas o filtros, diferentes a las pantallas intensificadoras si se usan.
- d) Tipo de película. Forma y tipo o designación ASTM, longitud y ancho. Alto contraste, grano relativamente fino.
- e) Relación geométrica. Tamaño del punto focal de la fuente, la máxima y mínima fuente de fuerza, distancia focal de la película, distancia focal del objetivo, y ángulo de radiación respecto a la soldadura y a la película.

- f) Condiciones de exposición. Exposición del equipo en miliampere-minuto o curie-minuto. El kilovoltaje para máquinas de Rayos X no equipadas con miliamperímetros o kilovóltmetros, las condiciones de exposición pueden ser expresadas en términos de voltaje de entrada, amperaje de entrada y el tiempo.
- g) Espesor del material, clasificación de espesores para los cuales el procedimiento es apropiado.

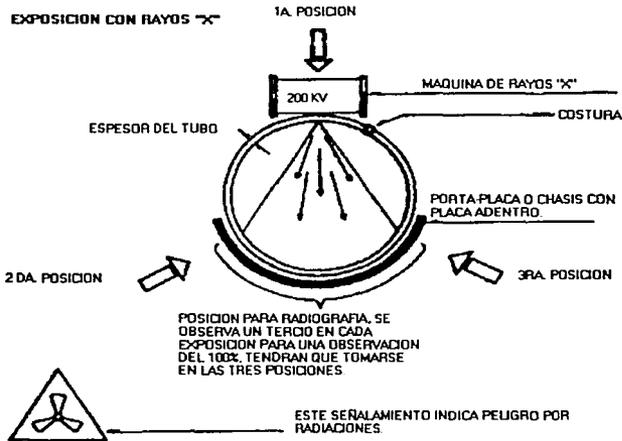


Fig. 3.9 Inspección radiográfica mediante rayos "X"

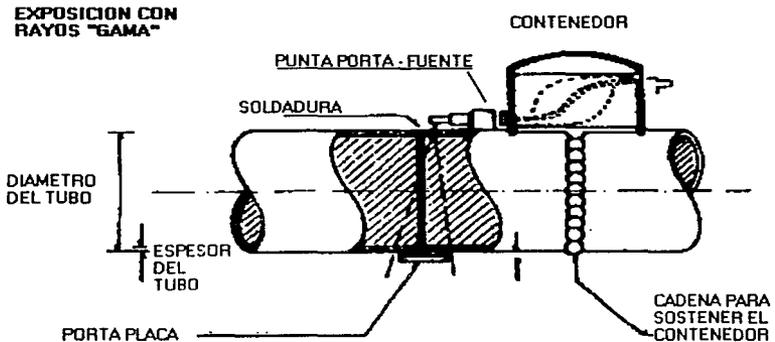
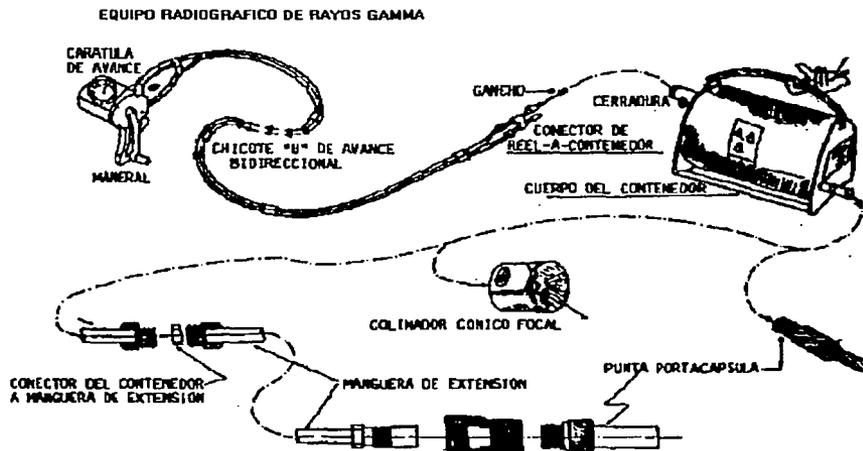


Fig. 3.10 Inspección radiográfica mediante rayos "Gama"



Deben usarse solamente procedimientos calificados para determinar la calidad de la soldadura durante la construcción, la calidad de las radiografías de producción debe ser sustancialmente la misma en relación con la calidad de la radiografía de calificación.

Las placas radiográficas de las soldaduras deben tener indicadas las referencias necesarias para la identificación y localización de la junta en el campo, como son: sistema de tubería, diámetro, tramo o parte del sistema inspeccionado, kilometraje, número progresivo de junta o unión soldada, etc., de manera que la soldadura en cuestión y cualquier discontinuidad en ella pueda ser localizada precisa y rápidamente.

El personal técnico encargado de tomar, revelar e interpretar radiografías de uniones soldadas, así como el de reportar resultados de la inspección, debe tener y presentar documentación que lo acredite como técnico calificado en inspección no destructiva.

La documentación debe reunir los requisitos siguientes:

- a) Identificar con certeza a su poseedor.
- b) Indicar la norma conforme a la cual fue calificado y los procedimientos de inspección no destructiva (IND) que fueron incluidos en dicha calificación.
- c) Indicar la institución u organismo que expide la documentación.

Los procedimientos de inspección no destructiva para los cuales un técnico podrá estar calificado son:

- Inspección radiográfica (IR)
- Inspección con partículas magnéticas (IPM).
- Inspección ultrasónica (IU).
- Inspección con líquidos penetrantes (ILP)
- Inspección con corrientes parásitas (ICP)
- Inspección para detección de fugas.

Los tres niveles básicos de calificación de un técnico en inspección no destructiva son:

- a) Nivel I. Está calificado para ejecutar correctamente calificaciones de los equipos, inspecciones y evaluaciones específicas de acuerdo con instrucciones escritas de la técnica de la inspección para la cual fue calificado y para registrar los resultados adecuadamente. Debe ser supervisado y guiado por un técnico de nivel II o III.
- b) Nivel II. Está calificado para ajustar y calibrar los equipos, para interpretar y evaluar los resultados con respecto a los códigos, normas, estándares o especificaciones aplicables. Además está familiarizado con el alcance y limitaciones del procedimiento; prepara instrucciones escritas y organiza, controla y reporta los resultados de las inspecciones no destructivas para el cual fue calificado.
- c) Nivel III. Está calificado para establecer técnicas de inspección, para interpretar códigos, normas, estándares o especificaciones, así como para diseñar el procedimiento y la técnica particular a utilizar. Es responsable de las operaciones de inspección no destructiva para las que fue calificado y de las cuales está encargado. Está capacitado para evaluar los resultados con respecto a los códigos, estándares y especificaciones existentes.

Antes de realizar las pruebas no destructivas en las soldaduras efectuadas en el día deberá verificarse que el equipo, fuentes películas materiales para revelado, etc. se encuentran en condiciones adecuadas de uso.

3.7 DEFECTOS DE SOLDADURA

A continuación se da una relación de los posibles defectos de soldadura estableciendo su origen así estos se clasifican en tres grupos.

1. Defectos dimensionales.

- a) **Deformaciones por contracción térmica:** El proceso de soldado implica la aplicación de calor en una zona. Al calentarse los metales sufren deformaciones de expansión, al tener estas deformaciones a medida que se van calentando los metales sufren estiramientos o sea esfuerzos que a veces hacen distorsiones en las partes soldadas.
- b) **Preparación incorrecta de la unión:** Cuando los biselos en el mismo tubo tienen en un lado más ángulo que en el otro, o una alineación inadecuada. (Ver fig. 3.11)
- c) **Preparación incorrecta de la soldadura y perfil incorrecto de la soldadura:** Estos defectos se resumen como un aumento y disminución del perfil de la soldadura. Se corrigen con una buena oscilación del electrodo y velocidad adecuada de aporte, y son propiciados por un diámetro inadecuado del electrodo e insuficiencia de corriente.

2. Discontinuidades estructurales.

- a) **Porosidades:** Son huecos globulares como inclusión gaseosa y se deben a exceso de fusión del recubrimiento por alta corriente o gases formados por la reacción química de la soldadura, pueden estar dispersas por toda la soldadura o en grupos en forma de esfera esférica. También en el cordón de fondo se presentan pero como cavidad lineal o tubular. (Ver fig. 3.12)
- b) **Inclusiones no metálicas.** Son óxidos o sólidos que se encuentran en la soldadura de forma indefinida y escoria producto de la reacción química y que queda atrapada dentro de la soldadura. Esta última puede ser debida a una alta viscosidad de la fundición, un rápido enfriamiento o escoria que se queda atrapada en las orillas de los cordones cuando éstos tienen fuerte angularidad con la pared del bisel y pueden estar situadas en distintos lugares. (Ver fig. 3.13)

Escoria en la raíz de la soldadura: Al depositar el cordón de raíz, el electrodo puede ser tan grueso que el arco se origine en la pared lateral de la ranura, en lugar de incidir en la raíz de la unión, y en esta forma la escoria puede fluir hacia la abertura de la raíz o ser atrapada en el metal del primer cordón.

Escoria en la zona de fusión: Al remover la escoria superficial para preparar la superficie antes de depositar el cordón subsiguiente puede quedar un remanente en la esquina que forman el cordón de soldadura y la cara de la ranura. En la mayoría de los casos esta escoria es fundida y sacada a la superficie. De no suceder así, la escoria atrapada será una inclusión alargada en la zona de fusión.

Escoria dispersa: Cuando la limpieza entre cada cordón es imperfecta, habrá escoria adherida en áreas aisladas sobre la superficie del último cordón depositado. Esta escoria tenderá a interrumpir el arco y a evitar la fusión del metal y la completa fusión de la soldadura. El resultado será que habrá inclusiones de escoria dispersas, distribuidas dentro de la soldadura.

c) Fusión incompleta o falta de fusión. Se presenta cuando falla la penetración del arco, ya que entonces no se produce la fusión entre cordones de soldadura o entre estos y el metal base. Este efecto puede presentarse en cualquier lugar del bisel y/o entre un cordón y otro. La falta de fusión puede ser causada por no elevarse lo suficientemente la temperatura para alcanzar el punto de fusión del metal base o de la soldadura previamente depositada, o por no disolver, por medio del fundente, los óxidos u otros metales extraños presentes en la superficie sobre la cual debe fusionar el depósito de soldadura. (Ver fig. 3.14)

d) Penetración Incompleta o falta de penetración. Este término se aplica para denominar el defecto consistente en el que el metal depositado y el metal base no se fusionan íntegramente en la raíz de la soldadura. Puede ser causada por que la cara de la raíz de la ranura no alcance la temperatura de fusión en toda su profundidad. Si la parte del metal base más cercana al electrodo está a una distancia considerable de la raíz, la conducción del calor puede ser insuficiente para alcanzar la temperatura de fusión de la raíz y se originará una penetración incompleta. (Ver fig. 3.15)

La penetración incompleta es indeseable, particularmente si la raíz de la soldadura se sujeta a esfuerzos de tensión o flexión. El área sin fusionar permite una concentración de esfuerzos, los cuales pueden ocasionar que falle la unión sin deformación apreciable. Aún cuando los esfuerzos a que se someta la unión no sean tensión o flexión, el esfuerzo por la contracción y la consecuente distorsión de las partes a soldar, causan frecuentemente roturas que se iniciarán en el área sin fusionar. En algunos casos tales roturas pueden progresar conforme se depositen los cordones subsiguientes, hasta que se extiendan a través de la mayoría del espesor de la soldadura.

La causa más común de la penetración incompleta es el diseño inadecuado de la unión para el proceso de soldadura. Cuando una ranura se suelda por un solo lado, la penetración completa no es fácilmente obtenida si la cara de la raíz es demasiado grande, aún cuando la abertura de la raíz sea adecuada, o si la abertura de la raíz es demasiado pequeña, o el ángulo del bisel es reducido.

Si el diseño de la unión es adecuado, la penetración incompleta pueden resultar del uso del electrodo o el uso de insuficiente corriente.

e) Roturas. Las roturas en las uniones soldadas son debidas a la presencia de esfuerzos localizados, los cuales, en algún punto, exceden a la resistencia máxima del material. Hay cambios inevitables de volumen durante la operación de soldadura, los cuales pueden causar distorsión, esfuerzos residuales y roturas; estos cambios son debidos a la expansión y contracción térmica del acero.

Los cambios de volumen ocurren por el ciclo térmico de la soldadura y son un problema a causa de las tres circunstancias siguientes, que le acompañan:

1.- El acero es calentado diferencialmente y sujeto a cambios drásticos de temperatura.

2.- Cuando el acero es calentado se hace más débil y por consiguiente más fácilmente deformable.

3.- Cuando la soldadura hecha en piezas de acero, hay siempre un grado de rigidez presente en la unión soldada.

Al unir dos piezas de acero con soldadura, el metal depositado y el metal base adyacente, son sometidos a una contracción considerable cuando se enfrían desde alta temperatura a la temperatura ambiente. Generalmente la zona afectada crece poco en todas sus dimensiones al ser calentada, sin embargo es sujeta por el metal frío que la rodea, el cual ofrece resistencia a la contracción de la zona calentada cuando ésta se enfría. Debido a que el acero es débil a temperaturas elevadas y porque el área calentada es pequeña comparada con la masa del acero a la que pertenece, la mayoría del ajuste o acomodamiento entre la placa y la soldadura se lleva a cabo en esta última.

El flujo plástico que ocurre en la soldadura es forzado. A medida que procede a enfriarse, la zona de soldadura se hace más resistente y se requieren mayores esfuerzos para continuar el flujo plástico. Si las placas que son soldadas están relativamente libres, son jaladas por la fuerza de la contracción de la soldadura.

Si la estructura es rígida debido a la firmeza de los propios miembros, la deformación es pequeña. La fuerza de la contracción de la soldadura, sin embargo, alcanza mayores niveles a medida que alcanza la temperatura ambiente.

Las roturas pueden ser inducidas mientras el material permanece caliente o posteriormente cuando este se aproxima a la temperatura ambiente.

La expansión y contracción generalmente no producen resultados nocivos. Cuando ciertas condiciones están presentes, sin embargo, pueden ocasionar una reducción en la resistencia de la soldadura o una distorsión indeseable de las partes soldadas.

Estos resultados nocivos pueden reducirse al mínimo empleando una técnica de soldar apropiada, por ejemplo: diseño correcto de la unión, preparación adecuada o tratamiento especial durante y/o después de soldar. Todos los metales se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Si un cuerpo metálico es calentado y está sujeto para impedir su contracción, se verá sometido a esfuerzos durante el proceso de enfriamiento. La soldadura cuando se está depositando, está en estado de expansión por su alta temperatura. Durante su solidificación y subsecuente enfriamiento, tiende a contraerse. Esta contracción es volumétrica o tridimensional y los esfuerzos que origina no pueden ser considerados como pequeños. La experiencia indica que aún cuando estos esfuerzos no causen roturas pueden causar una falla, que ocurrirá con una pequeña deformación cuando sea aplicada la carga. Para evitar esta condición desfavorable, se aplica un tratamiento como revelado de esfuerzos para cada condición.

ROTURAS EN LA SOLDADURA

La formación de roturas en el material soldado es debida principalmente a la resistencia a moverse de los miembros a unir, al momento de que la soldadura pase por su fase de enfriamiento y contracción. La tendencia a las roturas se incrementa en proporción a la contracción y decrece con el incremento de la plasticidad de la soldadura.

ROTURAS EN CALIENTE

Estas roturas son propiciadas por la alta rigidez de las uniones, por la concavidad de los cordones, especialmente si son anchos y de poco espesor, o por un alto contenido de carbono, azufre o silicio en el metal base. Este tipo de roturas se localizan comúnmente en el metal que se enfría en el último término y sigue una trayectoria intergranular. Si la rotura ocurre en un cordón convexo, se localiza usualmente en la raíz de la soldadura y es difícil detectarla mediante un examen visual.

Un cráter de soldadura ofrece las condiciones ideales para romperse en caliente si es demasiado cóncavo y está localizado en el extremo del cordón de soldadura. Para prevenir las roturas en este punto es necesario llenar completamente el cráter y depositar sobre él material adicional para reforzarlo, antes de cortar el arco eléctrico.

Roturas en la Raíz

Durante el enfriamiento, la soldadura y la zona adyacente calentada empiezan a contraerse, encogiéndose en todas direcciones. Debido a que el material frío que rodea la zona caliente restringe el movimiento, la

soldadura se ve sujeta a tensión al enfriarse. Mientras permanece caliente, el área de soldadura es débil y el flujo plástico ocurre a un esfuerzo relativamente bajo. Cuando la temperatura de esta zona está abajo del rango crítico se hace más resistente pero menos plástica. La raíz de la soldadura actúa como una zona débil y los esfuerzos tienden a elevarse en su vecindad.

Cualquier flujo plástico que ocurra abajo del rango crítico es equivalente a trabajo en frío, el cual tiende a reducir la ductibilidad del material. Entonces la tendencia a romperse se incrementa continuamente, aún a temperatura ambiente.

Las roturas en la raíz son causadas por la alta contracción, deficiente alineamiento y penetración, cuando los cordones son anchos y delgados, por la baja temperatura del metal base, y/o por su alto contenido de carbono y cuando el metal de la soldadura es de alta aleación

En muchos casos las roturas en la raíz se continúan a través de la mayoría de los cordones subsecuentes, cuando estos se depositan y/o cuando se somete a cargas el área donde se encuentran.

Cuando se presentan roturas en la raíz, una o más de las modificaciones siguientes podrán ayudar a reducir las o eliminarlas:

- a) Cambiar la manipulación del electrodo o las condiciones eléctricas, las cuales modifican el contorno o la composición del depósito.
- b) Disminuir la velocidad de depósito para incrementar el espesor del cordón, y con ello proporcionar más metal de soldadura para resistir el esfuerzo que le sea impuesto.
- c) Usar precalentamiento para modificar la intensidad del sistema de esfuerzos que le sea impuesto.

ROTURAS DEBAJO DEL CORDON

Ocurren invariablemente a través de los granos de la zona afectada por el calor, especialmente en los aceros aleados. Son atribuidos al efecto del hidrógeno disuelto en la austenita y luego liberados cuando ésta se transforma.

Pueden ser evitadas en los aceros aleados mediante precalentamiento o por el uso de electrodos adecuados de bajo hidrógeno.

ROTURAS TRANSVERSALES

Estas roturas son perpendiculares al eje de la soldadura y en algunos casos se prolongan hasta el material base. Este tipo de roturas es más común en uniones de elementos sujetos muy rigidamente. (Ver fig. 3.16)

ROTURAS LONGITUDINALES

Normalmente se presentan al centro de la soldadura y pueden ocurrir a partir de la rotura del cráter del extremo del cordón de la soldadura. También pueden originarse como una prolongación a través de los cordones de soldadura sucesivos de una rotura que exista en el cordón de raíz. Si una rotura se forma en el primer cordón y no es removida completamente o fusionada por el cordón subsecuente, tiende a progresar dentro de este primer cordón, de ahí sucesivamente al siguiente cordón adyacente y en algunos casos aparece finalmente en la superficie. (Ver fig. 3.17)

Para obtener alguna mejora y reducir este tipo de roturas, para un electrodo y metal de base específicos, se efectúan variaciones en las condiciones eléctricas o diámetros del electrodo usado, también se suele engrosar los cordones y llenar los cráteres antes de cortar el arco eléctrico.

ROTURAS EN EL METAL BASE

Son generalmente longitudinales y ocurren dentro de la zona afectada por el calor del proceso de soldadura, y la mayoría de las veces se producen en materiales endurecidos. La dureza y fragilidad en la zona afectada

por el calor, son efectos metalúrgicos producidos por el ciclo térmico al soldar, y son entre otros los principales factores que tienden a causar roturas del metal base y las roturas debajo del cordón de soldadura depositado sobre el material base.

En el caso de los aceros de bajo carbono, carbono medio y aceros de baja aleación, el endurecimiento y la capacidad del material a deformarse sin romperse dependerá del grupo al cual pertenecen, y también dependerá de la velocidad de enfriamiento desde las elevadas temperaturas producidas por la operación de soldar hasta la temperatura ambiente. La velocidad de enfriamiento dependerá de varios factores, tales como la temperatura, el espesor, y conductividad térmica del material base; de la entrada de calor por unidad de tiempo a una sección de soldadura dada y de la temperatura ambiente. Con una velocidad de enfriamiento dada, los aceros de bajo carbono serán considerablemente menos duros que un acero de carbón medio, y consecuentemente menos propensos a romperse cuando se sueldan.

Las roturas en el metal base son asociadas con la falta de ductilidad en la zona afectada por el calor. Sin embargo se ha demostrado que diferentes cantidades de calor en un acero de igual dureza, varían apreciablemente la tendencia a originar roturas.

Los aceros endurecibles son generalmente los que más dificultades presentan para soldarse. Cuando se presentan roturas en el metal base en aceros endurecibles, pueden obtenerse ventajas procediendo de la siguiente manera:

- a) Usar precalentamiento apropiado.
- b) Incrementar la entrada de calor que retardará la velocidad de enfriamiento.
- c) Seleccionar el mejor tipo de electrodo.

DEFECTOS SUPERFICIALES

Son aquellos que se localizan en la superficie de la soldadura o del metal base adyacente a la misma, tanto en la cara anterior como en la posterior. En el caso de soldadura de tuberías los defectos superficiales pueden existir en el exterior y/o el interior de los tubos.

SOCAVADO

El socavado es la producción de una ranura por fusión en el metal base adyacente a la orilla o a la raíz de la soldadura y que no es rellenado por el metal de aporte. (Ver fig. 3.18)

El socavado es generalmente debido a la técnica inadecuada empleada por el soldador. El electrodo específico, demasiada alta corriente o excesiva longitud de arco pueden incrementar la tendencia a producir socavado. Sin embargo, diferentes tipos de electrodos muestran características muy variables a este respecto.

Con algunos electrodos, aún el más hábil soldador puede ser incapaz de evitar el socavado bajo ciertas condiciones, tales como posición difícil e inaccesibilidad de la unión.

El socavado en la cara de la ranura no afectará la soldadura, si se tiene cuidado de ampliar y redondear la muesca penetrante, mediante disco abrasivo o herramienta cinceladora, para evitar que quede atrapada escoria. Si un soldador es suficientemente experimentado y sabe cuando penetra el siguiente cordón, el esmerilado o cincelado no será siempre necesario, ya que será removida la escoria al ser fusionada.

El socavado en la superficie no debe permitirse, este materialmente reduce la resistencia de la unión, particularmente en cuanto a esfuerzos de fatiga. El socavado es fácilmente detectable por inspección visual de la superficie de la unión terminada, cuando ésta es accesible, y es corregido depositando material adicional.

QUEMADAS

Una quemada, a través de un área, es aquella parte del cordón de raíz donde la penetración excesiva ha causado que la fuente líquida de soldadura fundida sea soplada dentro del tubo por el arco eléctrico y gases del recubrimiento del electrodo, dejando un hueco o agujero generalmente de contorno oval. Este hueco o agujero es rellenado por el soldador al aplicar el segundo cordón, pero el material de relleno no siempre fusiona completamente con la orilla del agujero. (Ver fig. 3.19)

Este defecto solo se presenta al soldar tuberías por un solo lado, y es originada por deficiencias del soldador, tales como detener el arco más tiempo del necesario o incrustar demasiado el electrodo, dentro de la raíz de la unión.

Para reducir a un mínimo este defecto se deberá calificar a los soldadores que harán el cordón de raíz (fondeadores) para que muestren su capacidad para efectuar cordones de raíz sanos.

AGUJEROS EN LA SUPERFICIE

Durante el proceso de soldadura, en ocasiones, se presentan condiciones que causan agujeros en la superficie de la soldadura, variando su distribución desde varios por centímetro, a uno cada varios centímetros. Estos agujeros son porosidades producidas por el aire activo dentro de la atmósfera que protege al metal fundido. Cambiando la polaridad y la longitud del arco se puede lograr mejorar esta condición.

Una buena práctica es eliminar estos agujeros mediante cincelado o esmerilado antes de depositar el cordón subsecuente.

IRREGULARIDADES SUPERFICIALES

Estas irregularidades son variaciones en el ancho del último cordón o cordón superficial, depresiones, variaciones en la altura del refuerzo y la no uniformidad en el oscilado de la superficie. Son originados por la técnica de depósito, y condiciones eléctricas inadecuadas o por desventajas propias del trabajo, tales como posición incomoda que tenga el soldador al efectuar la soldadura, visibilidad impropia, etc.

3. Defectos en las propiedades del metal de la soldadura o de la unión soldada.

Ciertas propiedades mecánicas y químicas del metal base y la soldadura son requeridas de todas las soldaduras de una instalación dada. Las propiedades requeridas son especificadas en los códigos y normas aplicables. Apartarse de los requerimientos especificados deberá considerarse como un defecto.

a) Propiedades Mecánicas deficientes:

Las propiedades mecánicas que pueden no llenar los requerimientos prescritos por las normas, incluyen la resistencia a la tensión, el esfuerzo de cedencia, ductibilidad, dureza y resistencia al impacto.

b) Propiedades Químicas deficientes

Las propiedades químicas también pueden ser deficientes por una composición incorrecta del metal base o de la soldadura, lo cual puede perjudicar las propiedades mecánicas o a la resistencia a la corrosión.

Debe hacerse notar que no todos los defectos son debidos a condiciones impropias al soldar, muchos de estos problemas son atribuibles a la composición del metal base. Además de los requerimientos mencionados para el metal base se deberá considerar como material defectuoso aquel que tenga defectos de laminación, el que en la superficie este ondulado o tenga escamas del proceso de laminado, pintura, grasa, aceite, etc., o que sus dimensiones estén fuera de los límites permitidos.

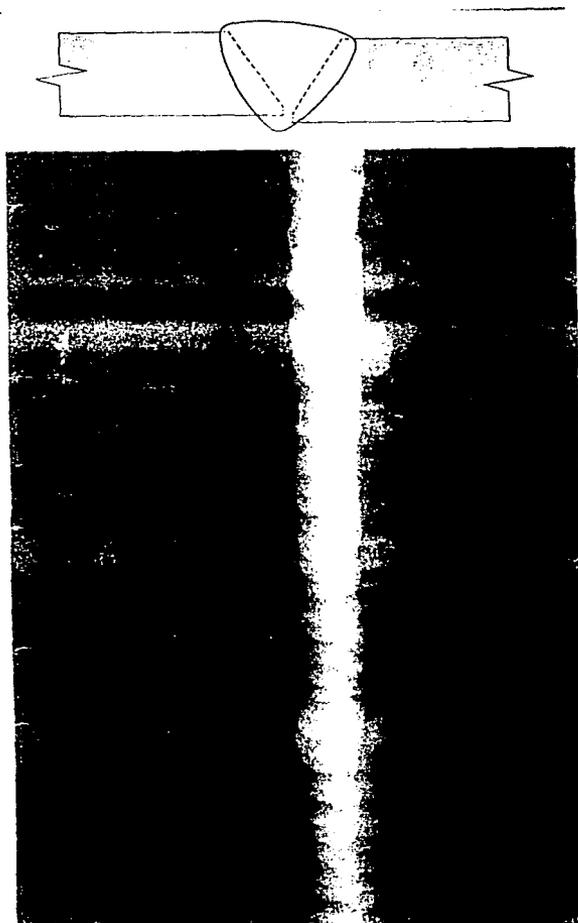


FIGURA 3.11 - RADIOGRAFIA QUE MUESTRA UNA PREPARACIÓN INCORRECTA DE LA UNION. UN CAMBIO ABRUPTO EN LA DENSIDAD DE LA PELÍCULA A TRAVÉS DEL ANCHO DE LA IMAGEN

Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.

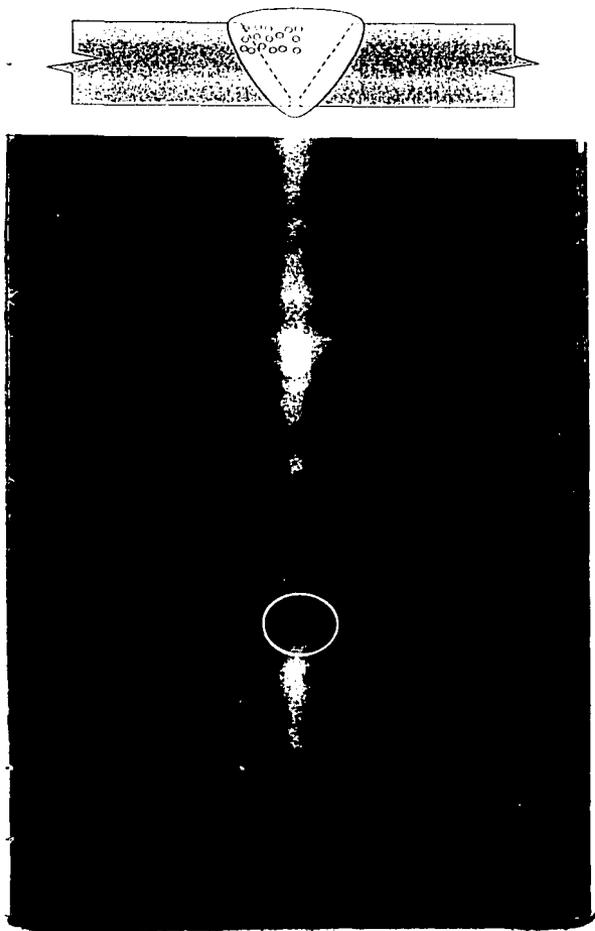


FIGURA 3.12 – RADIOGRAFIA QUE MUESTRA POROSIDADES. PUNTOS REDONDEADOS O LIGERAMENTE ALARGADOS DE UNA DENSIDAD MÁS OSCURA, AGRUPADOS PERO INRRREGULARMENTE ESPACIADOS

Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.

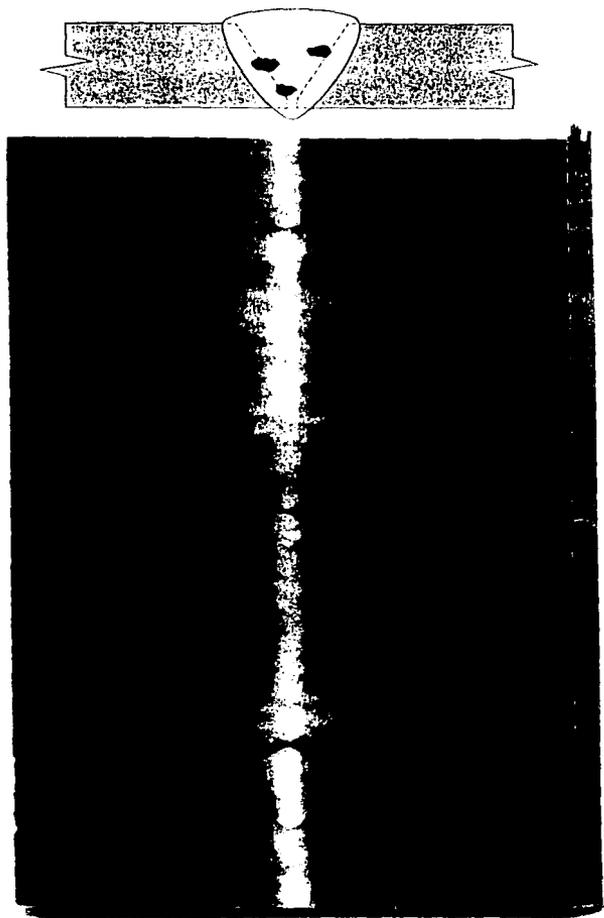


FIGURA 3.13 – RADIOGRAFIA QUE MUESTRA INCLUSIONES DE ESCORIA ENTRE LOS CORDONES. UN PUNTO DE FORMA IRREGULAR Y DE UNA DENSIDAD MÁS OSCURA, GENERALMENTE ALARGADO LIGERAMENTE Y ALEATORIAMENTE ESPACIADO
Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.

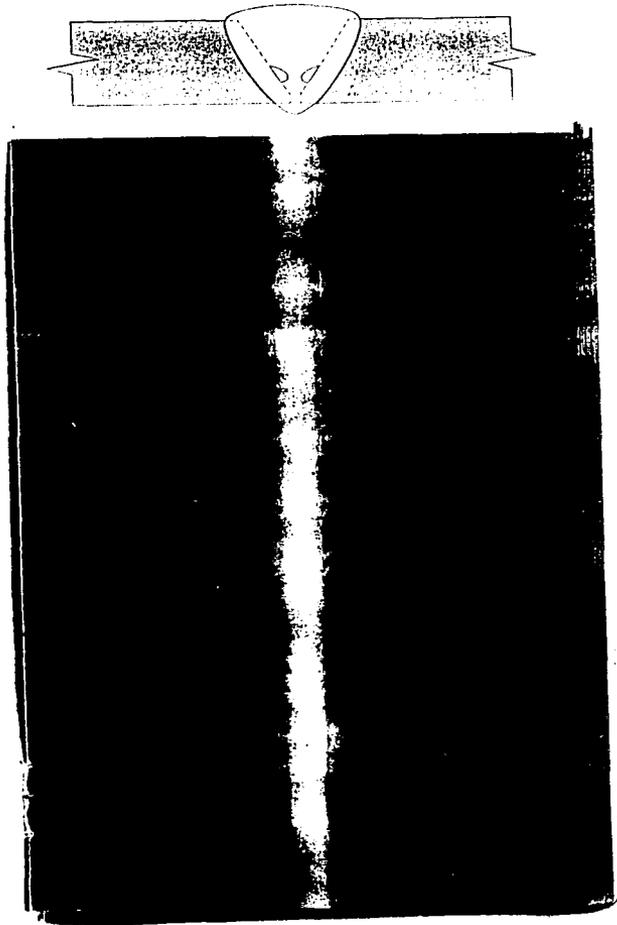


FIGURA 3.14 – RADIOGRAFIA QUE MUESTRA FALTA DE FUSIÓN DE LA PARED LATERAL. LINEAS ALARGADAS, PARALELAS O SENCILLAS, DE UNA DENSIDAD MÁS OSCURA, A VECES CON PUNTOS DISPERSOS A LO LARGO DE LA LINEA DE FUSION, QUE ES RECTA EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL.

Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.

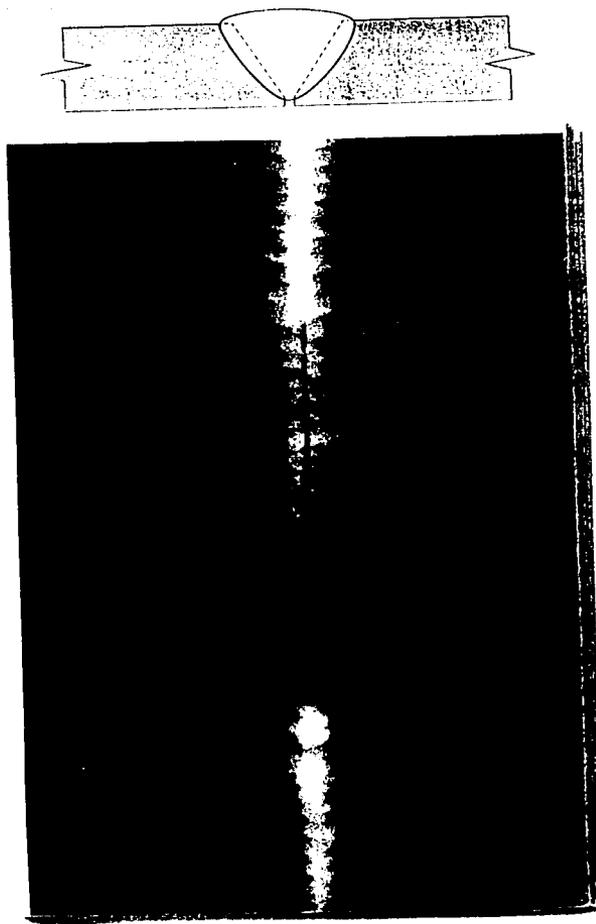


FIGURA 3.15 – RADIOGRAFIA QUE MUESTRA PENETRACIÓN INCOMPLETA O FALTA DE PENETRACIÓN. UNA BANDA DE DENSIDAD MÁS OSCURA, CON BORDES PARALELOS MUY RECTOS, EN EL CENTRO DEL ANCHO DE LA IMAGEN.

Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.

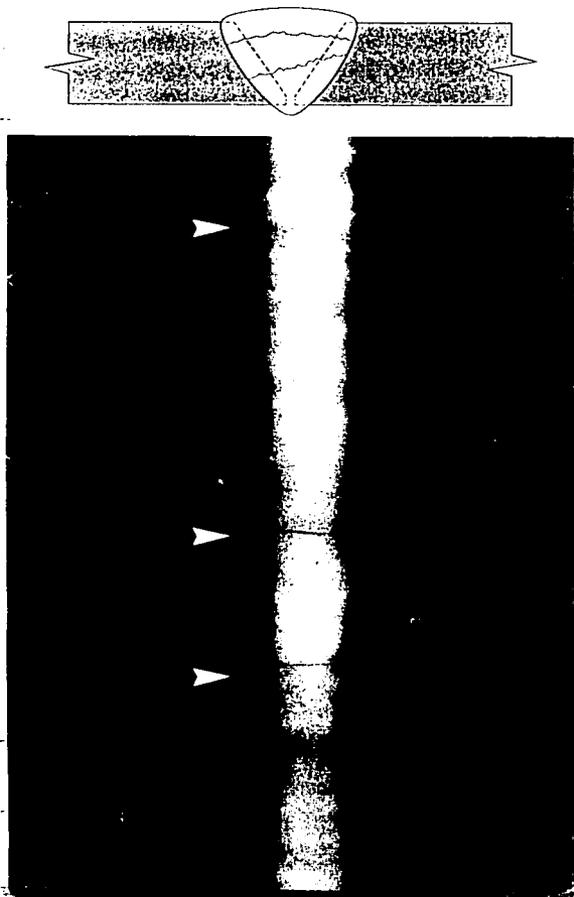


FIGURA 3.16 – RADIOGRAFIA QUE MUESTRA ROTURA TRANSVERSAL. LINEA RETORCIDA Y ONDULADA DE UNA DENSIDAD MÁS OSCURA A TRAVÉS DE TODO EL ANCHO DE LA IMAGEN
Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.

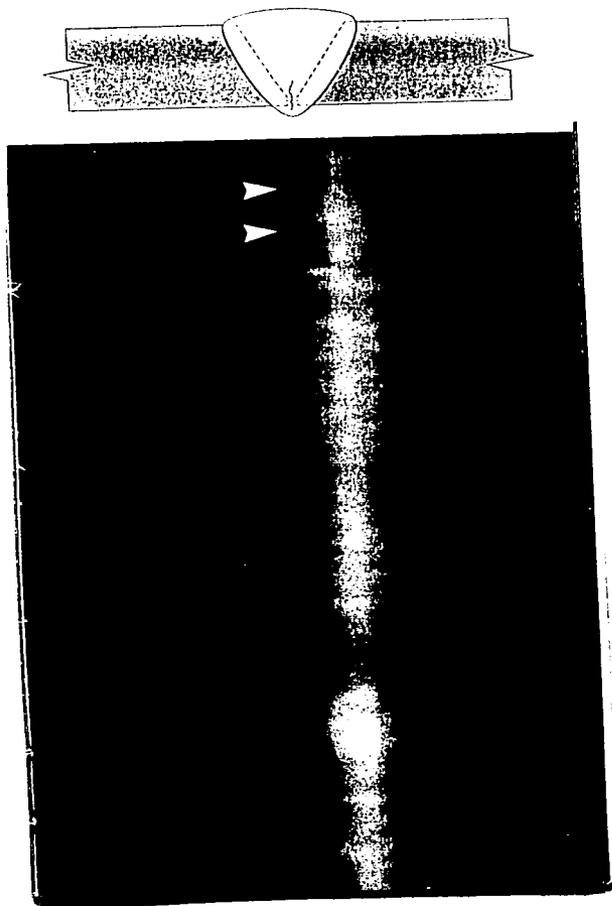


FIGURA 3.17 - RADIOGRAFIA QUE MUESTRA ROTURA LONGITUDINAL. LÍNEAS RETORCIDAS Y ONDULADAS DE UNA DENSIDAD MÁS OSCURA EN CUALQUIER LUGAR A TRAVÉS DEL LARGO DE LA IMAGEN.

Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.

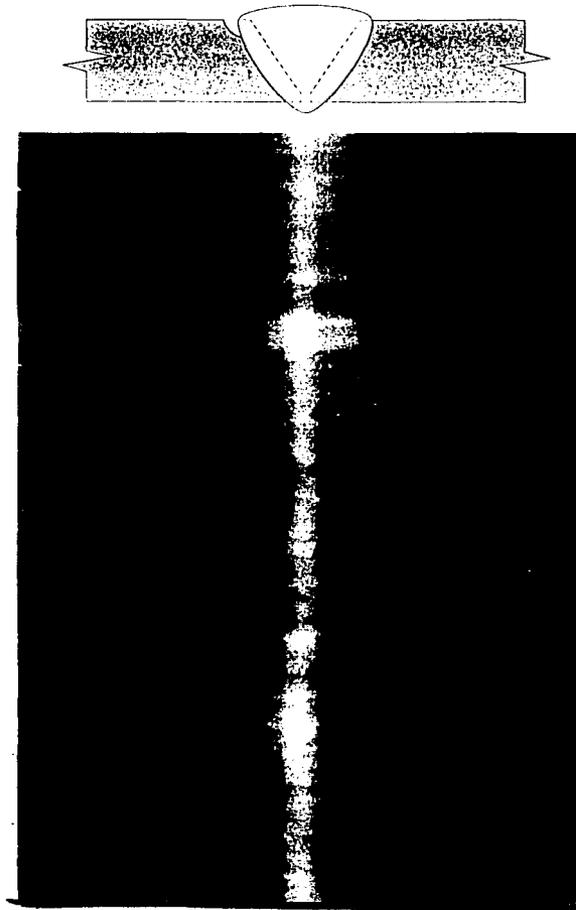


FIGURA 3.18 - RADIOGRAFIA QUE MUESTRA SOCAVADO. UNA DENSIDAD IRREGULAR MÁS OSCURA A LO LARGO DEL BORDE DE LA IMAGEN. DICHA DENSIDAD SIEMPRE SERÁ MÁS OSCURA QUE LA DE LAS PIEZAS A SER SOLDADAS.

Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 3.19 - RADIOGRAFIA QUE MUESTRA SOLDADURA QUEMADA A TRAVÉS. UNA DENSIDAD LOCALIZADA MÁS OSCURA CON BORDES BORROSOS EN EL CENTRO DEL ANCHO DE LA IMAGEN. PUEDE SER MÁS ANCHA QUE LA IMAGEN DEL CORDÓN DE LA RAÍZ.
Fuente: NDT Dupont Systems. Referencia radiográfica para la interpretación de soldaduras.

CAPÍTULO IV

**DEFECTOS QUE SE PRESENTAN
EN LAS TUBERÍAS DE
CONDUCCIÓN**

4.1 LAMINACIONES EN TUBERÍA DE CONDUCCIÓN

Las laminaciones en tuberías para conducción, son discontinuidades de tipo planar, paralelas a la pared del tubo y que normalmente son consideradas como defectos. La especificación ASME B31.4 las cataloga como rechazables si sus dimensiones son mayores de 12 plg^2 . Sin embargo la experiencia práctica ha demostrado que los ductos poseen, y de hecho, han operado durante años con laminaciones de tamaños mucho mayores, lo que sugiere que los márgenes de tolerancia de este tipo de defectos establecidos en las normas y códigos de referencia usuales pueden ser demasiado conservadores.

Normalmente, las laminaciones son dictaminadas como defectos severos y los tramos de ducto que las contienen se programan para reparación mediante la instalación de camisas¹ de reemplazo de la tubería. Esto se hace, aún sin conocer el efecto de este tipo de defecto en la resistencia residual del ducto, porque no existen criterios cuantitativos para su evaluación ni un análisis del comportamiento mecánico para seleccionar el tipo de envolvente adecuado, cuando la reparación se realiza con ésta técnica.

Actualmente, los grandes avances en la calidad y sensibilidad de las inspecciones con diablos instrumentados² han llevado a un incremento notable en la cantidad de laminaciones detectadas en ductos inspeccionados en servicio. Esto se debe a que durante la fabricación de las tuberías, solo se inspeccionan al 100% las uniones soldadas, mientras que el cuerpo del tubo es inspeccionado sólo parcialmente; haciendo que muchos tubos lleguen al campo con laminaciones en su interior.

Por otra parte la falta de una especificación de acero para servicio amargo (los hidrocarburos) motivó que en el pasado, muchos ductos se construyeran de aceros susceptibles al agrietamiento inducido por hidrógeno, que produce laminaciones.

Como los diablos instrumentados de alta resolución realizan una inspección al 100% del cuerpo del tubo, las laminaciones, de fabricación o por servicio que antes no eran detectadas, ahora los son.

Dada la gran cantidad de tramos con laminaciones reportados en ductos de conducción de hidrocarburos que son inspeccionados con herramientas de alta resolución y al alto costo y riesgo que implica la reparación o reemplazo de estos, es necesario establecer criterios cuantitativos para evaluar la severidad de laminaciones y con base en esto, determinar si realmente representan un riesgo que justifique una acción correctiva.

4.1.1 TIPOS DE LAMINACIONES

Las laminaciones pueden presentarse de varias formas y tamaños en una tubería y tienen una influencia variada sobre la integridad mecánica: que puede ser desde completamente inocuas, hasta muy severas. La severidad de una laminación depende básicamente de sus características físicas, por lo tanto, es importante clasificarla correctamente como primer paso para hacer una evaluación de su severidad. La identificación de las laminaciones se hace por su forma, localización y origen. La tabla 1, a continuación presenta esta clasificación.

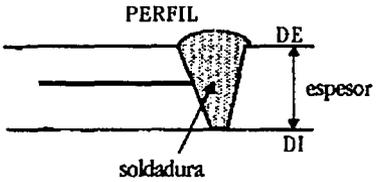
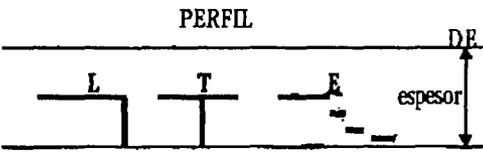
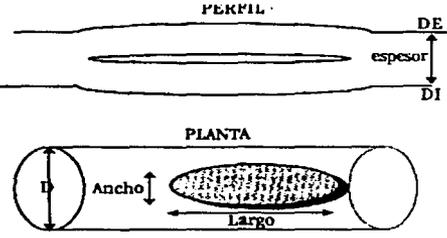
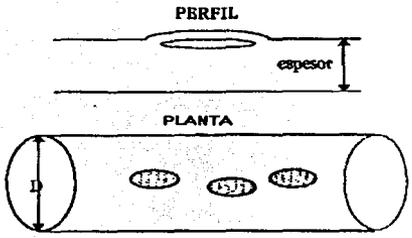
Por Forma	Por Localización	Por Origen
<ul style="list-style-type: none"> • Planas simples • Discontinuas • Escalonadas • Inclınadas • Abultadas o ampolladas 	<ul style="list-style-type: none"> • Aisladas • Conectadas a soldaduras • Conectadas a la superficie • Combinadas con otros defectos 	<ul style="list-style-type: none"> • De manufactura, que a su vez son: <ul style="list-style-type: none"> - de rolado - Bandas de inclusiones - Traslapes • De servicio, causadas por absorción de hidrógeno.

TABLA 3.1.- CLASIFICACIÓN DE LAS LAMINACIONES PROPUESTA POR EL INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO.

La tabla 3.2, muestra una representación esquemática de las laminaciones más comúnmente encontradas en ductos, junto con sus características principales. Debe recordarse que las laminaciones son formadas por el servicio o por fabricación, por lo que es muy probable que más de un tramo de tubería esté laminado, si previamente se ha detectado su presencia.

Si la laminación es de manufactura, es posible que un lote completo de tubo presente el defecto, mientras que si son generadas por servicio, la probabilidad de que el daño en la tubería sea general es alta, dado que tiene el mismo ambiente y la misma especificación de material en todo el ducto.

TIPO	FORMA	CARACTERÍSTICAS
Simple		<p>Pueden ser de rolado o inducidas por hidrógeno. Las de rolado son más largas y menos anchas que las de Agritamiento Inducido por Hidrógeno (AIH).</p> <p>Las laminaciones por AIH son más rectangulares y pueden ser discontinuas y con escalonamiento.</p>
Escalonada.		<p>Es la típica laminación de Agritamiento Inducido por Hidrógeno (AIH). Se presenta como una agrupación de laminaciones en un mismo tramo de tubo. Suele acompañarse de corrosión interior uniforme.</p>

<p>Conectada a soldadura</p>		<p>Se presenta en cualquier tipo de laminación.</p> <p>Generalmente no traspasa la soldadura.</p> <p>A veces, dos laminaciones conectan una soldadura a cada lado y parece que la atraviesan, pero generalmente, esto no ocurre.</p>
<p>Conectada a la superficie.</p>		<p>Se puede presentar en cualquier tipo de laminación, pero es más común en las laminaciones por AIH y en las abultadas.</p> <p>La conexión puede ser :</p> <ul style="list-style-type: none"> *Por el extremo, L *En la longitud, T *Escalonada, E
<p>Abultada larga</p>		<p>Se forman cuando una laminación simple muy larga (de más de 300 mm) se llena de gas o cuando el tubo se pandea.</p> <p>El abultamiento puede ser en un solo lado de la pared o en ambos.</p> <p>Superficialmente se observa como una protuberancia de forma ovalada</p> <p>Puede presentar agrietamientos radiales en los extremos.</p>
<p>Ampolla</p>		<p>Técnicamente es igual a una abultada larga, excepto por el tamaño. Se forma por la absorción de gas en una laminación cerca de una superficie libre.</p> <p>Su forma es casi circular y casi siempre se presentan en grupos.</p> <p>Cuando el ampollamiento es severo, se forman grietas tipo T o L</p>

<p>Banda de inclusiones</p>		<p>Son áreas estrechas donde se acumulan gran cantidad de inclusiones no metálicas, por segregación o atrapamiento de escorias.</p> <p>La indicación es discontinua. El proceso de rolado produce bandas alargadas que son caracterizadas como inclusiones.</p>
<p>Traslape</p>		<p>Son producidas por un traslape de la placa durante el rolado. Se presentan cercanas a la superficie.</p>

* TABLA 4.2.- TIPOS DE LAMINACIONES COMUNES EN TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN

4.1.2 ESTUDIOS DE LABORATORIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAMINACIONES

En estudios realizados por el IMP, reportados anteriormente (Ductos, órgano de información del comité interorganismos de ductos, publicación bimestral mayo-junio 2000), se describen en detalle los resultados del comportamiento mecánico de laminaciones en tubos con presión interna.

En resumen, los principales resultados de estos estudios se resumen en lo siguiente:

- Los factores de intensidad de esfuerzos de cuatro configuraciones de grietas combinadas con laminaciones fueron obtenidos, encontrando que el factor de intensidad de esfuerzos es de bajo a moderado y solo es significativo en la grieta radial cuando hay escalonamiento o agrietamiento secundario.
- En las pruebas hidrostáticas hasta la falla, se encontró que las laminaciones simples abultadas, las bandas de inclusiones y la laminación con conexión a una soldadura fallan a una presión cercana a la presión de falla de un tubo sano y la fractura es en forma de un labio de corte longitudinal con un abombamiento hacia el exterior y se localiza justo en el área marcada como defectuosa. La figura 4.1 muestra la preparación de un tubo para prueba hidrostática.
- La concentración máxima de esfuerzo en la zona del defecto, con respecto al esfuerzo en la zona sin defecto fue del 34%. En cuanto a la tensión acústica, la cual indica la actividad del defecto, ya sea en forma de deformación plástica o agrietamiento, ésta solo se presentó unos segundos antes de la falla final.

Todas las características arriba descritas indican que el material comenzó a fracturar a esfuerzos cercanos a su resistencia máxima y que los defectos presentes no indujeron una iniciación de la falla a niveles de esfuerzos menores.

Por otra parte, en pruebas de tensión uniaxial en placas con laminaciones extraídas de tuberías retiradas se ha observado que este defecto no reduce el límite de cedencia ni la resistencia máxima del material y únicamente afecta la contracción lateral del material, es decir reduce su ductilidad, lo que implica que las laminaciones con escalonamiento menor al 20% del espesor solo son nocivas cuando se ha rebasado la cedencia.

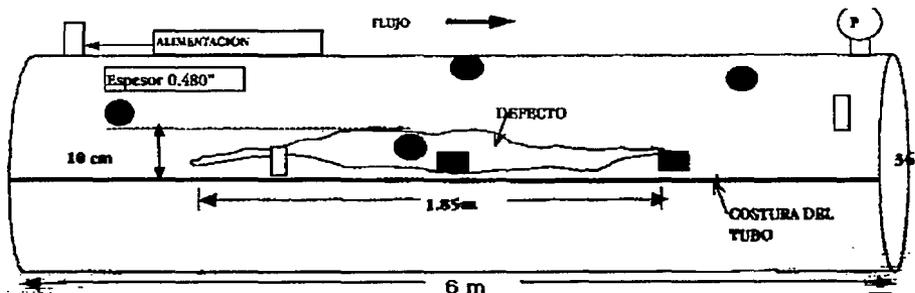


Fig. 4.1 Localización de sensores para la prueba hidrostática de un tubo con laminación.

4.1.3 EVALUACIÓN DE LA SEVERIDAD DE LAS LAMINACIONES

Los operadores de líneas de conducción con frecuencia adoptan criterios de evaluación de materiales establecidos en normas de construcción o realizan cálculos de severidad suponiendo la laminación como una pérdida de espesor. El uso de estos criterios, frecuentemente resulta en una sobrestimación de la severidad de una laminación, lo que lleva a la realización de reparaciones innecesarias o en el peor de los casos en el retiro de ductos que todavía podrían dar años de servicio seguro. El siguiente ejemplo ilustra este caso.

Suponga una laminación simple al 50% del espesor en un ducto de 24" D.N. y 0.400" de espesor que opera a una presión de 50kg/cm². Para analizar su severidad se asume que la laminación equivale a una pérdida de espesor de 50%, o sea que el espesor remanente es de 0.200". Para un tubo grado API 5L X52, la presión máxima permisible de operación (PMPO) ES:

$$PMPO = 2S t fs / D$$

Donde: S = límite de cedencia (52 psi)
 T = espesor remanente (0.200")
 D = diámetro nominal (24")
 FS = factor de seguridad (0.6 en este caso)

Sustituyendo valores obtenemos una PMPO de 36.54 Kg/cm², que es menor que la presión de operación y por tanto el dictamen sería reducir la presión o reparar el tramo.

Esta solución no es realista porque una laminación de este tipo no reduce la resistencia de una tubería, como se verá más adelante.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

4.1.4 CATEGORÍAS DE SEVERIDAD EN LAS LAMINACIONES

A fin de evaluar la severidad en las laminaciones se definen tres categorías de severidad, establecida en términos de la resistencia residual del tubo, es decir, de su capacidad de soportar presión interna. Las categorías son las siguientes:

- a) *Categoría A (Severidad baja).*- No reduce la resistencia residual pero puede significar un riesgo cuando se suelda la tubería, pueden evolucionar como abultadas o escalonadas. Pertenecen a esta categoría las laminaciones simples completamente contenidas en el espesor y las bandas de inclusiones.
- b) *Categoría B (Severidad media).*- Reducen la resistencia residual del tubo. Su severidad se establece en base en su forma y dimensiones, siendo las dimensiones significativas: el largo, ancho, circunferencial y fracción en el espesor ocupada por la laminación. Son de esta categoría las laminaciones con escalonamiento, con conexión limitada con la superficie, en contacto con soldaduras y con abultamientos moderados.
- c) *Categoría C (Severidad alta).*- Representan un riesgo inminente de falla o una disminución fuerte de la resistencia residual. Su análisis se realiza caso por caso y llega a requerir simulación por elemento finito o pruebas a escala real para probar su efecto en la integridad del tubo. Se ubican en esta categoría las laminaciones combinadas con otros defectos como la corrosión, las que presentan una rapidez de crecimiento alta y las que evolucionan rápidamente a geometrías más severas. Son de este tipo las que presentan conexión con la superficie mediante grietas radiales y las excesivamente abultadas.

4.1.5 EFECTO EN LA INTEGRIDAD POR TIPO DE LAMINACIÓN

- *Laminación simple.*- Es la menos severa, pues solo llega a afectar durante la soldadura. Sin embargo su análisis debe hacerse en función de su posible evolución, ya que eventualmente pueden tornarse en abultadas o conectadas a la superficie. Si su tamaño es muy grande se recomienda tratarlas como categorías B o C y repararlas.
- *Laminación conectada a soldadura.*- Es frecuente que una laminación se conecte a la soldadura de campo o a la costura longitudinal del tubo. En el primer caso, existirá una alta sensibilidad a los esfuerzos por flexión y a la expansión longitudinal de la tubería, por lo que la severidad de esta laminación depende directamente de su ancho circunferencial, en especial si este contiene grietas, poros o discontinuidades circunferenciales. Debido a la dificultad para detectar este tipo de combinaciones, es razonable suponer que existen y en tal caso el análisis se hace como si se tratara de una grieta circunferencial no pasante. De acuerdo a la mecánica de la fractura, la presencia de la grieta resulta en un factor de intensidad de esfuerzos (K_I) que cuando su valor es mayor o igual a la tenacidad a la fractura del acero, definida como K_{Ic} , el tubo presentará un riesgo de falla y deberá repararse.
- *Laminación escalonada.*- Estas laminaciones en realidad son una serie de laminaciones intermitentes ubicadas a diferentes profundidades en el espesor que pueden llegar a interconectarse, formando escalones. Su severidad se determina por el por ciento de escalonamiento, que es la separación máxima entre las profundidades de las indicaciones dividida entre el espesor total, siempre y cuando el escalonamiento este completamente contenido en el espesor.
- *Conectada a la superficie.*- Son laminaciones cuya inclinación, escalonamiento o grietas asociadas hacen una conexión con una de las superficies libre del tubo; generalmente la interna. Su severidad depende de la profundidad y de la longitud de la conexión. Aunque estas laminaciones pueden no

reducir de manera importante la resistencia de una tubería, se recomienda considerarlas como rechazables, pues su evolución es incierta al permitir el ingreso del fluido a la cavidad de la laminación. La reparación debe hacerse con una envolvente metálica contendora de presión con o sin relleno dependiendo de la severidad.

- *Laminación abultada y ampollas.*- Es una laminación en la que la absorción de gas (hidrógeno) o la deformación del tubo producen un levantamiento de alguna o ambas de sus paredes resultando en un abultamiento o ampolla. La severidad de este tipo de laminación depende de la magnitud del abultamiento. Si el abultamiento es excesivo, la deformación generada puede rebasar el límite de cedencia del acero y generar agrietamientos al centro o en los extremos del abultamiento, por lo que su severidad es directamente proporcional a la altura del abultamiento.
- *Banda de inclusiones.*- La banda de inclusiones puede considerarse un caso particular de las laminaciones intermitentes escalonadas, con la característica de que las continuidades son muy pequeñas. Generalmente si las inclusiones están dispersas y completamente contenidas en el espesor, su efecto adverso es mínimo; pero si se encuentran agrupadas continuamente y en un intervalo de espesor relativamente grande pueden llegar a comportarse como laminaciones escalonadas. Si la banda de inclusiones es muy larga, estrecha y presenta indicaciones significativas en un barrido transversal con haz de luz angular, deberá tratarse como si fuera una grieta. Por otra parte, si están dispersas pero en gran cantidad, deben evaluarse como laminaciones escalonadas.

4.2. REPARACIÓN DE TUBERÍAS CON LAMINACIÓN

Si el análisis de la integridad indica que una laminación es rechazable, la tubería se puede reparar por corte y reemplazo o mediante la instalación de una envolvente. La selección de la técnica de reparación no es simple, ya que para la mayoría de las laminaciones se desconoce la forma en que evolucionan y por otra parte porque varios tipos de envolventes parecen funcionar igualmente. Si la reparación se realiza mediante la colocación de una envolvente externa (camisa), la consideración más importante para la selección de la camisa es si la laminación va a producir una fuga o no, pues como se vió en la sección anterior, la mayoría de las laminaciones degradan muy poco la resistencia de un tubo. Si no existe riesgo de fuga y el mecanismo de falla es por expansión radial, la recomendación de reparación es mediante una camisa tipo A metálica y soldada circunferencialmente, de una extensión que cubra la totalidad de la zona defectuosa más un excedente por el crecimiento estimado de la laminación en el tiempo proyectado de servicio. La reparación con camisas tipo A aplica a laminaciones simples, ligeramente abultadas o escalonadas y bandas de inclusiones.

Si existe el riesgo de fuga, la reparación debe hacerse con una camisa tipo B sin relleno para las menos severas, que son las abultadas, conectadas a soldaduras por arco sumergido, hasta camisas tipo B con relleno presurizado para las abultadas más severas y las conectadas a la superficie.

Las laminaciones y ampollas por AIH continúan creciendo aún debajo de una camisa, por lo que la recomendación en este caso es usar una camisa tipo B cuya longitud cubra la longitud de la laminación más la longitud estimada del crecimiento.

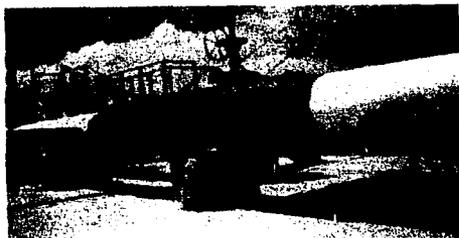


Fig. 4.3 Envolvente rellena con resina para reparación de laminación.

Las compañías dedicadas a la operación y mantenimiento de tubería de conducción, necesitan tener los conocimientos apropiados para tomar la determinación adecuada, si un defecto descubierto en el acero de la tubería, debe ser reparado o una sección del tubo debe ser reemplazada. En caso de reparación, las tecnologías disponibles, técnicas de aplicación y materiales, deben de ser conocidas.

El método común utilizado para una evaluación más exacta de la tubería, y mediciones de espesores disminuidos por picaduras de corrosión es el uso de una herramienta interna que proporciona información. La herramienta utilizada para este tipo de inspección de tubería es comúnmente identificada como un instrumento inteligente llamado "Diablo instrumentado". El "diablo instrumentado" es considerado inteligente cuando es utilizado para medir y registrar información sobre el espesor de la pared de la tubería y es utilizada para evaluar la integridad de la tubería. Estos "Diablos Instrumentados" también son conocidos como herramienta de inspección interna y herramientas inteligentes.

Una descripción detallada sobre el funcionamiento del "Diablo Instrumentado" se localiza en el apéndice II de este trabajo de tesis.

4.3. IDENTIFICACIÓN DE DEFECTOS

Las inspecciones con "Diablos Instrumentados", pueden proveer información de la tubería en soldaduras, ramales, válvulas y cambios en los espesores a lo largo de las paredes con información acerca de los daños y laminaciones o defectos por los cuales el "Diablo instrumentado" fue diseñado para localizar.

Los dos tipos de "diablos Instrumentados" utilizados para detectar daños por corrosión del metal en el acero de la tubería, son el de Fuga de Flujo Magnético y el de Radiación Ultrasónica.

Los dos objetivos de una inspección de tubería son la detección de los defectos y la medida de los defectos.

Los "Diablos" son utilizados para encontrar un tipo particular de defecto. Los "Diablos" no siempre pueden encontrar los defectos dependiendo de su tamaño y variaciones del material en el acero. "Los diablos" también pueden detectar defectos muy pequeños, pero entre más pequeño el defecto se puede hallar una alta probabilidad de error.

La precisión en la medición de los defectos por una inspección de "Diablo Instrumentado" esta directamente relacionado al costo del servicio.

Una alta precisión en la inspección generalmente es apropiada cuando:

- El costo de excavación es alto.
 - Bajo el agua.
 - Zonas en medio ambientes hostiles.
- El costo de una interrupción de operación de la tubería es alto.
 - Área de medio ambiente sensible.
 - Producto peligroso.
 - Área con alta densidad de población.
- Se sospecha de la existencia de un gran número de defectos.
 - Por excavaciones previas.

Una menor precisión en la inspección generalmente es apropiada cuando:

- Hay largos tramos de tuberías por recorrer en áreas remotas.
- No hubo una inspección previa con "Diablos Instrumentados"
- La tubería es vieja.
- Existe sospecha de una cantidad pequeña de defectos.
- De cualquier modo se planea excavar en todas las detecciones.

Antes de iniciar una inspección de una tubería con herramienta inteligente, se necesitan tomar decisiones sobre los defectos sobre los cuales se deba excavar e inspeccionar, si los defectos pueden ser reparados, o se debe reemplazar el tramo de tubo, y que método de reparación debe ser utilizado. Un ejemplo de una clasificación de defecto de corrosión simple para priorizar las inspecciones es:

Defectos de Categoría 1 - menos de 20 por ciento de daño en el espesor de la pared del tubo.

- Poco probable que falle en servicio.
- Puede ser aceptado por ASME B31G
- El menos crítico.

Defectos de Categoría 2 – Entre 20 y 50 por ciento de daño en el espesor de la pared del tubo.

- Pequeña posibilidad de falla en servicio.
- Puede no ser aceptable por ASME B31G dependiendo de la longitud del defecto.

Defectos de Categoría 3 – Mayores a 50 por ciento de daño en las paredes de la tubería.

- Potencial para falla en servicio a lo largo del defecto.
- Solamente defectos cortos son aceptados por ASME B31G
- El más crítico.

4.4 VALORACIÓN DE LOS DEFECTOS

El propósito de la medición y caracterización de la corrosión y otros defectos, es determinar lo que queda de espesor en la pared de la tubería de acero. Un levantamiento de espesores remanentes en las paredes, puede ser llevado a cabo directamente mediante medidores de espesores por ultrasonido. Estos medidores pueden utilizarse para medir defectos de corrosión tanto en el interior como en el exterior de la tubería.

La primera solución desarrollada para determinar la resistencia remanente en una tubería corroída fue ASME B31G2.4. ASME B31G fue desarrollado a principios de los años 70's para predecir anomalías en la presión por defectos de corrosión. El cálculo de la presión en una tubería que conduce a su capacidad y que tiene un defecto de corrosión, se basa en la profundidad del defecto, en el ancho del defecto y en el límite de elasticidad del material del tubo. Si la presión a la que conduce la tubería excede la presión de operación máxima permisible por un margen de seguridad suficiente, el segmento corroído puede permanecer en servicio. Si no es así debe ser reparado o reemplazado.

Una desventaja del ASME B31G es que puede ser algunas veces demasiado conservador, resultando a veces que se tienen que llevar a cabo cortes innecesarios en la tubería. Por ello fue llevado a cabo el desarrollo del RSTRENG (B31G modificado) a principios de los 80's. El RSTRENG se basa en una mejor estimación del espesor remanente de la pared de la tubería con defecto de corrosión. El RSTRENG fue desarrollado con datos empíricos para formar una base de datos. Es más complejo para calcular que el B31G, pero las lecturas pueden ser leídas al implementarse en tablas y hojas de datos.

El uso extendido de computadoras personales ha dado a pie al desarrollo de un software para el RSTRENG. Las características de este software son las siguientes:

- Requiere la introducción, de la geometría del defecto más detallada.
- Provee resultados menos conservadores, pero continuos teniendo así un seguimiento significativo.
- Recomienda precaución cuando se aplica para tubos de baja ductilidad.

Las ventajas del RSTRENG son:

Es significativamente menos conservador que el ASME B31G y esto dará como resultado una menor cantidad de cortes y reparaciones.

La introducción de un sistema de reparación que consiste en un cilindro compuesto de fibra reforzada, llamado Clock Spring, ha permitido el desarrollo de un programa (software) de computadora para windows, llamado GRIWrap que da la capacidad al usuario para llevar a cabo un análisis de resistencia sobre un defecto en la tubería. El software duplica los rangos de estimación en cuanto a profundidades del defecto y longitudes en los defectos axiales en una sección de tubo dañada o corroída, y así predecir las acciones pertinentes que hay que llevar a cabo: 1) si no es necesario reparar; 2) si un cilindro compuesto de fibra reforzada (Clock Spring) puede ser utilizado; o 3) si el tubo necesita ser reemplazado.

4.5 TÉCNICAS DE REPARACIÓN

Los más nuevos compuestos de fibra de vidrio, son ampliamente aceptados para utilizar técnicas de reparación con soldadura. El personal que trabaja con las tuberías debe comprender completamente los pros y contras de las opciones de reparación. Típicamente, los defectos en las tuberías han sido reparados del siguiente modo:

- Esmerilando la anomalía para reducir efectos de concentración de esfuerzos.
- Depositando soldadura como relleno de metal para reemplazar la pérdida de espesor de la pared del tubo.
- Reforzando con un envolvente circunferencial total sin presurizar (Tipo A).
- Sellando el defecto con un envolvente conteniendo presión o sujeto en los extremos con abrazaderas.
- Calentando el tubo y eliminando los defectos vía golpes con martillo.
- Reforzando con nuevos materiales compuestos de fibra de vidrio reforzados.

Las variables que se deben obtener en los defectos, antes de tomar una decisión para hacer una reparación, son las dimensiones del tubo, el límite de elasticidad del material del tubo, la profundidad del defecto, la longitud axial del defecto, el factor de la forma geométrica, presión de instalación, máxima presión de operación permisible de la tubería, tipo de locación (densamente poblada o no), y cualquier otra norma aplicable por las compañías fabricantes de tubería. Los procedimientos para evaluar si se repara o no el tubo, del más conservador al que menos lo es, serían: ASME B31G, RSTRENG, y GRIWrap.

Los operadores de tuberías deben considerar un orden de posibilidades. La tabla 1 es un sumario para las aplicaciones de reparación de defectos, considerando diferentes locaciones, tamaño y tipo. Un operador debería considerar los detalles de reparación en el siguiente orden: localización de la tubería, de la localización del defecto sobre la pared la tubería, tipo de defecto y el tamaño del defecto.

Localización	Esmerilado	Depósito de Soldadura	Envolvente Tipo A	Envolvente Tipo B	Envolvente Compuesto	Envolvente Con abrazaderas	Martillo en Caliente
Mar a dentro	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí
En tierra	sí	no	Condiciona	no	sí	sí	Condiciona
Localización del defecto							
Tubería recta	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí
Curva gradual.	sí	sí	Configuración especial	Configuración especial	sí	sí	sí
Curva cerrada	sí	sí	Configuración especial	Configuración especial	Configuración especial	no	no
Defecto interno	no	no	Condiciona	sí	Condiciona	sí	no
Defecto externo	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí
Tipo de Defecto							
Fuga	No	No	No	Sí	No	Sí	Sí
Abolladura	No	No	Condiciona	Sí	Condiciona	Sí	No
Grieta < 0.4 Espesor	Sí	Sí	Sí	Sí	Condiciona	Sí	Sí
Grieta > 0.4 Espesor	No	No	No	Sí	No	Sí	Sí
Curva con pliegues	No	No	Configuración especial	Configuración especial	No	No	No
Manchas fuertes	No	No	Sí	Sí	No	Sí	No
Quemadura.	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Defectos de soldadura	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Ampollas	No	No	Sí	Sí	No	Condiciona	No
Tamaño del defecto							
Grande Área > Diámetro	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Pequeño Área < Diámetro							
Hoyo < 0.8 Espesor	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Hoyo > 0.8 Espesor	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	No	No	condiciona	Sí	No	Sí	Sí

Fuente: Pipeline & Gas Journal, Marzo de 2000.

TABLA 4.3 SUMARIO PARA APLICACIONES DE REPARACIÓN

Las reparaciones con soldadura han sido aceptadas desde hace mucho tiempo. La mayoría de los operadores sienten la comodidad del trabajo con la soldadura apropiada o envolventes mecánicos para reparar defectos en tuberías. Soldar sobre tuberías en servicio tiene riesgos para los operadores de tuberías. Estos riesgos son:

- Quemar la pared de la tubería, atravesándola o fundiéndola.
- Evaporación o separación de hidrógeno.
- Descomposición del metal.
- Defectos previos causados por un soldador.

Estos factores de riesgo necesitan ser evaluados previamente para la elección de un método de reparación con soldadura.

Las técnicas de depósito de metal mediante soldadura han sido probadas, para los casos en la que el defecto está localizado sobre curvas muy cerradas, para las cuales el método del envoltivo es inapropiado. La reparación por relleno con soldadura es factible a 900 psi para un tubo de mínimo 0.125 pulgadas de espesor de la pared. En diámetros pequeños, es preferible utilizar electrodos con bajo contenido de hidrógeno con una limitada aplicación de calor. La restauración de las fuerzas estáticas es realizada mediante el depósito de metal de soldadura para rellenar el espesor de la pared del tubo.

Existen dos categorías generales para reforzar con envolventes. El tipo A, los cuales no se soldan en sus extremos y el tipo B cuyos extremos deben ir soldados. Las diferencias más representativas entre estos dos tipos son, que los envolventes tipo B pueden ser utilizados para reparar defectos con fugas, reforzar defectos de corrosión interna, y son utilizados más frecuentemente para áreas grandes con defectos. Un entrenamiento adecuado de técnicas de soldadura, es parte del procedimiento para la apropiada instalación de estos envolventes. Los envolventes mecánicos requieren menos pericia del operador para su instalación, sin embargo son generalmente más caros.

Los refuerzos compuestos, específicamente el Clock Spring (cilindro compuesto de fibra reforzada), han experimentado vigorosas pruebas y evaluaciones. Pruebas llevadas a cabo al hacer reventar el tubo sobre reparaciones hechas con el Clock Spring han demostrado que las reparaciones hechas sobre defectos severos en la tubería, sobre el 80% de pérdida del espesor de la pared del tubo, resisten presiones de operación superiores a los rangos de presión máximos. En ASTM se ha desarrollado una matriz estadística para determinar la integridad "en servicio" La matriz estadística ratificó al Clock Spring como un método valioso de reparación de tubería industrial. El Instituto Americano del Petróleo ha aprobado el sistema Clock Spring para reparar y reforzar tuberías de transportación de gas y líquidos.*

Investigaciones continuas confirman a los refuerzos compuestos como una reparación permanente para la pérdida de metal por corrosión y daños mecánicos. El Clock Spring ofrece los siguientes beneficios al operador de líneas.

- Los envolventes compuestos como refuerzos evitan introducir riesgos asociados con la soldadura.
- Elimina costos e interrupciones de servicio, en comparación con los sistemas convencionales de reparación con soldadura, por los que se tiene que cerrar la tubería a priori.
- Se puede reestablecer la capacidad original de presión de la tubería y mejora la resistencia más allá del deterioro estructural.
- La reparación puede ser hecha sin reducir la presión de operación en la tubería.
- Puede ser instalado fácilmente sin la necesidad de soldadores altamente capacitados y/o equipo especial.
- El tiempo de instalación característico es de menos de 25 minutos después de una apropiada colocación.

Sin embargo una capacitación certificada es esencial para asegurar la apropiada instalación y funcionamiento. El diseño simple del envoltivo compuesto "Clock Spring" se muestra en la figura 4.

*Pipeline & Gas Journal 141st year, Marzo 2000, www.undergroundinfo.com

El sistema "Clock Spring" esta formado por:

1. Una estructura unidireccional compuesta, de alta resistencia. Patentada.
2. Un componente de transferencia de carga, con extremadamente alta resistencia a la compresión. Patentado.
3. Un sistema adhesivo formado por dos elementos que interactúan en un alto rendimiento, de curado rápido. Patentado.

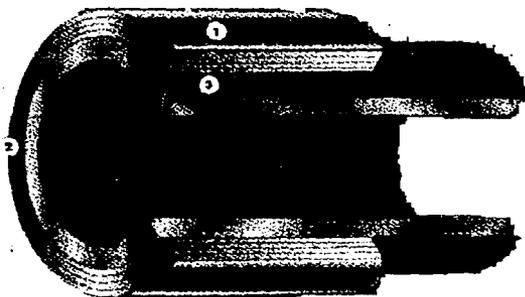


FIGURA 4. 4: ENVOLVENTE DE REFUERZO "CLOCK SPRING"

TESIS CCN
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO V

**CORROSIÓN Y PROTECCIÓN
CATÓDICA EN TUBERÍAS DE
CONDUCCIÓN ENTERRADAS**

5.1 ASPECTOS GENERALES DE LA CORROSION EN LOS OLEODUCTOS

La vida útil en la vida petrolera se acorta a menudo como un resultado de la corrosión y en los últimos 20 años se han tenido grandes adelantos en su detección y remedios aplicados para controlarla, en la producción del petróleo.

En términos técnicos simplificados, la corrosión ha sido definida como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica con el medio ambiente y representa la diferencia entre una operación libre de problemas, con gastos de operación muy elevados.

La corrosión es la tendencia de los metales a obtener un estado de equilibrio electroquímico, que ocurre a niveles de energía más bajos de los que poseen. Por ejemplo, el fierro se encuentra naturalmente en su estado de energía más bajo en forma de óxidos. El hombre por medio de procesos industriales lo convierte en fierro estructural, aceros, etc.; y éstos tienden a regresar a su estado de equilibrio a través de la oxidación (corrosión).

Para efectos prácticos es casi imposible eliminar la corrosión y el secreto efectivo de la ingeniería en este campo radica más en su control, que en su eliminación siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño de las instalaciones y no después de ponerlas en operación.

El ingeniero que trabaja en problemas de corrosión necesita saber donde empezar y tener un conocimiento básico para reconocer la corrosión, como se produce, cómo impedir su severidad, qué herramientas son necesarias, técnicas de inspección, variables de diseño que afectan a la corrosión, selección de materiales, y la forma de interpretar y aplicar la información del problema corrosivo, así como saber donde obtener ayuda.

5.2 FORMAS DE LA CORROSION

La corrosión ocurre en muchas y muy variadas formas pero su clasificación se basa generalmente en uno de los tres siguientes factores:

1.- Naturaleza de la sustancia corrosiva.- La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca. Para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.

2.- Mecanismo de corrosión.- Este comprende las reacciones electroquímicas o bien las reacciones químicas.

3.- Apariencia del metal corroído.- La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie o bien puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

La clasificación por apariencia, uniforme o localizada, es muy útil para una discusión preliminar que en caso de requerirse en forma más completa, necesita del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo microscópico y el ataque microscópico local.

En el ataque microscópico la cantidad del material disuelto es mínima y puede conducir a daños muy considerables antes de que el problema sea visible.

De lo indicado anteriormente, se ve la necesidad de reconocer en primer lugar, las diferentes formas en las que se presenta la corrosión para así tomar las medidas pertinentes que permitan establecer los métodos correctivos para atenuarla, los cuales son mejor comprendidos si se conoce la teoría de la corrosión.

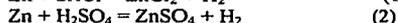
5.3 QUÍMICA Y ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN

La corrosión como una reacción química.- Para poder comprender el fenómeno corrosivo como resultado de una reacción química, es necesario disponer de algunos principios elementales de química, los cuales se enunciarán brevemente a continuación.

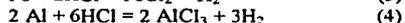
5.3.1. CORROSIÓN EN ÁCIDOS

Una de las formas de obtener Hidrógeno en el laboratorio, es colocar un pedazo de zinc metálico dentro de un vaso conteniendo un ácido diluido, tal como el clorhídrico o el sulfúrico.

Al depositarse el zinc en la solución ácida, el zinc se ataca rápidamente desprendiéndose el hidrógeno, tal como se indica en las reacciones 1 y 2.



Otros metales también son corroídos o disueltos por medio de ácidos liberando hidrógeno.



Las reacciones 3 y 4 muestran que el hierro y el aluminio también son corroídos por el ácido clorhídrico.

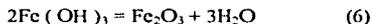
5.3.2 CORROSIÓN EN SOLUCIONES NEUTRAS Y ALCALINAS

La corrosión en los metales también puede presentarse en agua limpia, agua de mar, soluciones salinas y soluciones alcalinas o básicas. En la mayoría de éstos sistemas, la corrosión solamente ocurre cuando éstas contienen oxígeno disuelto. Las soluciones acuosas disuelven rápidamente el oxígeno del aire, siendo este la fuente de oxígeno requerida en los procesos corrosivos. La corrosión más familiar de este tipo, es la oxidación del hierro cuando se expone a una atmósfera, húmeda o bien en agua.

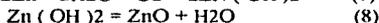
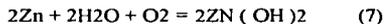


Esta reacción demuestra que el hierro se combina con el agua y el oxígeno para darnos la substancia insoluble de color café rojizo que es el hidróxido férrico.

Durante la oxidación en la atmósfera, existe la oportunidad de que el producto de la reacción se seque, por lo que el hidróxido férrico se deshidrata y forma el óxido café rojizo que es tan familiar.



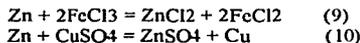
Reacciones similares se presentan cuando el zinc se expone al agua o en aire húmedo.



El óxido de zinc resultante es el depósito blanco que se observa en los equipos galvanizados.

5.3.3 CORROSIÓN EN OTROS SISTEMAS

Los metales también pueden ser atacados en soluciones que no contengan oxígeno o ácidos. Las soluciones típicas para este proceso son aquellas soluciones denominadas oxidantes que contienen sales férricas y compuestos cúpricos en los que la corrosión se presenta de acuerdo con las siguientes reacciones:



Es pertinente recordar que en la reacción (9) el cloruro férrico cambia a cloruro ferroso a medida que el zinc se corroe. En la reacción (10) el zinc, reacciona con el sulfato de cobre para formar la sal soluble de sulfato de zinc. Por esta razón, las reacciones similares a éstas reciben el nombre de reacciones de sustitución metálica.

5.3.4 PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN

El término producto de la corrosión se refiere a las sustancias obtenidas durante las reacciones de corrosión y estas pueden ser solubles como en el caso del cloruro de zinc y del sulfato de zinc o insolubles como en el caso del óxido de hierro e hidróxido de hierro.

La presencia de los productos de la corrosión es una de las formas por las cuales se detecta ésta, por ejemplo el óxido. Sin embargo es conveniente notar que los productos insolubles de la corrosión no siempre son visibles, por ejemplo al exponer una pieza de aluminio al aire, se forma una película de óxido casi invisible que protege al metal de un ataque posterior y la película es casi invisible porque es extraordinariamente delgada, siendo esta la razón del uso extensivo del aluminio en la construcción de ventanas, cancelas y molduras automotrices.

5.3.5 ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN

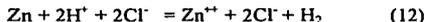
Reacciones electroquímicas.- Una reacción electroquímica se define como una reacción química en la cual existe una transferencia de electrones, es decir, es una reacción química que comprende el fenómeno de oxidación y reducción, siendo la reducción la reacción química contraria de la oxidación, en el curso de la cual un cuerpo pierde electrones, para formar un nuevo cuerpo fácilmente separable. Así por ejemplo si se trata de óxido de cobre CuO con hidrógeno H_2 , cada átomo de oxígeno abandona al cobre y se une con los de hidrógeno para formar una molécula de agua, cuya reacción se escribe:



Así la reducción de una sustancia produce generalmente la oxidación del reductor.

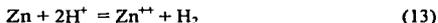
Como la corrosión metálica es casi siempre un proceso electroquímico, es importante conocer la naturaleza básica de las reacciones electroquímicas.

La definición anterior de reacción electroquímica puede ser mejor comprendida observando en detalle una reacción típica de corrosión, así por ejemplo la reacción del zinc con el ácido clorhídrico, queda mejor expresada recordando que el ácido clorhídrico y el cloruro de zinc están ionizados en soluciones acuosas, por lo que podemos escribir:



Cuando la reacción se escribe en esta forma es obvio que el ión-cloruro no participa en forma directa en la reacción, puesto que el ión-cloruro aparece en ambos miembros de la ecuación y no es alterado por la reacción de corrosión, es decir, la valencia del ión-cloruro permanece sin cambio.

De acuerdo a lo anterior la ecuación 12 se puede escribir en forma simplificada como:



Esta última ecuación indica que la corrosión del zinc en ácido clorhídrico consiste simplemente en la reacción entre el zinc y los iones hidrógeno que producen iones-zinc y gas hidrógeno.

Durante esta reacción el zinc es oxidado a iones de zinc es decir la valencia del zinc se incrementa y simultáneamente los iones de hidrógeno son reducidos a gas hidrógeno disminuyendo su valencia.

Por lo anterior la reacción (13) puede ser simplificada aun más al dividirla en una reacción de oxidación y en una reacción de reducción.



Oxidación (reacción anódica)



Reducción (reacción catódica)

Cuya suma nos da:



Una reacción de oxidación tal como la ecuación (14), significa un incremento en el estado de oxidación o valencia con producción de electrones y en forma similar, la reacción de reducción representa una disminución en el estado de oxidación o valencia y el consumo de electrones tal y como se ve en la ecuación (15).

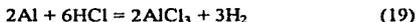
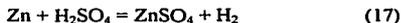
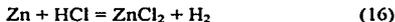
La suma de las reacciones (14) y (15) nos dan la reacción total (reacción No. 13).

En términos de corrosión, una reacción de oxidación recibe el nombre de reacción anódica, mientras que la reacción de reducción se le denomina reacción catódica.

Todo proceso de corrosión necesita por lo menos una reacción de oxidación (anódica) y una reacción de reducción (catódica), por lo que podemos resumir que las reacciones de la corrosión son electroquímicas en naturaleza y debido a esto es posible dividir el proceso de la corrosión, en reacciones anódicas y reacciones catódicas que permiten simplificar la presentación de la mayoría de los procesos.

5.4 REACCIONES ANÓDICAS

Durante el ataque corrosivo la reacción anódica siempre es la oxidación de un metal a un estado superior de valencia, por ejemplo las siguientes reacciones:



Todas ellas, representan la reducción de los iones de hidrógeno a gas hidrógeno en forma semejante a la reacción (15) y la única diferencia entre ellas es la naturaleza de sus procesos anódicos de oxidación. Lo anterior permite ver que la corrosión por ácidos es muy simple ya que en cada caso, la reacción catódica es simplemente el desprendimiento de gas hidrógeno de acuerdo a lo explicado en la reacción (15).

Este desprendimiento de hidrógeno ocurre con una gran variedad de metales y ácidos, tales como el clorhídrico, sulfúrico, fluorhídrico, acético, fórmico y otros ácidos orgánicos solubles en agua.

Separando las reacciones (1),(2),(3) y (4) en reacciones anódicas y catódicas, vemos que las ecuaciones (1) y (2) representan la oxidación del zinc a sus iones, , mientras que las (3) y (4) indican la oxidación del hierro y el aluminio a sus iones, tal como se indica en las siguientes reacciones anódicas:



De acuerdo con éstas reacciones, la reacción anódica se puede presentar en forma general como sigue:

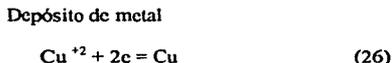
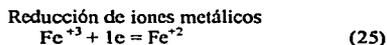
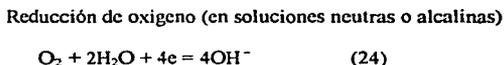
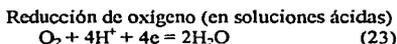
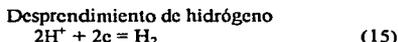


Es decir, la corrosión del metal M da por resultado su oxidación para formar iones con valencia +n y la liberación de n electrones.

El valor de n depende de la naturaleza del metal, así por ejemplo, la plata es monovalente mientras que otros metales como el hierro, titanio y uranio son polivalentes. La ecuación (22) es entonces general y se aplica a todas las reacciones de corrosión.

5.5 REACCIONES CATÓDICAS

Hay varias reacciones catódicas que se encuentran durante la corrosión de los metales, tales como las que se enlistan a continuación:



La reducción en iones de oxígeno ya fue considerada y no se discutirá más.

La reducción del oxígeno, ecuaciones (23) y (24), es una reacción catódica muy común ya que el oxígeno está presente en la atmósfera y las soluciones están expuestas a la misma.

La reducción en iones metálicos y el depósito de metales aunque es menos frecuente, causa problemas de corrosión muy severos.

Todas estas reacciones tienen en común que consumen electrones y todas las reacciones de corrosión son simplemente combinaciones de una o más de las reacciones catódicas indicadas, unidas con una reacción anódica similar a la ecuación (22).

Podemos establecer entonces que en la mayoría de los casos de corrosión metálica pueden ser reducidos a estas seis ecuaciones ya sea en forma aislada o en combinaciones, así por ejemplo, el zinc el zinc se corroe en agua o aire húmedo en la siguiente forma:



Los productos de esta reacción son iones zinc Zn^{+2} y iones OH^- , que inmediatamente reaccionan para formar el hidróxido de zinc $\text{Zn}(\text{OH})_2$, insoluble.

Durante la corrosión pueden ocurrir más de una reacción de oxidación y de reducción, así por ejemplo, durante el ataque de una aleación, los átomos de los componentes metálicos pasan a la solución en forma de iones, como sucede con la aleación de cromo fierro en donde tanto el cromo como el fierro son oxidados a iones.

5.6 POTENCIAL DE CORROSIÓN

El potencial de un metal que se corroe es muy útil en los estudios de corrosión y se puede obtener fácilmente en laboratorio y en condiciones de campo y se determina midiendo la diferencia de potencial existente entre el metal sumergido en un medio corrosivo y un electrodo de referencia apropiado.

Los electrodos de referencia más utilizados son el electrodo saturado de calomel (cloruro de mercurio $HgCl_2$), el electrodo de cobre - sulfato de cobre y el electrodo de platino - hidrógeno.

La medición de la diferencia de potencial entre el metal que se corroe y el electrodo de referencia se lleva a cabo con la ayuda de un potenciómetro. (Ver fig. 5.1).

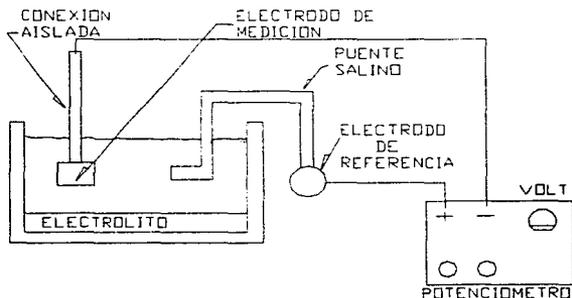


FIG. 5.1 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN

Al medir y reportar los potenciales de corrosión es necesario indicar la magnitud y el signo del voltaje obtenido.

La magnitud y el signo del potencial de corrosión es una función del metal, composición del electrolito y temperatura de agitación del mismo.

5.7 POTENCIALES DE OXIDO REDUCCIÓN

El potencial de óxido reducción se refiere al potencial relativo de una reacción electroquímica en condiciones de equilibrio por lo que las reacciones deben proceder a la misma velocidad en ambas direcciones.

Estos potenciales también son conocidos con el nombre de potenciales Redox, potencial de media celda y serie de fuerzas electromotrices.

5.8 CRITERIO PARA CORROSIÓN

Los potenciales de oxido reducción son muy útiles ya que pueden ser utilizados para predecir si un metal es o no corroído en un medio ambiente dado. Esto se puede establecer por medio de la siguiente regla generalizada: " En cualquier reacción electroquímica la media celda más negativa más tiende a oxidarse, mientras que la media celda más positiva tiende a reducirse".

Aplicando esta regla al caso del zinc que se corroe en soluciones ácidas podemos ver que media celda de zinc metálico – iones zinc, es más negativa que la media celda iones – hidrógeno gaseoso, por lo que aplicando la regla anterior se ve que el zinc deberá ser corroído en soluciones ácidas.

Se puede ver que todos los metales que tienen potenciales Redox más negativos que la media celda iones hidrógeno – gas hidrógeno, serán corroídos por soluciones ácidas lo cual incluye a metales como el plomo, estaño, níquel, fierro y aluminio junto con los otros metales con potenciales negativos.

Por otra parte, el cobre, el mercurio, plata, paladio, y los otros metales con potenciales más positivos que la media celda iones hidrógeno – gas hidrógeno, no serán corroídos por soluciones ácidas, es decir el cobre por ejemplo, podría ser un buen material para guardar ácidos, sin embargo, el cobre se corroe si el ácido contiene oxígeno ya que el potencial Redox del cobre es menos positivo que el potencial de las dos medias pilas de oxígeno, tal y como se muestra en la tabla de potenciales Redox a 25°C (Tabla No.5.1).

	<i>Metal</i>	<i>Potencial electródico (V)</i>
CATÓDICOS	$Au = Au^{+3} + 3e$	1.42
	$Pt = Pt^{+4} + 4e$	1.20
	$O_2 + 4H^+ + 4e = 2H_2O$	1.23
	$Pd = Pd^{+2} + 2e$	0.83
	$Ag = Ag^+ + e$	0.799
	$2Hg = Hg_2^{+2} + 2e$	0.798
	$Fe^{+3} + e = Fe^{+2}$	0.771
	$O_2 + 2H_2O + 4e = 4(OH)^-$	0.401
	$Cu = Cu^{+2} + 2e$	0.34
	$Sn^{+4} + 2e = Sn^{+2}$	0.154
	$2H^+ + 2e = H_2$	0.000 REFERENCIA
ANÓDICOS	$Pb = Pb^{+2} + 2e$	-0.126
	$Sn = Sn^{+2} + 2e$	-0.140
	$Ni = Ni^{+2} + 2e$	-0.23
	$Co = Co^{+2} + 2e$	-0.27
	$Cd = Cd^{+2} + 2e$	-0.402
	$Fe = Fe^{+2} + 2e$	-0.44
	$Cr = Cr^{+3} + 3e$	-0.71
	$Zn = Zn^{+2} + 2e$	-0.763
	$Al = Al^{+3} + 3e$	-1.66
	$Mg = Mg^{+2} + 2e$	-2.38
	$Na = Na^+ + e$	-2.71
$K = K^+ + e$	-2.92	

Tabla 5.1 Serie de fuerzas electromotrices para algunos elementos.

La serie de fuerzas electromotrices mostrada en la tabla 1, compara el potencial electródico E_0 para cada metal con el del electrodo hidrógeno en condiciones patrón de 25 °C .

5.9 LA CELDA ELECTROQUÍMICA

Una celda electroquímica se forma cuando dos piezas de metal se ponen en contacto a través de un líquido conductor, o *electrólito*. El circuito eléctrico completo que se produce permite tanto la *electrodeposición* como la *corrosión electroquímica*.

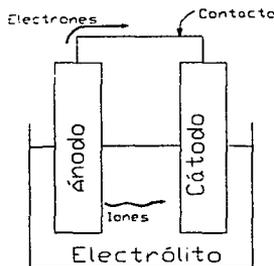


Fig. 5.2 componentes de una celda electroquímica.

Componentes de una celda electroquímica. Hay cuatro componentes en una celda electroquímica. (Ver fig. 5.2)

- 1.- **Ánodo:** El ánodo cede electrones al circuito y se corroe.
- 2.- **Cátodo:** El cátodo recibe electrones del circuito a través de una reacción química. Los iones que se combinan con los electrones producen un subproducto en el cátodo.
- 3.- **Contacto físico:** El ánodo y el cátodo deben estar conectados eléctricamente, por contacto físico, para que los electrones fluyan del ánodo al cátodo.
- 4.- **Electrólito (o electrolito):** Es un líquido que debe estar en contacto tanto con el ánodo como con el cátodo. El electrolito es conductor, por lo que completa el circuito. Dicho líquido proporciona el medio a través del cual los iones metálicos abandonan la superficie del ánodo, y asegura que los iones se desplacen hacia el cátodo que acepta los electrones.

En resumen:

Esta descripción de una celda electroquímica define tanto la corrosión electroquímica como la electrodeposición .

La corrosión electroquímica se tiene lugar en el ánodo que es un metal que experimenta una reacción por oxidación mediante la cual se ionizan los átomos metálicos. Estos ingresan a la solución electrolítica mientras que los electrones abandonan el ánodo a través de la conexión eléctrica según la ecuación (22), debido a que los átomos metálicos salen del ánodo cuando éste se corroe.

En la electrodeposición se da una reacción catódica. En este proceso ocurre en el cátodo una reacción por reducción, la cual es el inverso de la reacción en el ánodo.



Los iones metálicos, tanto los añadidos intencionalmente al electrolito como los formados en la reacción del ánodo, se combinan con los electrones del cátodo. De este modo el metal recubre la superficie del cátodo.

El principio de celda electroquímica descrito, es la base para que el ingeniero de líneas de tuberías conductoras, lleve a la práctica un método de prevención de la corrosión una vez que la tubería se encuentra ya enterrada.

Lo anterior es para evitar gastos directos e indirectos de aspecto económico y humano en un futuro.

Dentro de los aspectos económicos tenemos:

- a) Reposición del equipo corroído.
- b) Coeficiente de seguridad, y sobre diseño para soportar la corrosión.
- c) Mantenimiento preventivo, como la aplicación de recubrimientos.
- d) Paros de producción debido a fallas por corrosión.
- e) Contaminación de productos.
- f) Pérdida de productos valiosos.
- g) Daño de equipo adyacente a aquel en el cual se tuvo la falla de corrosión.

Dentro de los aspectos sociales y humanos tenemos:

- a) La seguridad, ya que fallas violentas pueden producir incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos.
- b) Condiciones insalubres por ejemplo, contaminaciones debido a productos del equipo corroído o bien un producto de la corrosión misma.
- c) Agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales como en combustibles usados para su manufactura.
- d) Apariencia, ya que los materiales corroídos generalmente son desagradables a la vista.

5.10 PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN POR MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS

Nuestro estudio se enfocará básicamente al método de la protección catódica, ya que es el que se ha utilizado en la construcción de la tubería de transporte terrestre con la mayor eficiencia.

De cualquier modo aquí mencionaré algunos de los métodos mediante los cuales también se auxilia el constructor de líneas de conducción:

Recubrimientos. Los recubrimientos se utilizan para aislar las regiones del cátodo y el ánodo. En las tuberías se utilizan principalmente recubrimientos orgánicos, como la pintura, o los recubrimientos cerámicos como el esmalte o el vidrio proporcionan buena protección, sin embargo, si se interrumpe el recubrimiento, se expone un pequeño lugar anódico que experimenta una corrosión rápida y localizada.

Inhibidores. Algunos agentes químicos, añadidos a la solución de electrolito, emigran preferentemente hacia la superficie del ánodo o del cátodo y producen una polarización por concentración o por resistencia. Sin embargo en el caso de las tuberías de conducción que representan grandes áreas catódicas y pequeñas áreas anódicas localizadas, éstas pueden quedar desprotegidas y se acelera la corrosión.

5.10.1 PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica se puede definir como una técnica que detiene o reduce la corrosión de un metal en contacto con un electrolito, haciendo al metal un cátodo mediante el paso de una corriente de electrones provenientes de un ánodo, o de un rectificador de corriente alterna.

5.10.2 TEORÍA

La protección catódica tiene su base en el hecho de que la corrosión en los metales en presencia de un electrolito, es de naturaleza electroquímica, esto es, las estructuras metálicas enterradas se corroen por la

formación de pilas locales sobre la superficie. Estas pilas están constituidas por áreas anódicas, donde tiene lugar la disolución del metal y áreas catódicas, donde ocurre la reducción de algún constituyente del electrolito. Las dos reacciones se efectúan en la interfase metal-solución, con la consiguiente transferencia de electrones a través del metal y de iones a través de la solución.

Por lo anterior, es fácil comprender que si toda la superficie de una estructura metálica se hace un cátodo, la estructura no se corroería mientras se mantenga esa condición.

En las figuras 5.3A y 5.3B se ilustra lo descrito:

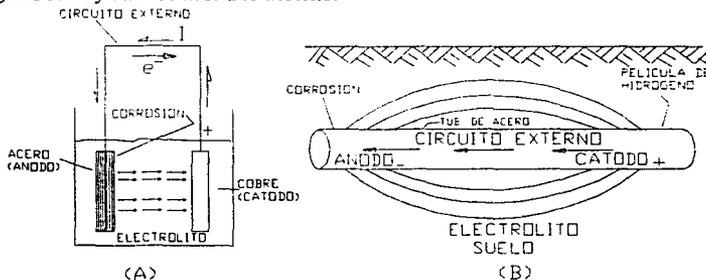


FIG. 5.3 CORROSION ELECTROQUIMICA

La explicación teórica del mecanismo de protección catódica fue dada por Mears y Brown* desde 1938. Estos investigadores basaron su razonamiento en los conceptos de sobre las naturaleza electroquímica de la corrosión y establecieron que: " para obtener protección catódica completa de una estructura metálica, su potencial debe ser igual o menor que el potencial en circuito abierto del punto más anódico "

5.10.3 APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN ENTERRADA

La protección catódica en tuberías de conducción enterradas, es la técnica que reduce o detiene la corrosión, basándose en el principio de celda electroquímica. En la práctica se trata de evitar la corrosión de un metal en contacto con un electrolito (terreno natural) convirtiendo al metal, en nuestro caso la tubería, en un cátodo, mediante el paso de corriente que proviene de un ánodo.

Anodo. Elemento emisor de corriente eléctrica, puede ser de sacrificio o inerte.

Anodo de sacrificio. Es aquel que se consume al emitir corriente de protección. Los más comerciales son:

- Anodo de Mg (Para líneas Terrestres)
- Anodo de Al (Para zonas marinas o marismas**)
- Anodo de Zn (Para zonas marinas)

Anodo inerte. Es aquel que no produce corriente eléctrica y su consumo no es directamente proporcional a la corriente de protección. Los más comerciales son:

- El Anodo de grafito (para líneas terrestres)
- Anodo de Fe.Si.Cr (Líneas terrestres, zonas altamente corrosivas)

* Corrosión y Protección Catódica; Instituto Mexicano del Petróleo, subdirección de tecnología de Explotación, División de Corrosión, Publicación No. 81BG/291-A

**Terreno bajo que inundan las aguas del mar.

Para poder realizar la protección catódica se requiere un flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo (tubería) a través de un medio electrolítico (terreno natural), la cual se llevará a cabo mediante la aplicación de una corriente de protección que se obtiene en nuestro caso, generalmente, de la que proporciona un rectificador que convierte la corriente alterna en corriente directa y que se aplica a la tubería de acuerdo al diseño particular.

5.10.4 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Los sistemas de protección catódica que se emplean en tuberías de conducción enterradas son:

- 1.- Mediante ánodos de sacrificio, el cual esta basado en el consumo del ánodo protector (ánodo galvánico).
- 2.- Mediante corriente impresa, el cuál se obtiene de la emisión de la corriente directa procedente de un rectificador.
- 3.- Inhibidores.

Para la selección de un tipo de sistema sobre otro se deberá tomar en consideración: el medio electrolítico o la resistividad del terreno que es la resistencia eléctrica específica del terreno. Se puede determinar sobre una muestra del terreno que tenga la misma unidad de longitud y de sección transversal; para ello se emplean métodos como los Multicombinados y el Vibroground y su valor se obtiene en Ohm - cm.

Los medidores multicombinados son especialmente útiles para los técnicos que trabajan en protección catódica de tuberías. Esto se debe a que los circuitos están arreglados de tal forma, que cualquiera de las combinaciones de dos instrumentos básicos puede hacerse con tan solo manipular las perillas selectoras. El resultado es un gran ahorro de tiempo en las mediciones y la facilidad de poder cambiar de un tipo de medición a otro.

Un multicombinado consta de dos instrumentos básicos, a saber: uno con bobina de alta resistencia, útil para medir potenciales de estructuras a electrodos de referencia y otro con una bobina de una resistencia relativamente baja, bueno para medir pequeñas caídas de potencial.

Ejemplos de mediciones que pueden hacerse en un multicombinado y los instrumentos o la combinación de ellos que se utilizan son los siguientes:

- Resistividad del suelo.- se usa el voltmetro, el amperímetro, y la batería interna .
- Potencial de una estructura respecto a un electrodo de referencia, en suelos de cualquier resistividad y en suelos donde hay corrientes parásitas. Se usa el voltmetro de alta resistencia.
- Potencial de una estructura respecto a un electrodo de referencia en suelos de alta resistividad. Se utiliza el instrumento de baja resistencia como medidor y el de alta resistencia como galvanómetro (medición potenciométrica).

El Vibroground, es un instrumento de medición directa para la resistividad, en la tabla 2 se muestran algunos valores para diversos terrenos. El principio de funcionamiento de este, se explica en el apéndice 1 referente a instrumentos para medir resistencia y resistividad.

0	-	1000	Ohms - cm.	Altamente corrosivos
1000	-	5000	Ohms - cm.	Moderadamente corrosivos
5000	-	10000	Ohms - cm.	Poco corrosivos
10000	-	en adelante	Ohms - cm.	Muy poco corrosivos

TABLA 2. VALORES DE RESISTIVIDAD DE DIVERSOS TERRENOS

Para desarrollar el proyecto de un sistema de protección Catódica, se deben efectuar las siguientes actividades de campo y oficina:

- a). Identificación de la estructura metálica por proteger.
- b). Localización y planos completos del trazo, para saber la trayectoria de la tubería.
- c). Determinación del medio electrolítico.
- d). Determinación de la calidad del recubrimiento.
- e). Determinación de la cantidad de corriente necesaria para obtener las condiciones de protección que se pretenden.
- f). Selección del sistema adecuado para la protección.

5.10.5 PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO

En el sistema de sacrificio conectaremos a la estructura, un material de una electronegatividad más baja o más negativa que la del metal a protegerse para transferir el proceso de oxidación a este material. El potencial entre el material anódico y la estructura debe ser de magnitud suficiente para sobreponerse al potencial de las celdas galvánicas y contrarrestar el flujo de corriente creado por éstas en la estructura.

En el caso de la protección catódica de acero, los materiales anódicos de sacrificio de mayor uso son aluminio, zinc y magnesio. Cada uno de estos metales tiene ventajas sobre los otros dependiendo de factores económicos y de las condiciones del medio en que se utiliza.

Un buen ánodo de sacrificio, debe ser un metal con un potencial más electronegativo que el potencial de la estructura que se pretende proteger. Por tal motivo, si un ánodo galvánico se conecta eléctricamente a una estructura enterrada o sumergida, descargará una corriente que fluirá a través del electrolito hasta la estructura en cuestión.

Un buen ánodo de sacrificio deberá tener las siguientes características:

- a) Potencial suficientemente electronegativo, para asegurar un flujo de corriente adecuado.
- b) Corriente de salida elevada, por unidad de peso de material consumido.
- c) Buen comportamiento de polarización anódica a través del tiempo.
- d) Bajo costo.

5.10.6 TIPOS DE ÁNODOS

Los ánodos galvánicos que con mayor frecuencia se utilizan en protección catódica son: de magnesio, de zinc y de aluminio. Sus propiedades electroquímicas se indican a continuación en la tabla 5.3

Material Anódico	Pot. En circuito abierto (Cu/CuSO ₄) en volts.	Drenaje de corriente Teórico en $\frac{\text{Amp} \cdot \text{hr}}{\text{lb}}$	Drenaje de corriente Práctico en $\frac{\text{Amp} \cdot \text{hr}}{\text{lb}}$	Eficiencia en %
Magnesio	- 1.75	1 000	500	50
Zinc	- 1.10	375	35	90
Aluminio	- 1.10	1 350	1 280	95

TABLA 5.3 TIPOS DE ANODOS Y SUS PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS.

Los ánodos de magnesio ha encontrado mucha aplicación en la protección de estructuras enteradas, por su parte los ánodos de zinc y aluminio se utilizan preferentemente para dar protección a estructuras sumergidas en medios acuosos.

Cómo es de esperarse, la protección catódica a base de ánodos de sacrificio, tiene ventajas y desventajas, respecto al también típico sistema de protección con corriente impresa. Las principales son:

VENTAJAS:

- Bajo costo de instalación.
- Protección ideal de puntos de bajo potencial.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Menos daños al recubrimiento
- Menos problemas de corrientes parásitas.

DESVENTAJAS:

- Grandes cantidades de material anódico.
- Reposición periódica.
- No adaptables a control automático.
- Limitados a aplicación de baja corriente.

5.10.7 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO

El uso de ánodos galvánicos de protección catódica es una simple aplicación de la celda de corrosión por metales diferentes.

Sabemos que si una estructura de acero es conectada eléctricamente a un metal más electronegativo y ambos están en contacto con un electrolito común, el metal más activo se corroerá y descargará corriente durante el proceso. Si la cantidad de corriente para dar protección es conocida, se puede diseñar una cama de ánodos utilizando la cantidad suficiente de material anódico para proporcionar la corriente de salida deseada durante un período de determinado de tiempo.

En la figura 5.4 se muestra el circuito, de protección catódica con ánodos de sacrificio.

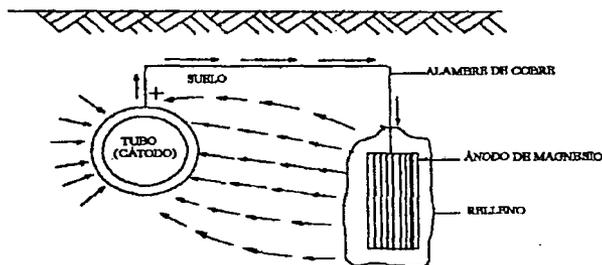


Fig. 5.4 PROTECCION CATODICA CON ANODOS DE SACRIFICIO

El diseño de un sistema de protección catódica se deberá procurar que sea simple, eficiente y económico. Hay dos puntos fundamentales que determinar:

- 1) Número total de puntos de drenaje de corriente.
- 2) Intensidad de corriente por aplicar en cada punto de drenaje.

Para obtener un diseño simplificado se deberán reducir al mínimo los puntos de drenaje de corriente de protección, es decir espaciar dichos puntos entre sí lo máximo posible. Naturalmente esto estará en función del tipo de estructura de que se trate y de la calidad del recubrimiento.

Una vez determinado el espaciamiento máximo entre puntos de drenaje, se determinará la corriente mínima aplicable en cada punto.

En la práctica, para estimar la corriente de protección se recurre por lo general a la información que se obtiene de las pruebas de requerimiento de corriente o bien mediante la aplicación de relaciones sencillas que involucran el área de la estructura, la densidad de corriente necesaria para obtener potenciales de protección y el área desnuda.

Conocida la intensidad de corriente de protección, el problema se reduce a determinar el número de ánodos para cada punto de drenaje, lo cual se obtiene dividiendo la corriente requerida entre la corriente por ánodo. Cuando se trata de estructuras enterradas, la corriente por ánodo si se trata de ánodo de magnesio, se determina mediante la gráfica de resistividad del suelo, v.s. corriente por ánodo (Ver figura 5-5). En estos casos también se aconseja que el peso de los ánodos de magnesio, esté en función de la resistividad del suelo, si se desea que duren un periodo de tiempo determinado. Esto se indica a continuación:

Rango de resistividad del Suelo en Ohms - cm.	Peso del ánodo en libras que se aconseja Para una duración de 10 años.
0 - 800	50
800 - 1 800	32
1 800 - 3 000	17
3 000	9

5.11 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD

Es la determinación que se hace para conocer la conductividad eléctrica del terreno o fluido en contacto con la tubería. Este dato es de suma importancia, ya que de su valor depende la exactitud del diseño.

En tuberías pobremente recubiertas es conveniente elaborar un perfil de resistividades haciendo mediciones cada 100 mts.; esta distancia podrá ser mayor o menor cuando el caso lo amerite. Los electrodos deberán colocarse aproximadamente a 2.50 mts. de la estructura y paralelos a ésta.

Se considera que los medios corrosivos de 0 a 1,000 Ohm-cm son altamente corrosivos; de 1,000 a 5,000 moderadamente corrosivos; de 5,000 a 10,000 poco corrosivos y mayores de 10,000 con pocas posibilidades de corrosión.

En tuberías bien recubiertas, se miden resistividades solamente en aquellos lugares que se consideran de baja resistividad, tales como: arroyos, ríos, lagunas, zonas agrícolas, inundables, salinas, etc.

Una medición directa de la resistividad en el terreno, se efectúa utilizando un aparato conocido, Vibroground (su funcionamiento se explica en el apéndice I). Es el método más rápido, sencillo y de una precisión aceptable y permite conocer la resistividad del medio a la profundidad que se desee, ya que ésta es igual a la separación entre electrodos. (Ver fig. 5.5)

En este método, los electrodos que están situados en los extremos se conectan a los bornes de corriente (C) del aparato; y los electrodos medios, a los bornes de potencial (P), teniendo especial cuidado que la distancia entre electrodos sea rigurosamente igual y exacta.

Se procederá a cerrar el circuito con el interruptor de contacto de que está provisto el aparato, observándose una deflexión en la aguja del galvanómetro*. Con el réostato variable y graduado se llevará la aguja hasta su punto de equilibrio, en el cual se tendrá un valor que será multiplicado por el rango de sensibilidad usado; este factor producto se multiplicará por el factor de espaciamiento entre electrodos, obteniéndose el valor de la resistividad en Ohm-cm.

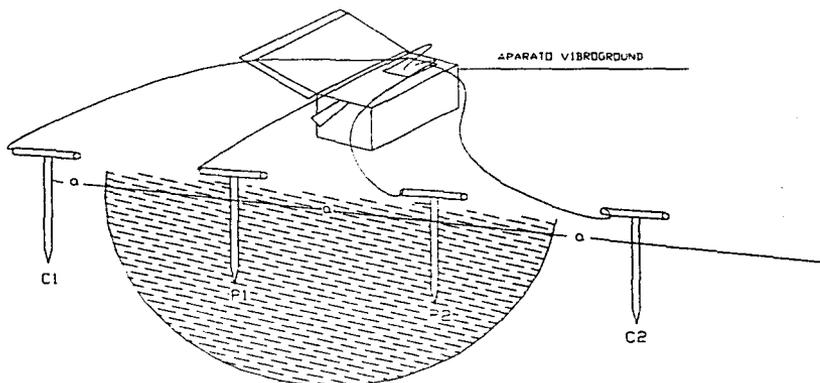


Fig. 5.5 DIAGRAMA DEL METODO WENNER DE CUATRO ELECTRODOS.

5.12 MEDICIONES DE POTENCIAL

La medición de potenciales es uno de los trabajos más importantes de la protección catódica, ya que sirve para obtener la tensión de la corriente producida en todo un fenómeno de corrosión electroquímica.

La investigación de potenciales estructura-electrolito aportará datos cuyos objetivos serán:

- Pruebas de protección catódica.
- Formación del criterio de potencial de protección.

Es universalmente aceptado que una estructura de acero con protección catódica está totalmente protegida si su potencial es mayor de 0.85 Volts, referido a un electrodo estándar de $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$, colocado en el electrolito inmediatamente adyacente a la superficie del metal.

El electrodo de $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$ que se usa en estructuras enterradas y sumergidas, está construido como se describe en la figura 5.6; se seleccionan estos materiales para su fabricación por ser estables y de fácil adquisición.

*Galvanómetro.- Instrumento para medir corriente eléctricas de escasa intensidad por medio de acciones electromagnéticas.

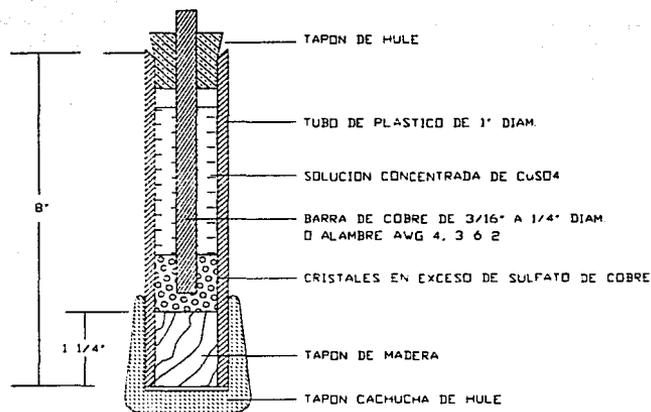


Fig. 5.6 MEDIA CELDA DE COBRE - SULFATO DE COBRE

El conocimiento de los valores de potenciales de superficie, sirve para determinar la diferencia de potencial de entre dos medias celdas colocadas en el electrolito, determinando así el sentido de la corriente y la magnitud de la diferencia medida.

La investigación de potenciales estructura-electrolito se hace utilizando un voltmetro de alta resistencia interna, conectando su polo negativo a la estructura (la tubería) y el positivo a la media celda, estas medidas se harán potenciométricas preferentemente.

La colocación de la media celda en estructuras enterradas deberá ser en la superficie del terreno que está sobre la estructura.

Para asegurar el contacto eléctrico entre el electrodo y el terreno, es necesario humedecer éste previamente.

5.13 PRUEBAS DE REQUERIMIENTO DE CORRIENTE

Las pruebas de requerimiento de corriente son las aplicaciones de corriente directa que se hacen en la estructura por proteger, con el objeto de obtener datos suficientes para estimar aproximadamente el % de área desnuda y poder diseñar el sistema de protección en forma racional. También se usa para determinar las atenuaciones de potencial que sirven como base para fijar el espaciamiento entre puntos de drenaje (Dato para la fig. 5.8).

El número de pruebas de requerimiento de corriente lo determinará el estado del recubrimiento de la estructura.

PROCEDIMIENTO.- Para iniciar las pruebas de requerimiento de corriente se pueden emplear diferentes fuentes de energía, tales como: máquinas de soldar, acumuladores, generadores de corriente directa, rectificadores portátiles, etc.; la capacidad de las fuentes de energía variará de acuerdo con el estado del recubrimiento de la estructura.

Las conexiones se hacen de la siguiente manera: El polo negativo se conecta a la estructura intercalando un derivador que servirá para detectar el instrumento de medición de potenciales y corrientes. El polo positivo se conecta a un dispositivo provisional a tierra, generalmente tuberías de desecho o chatarra; enterrándolas a una distancia mínima de 25 metros de la estructura.

TRABAJOS PREVIOS.- Antes de la aplicación de corriente se obtienen los potenciales naturales; que son aquellos que tiene cualquier estructura al estar en contacto con un electrolito. También se determinará la resistividad en el punto de drenaje, entendiéndose como punto de drenaje el punto en el que se instala el dispositivo provisional de tierra.

La aplicación de corriente se hará procurando no exceder el potencial estructura-electrolito de 2.5 Volts en el punto de drenaje, para no dañar el recubrimiento de la estructura.

Generalmente, se nota que el valor del potencial estructura-electrolito (p/s) tiende a subir a un valor máximo constante, sucediendo lo contrario con la corriente y la tensión aplicados.

Este fenómeno se debe a la polarización de la estructura y el tiempo en que esto se logra es muy variable, dependiendo de del estado del recubrimiento y de la resistividad del electrolito.

Durante la prueba se medirán y anotarán los potenciales estructura-electrolito, tomando la hora a la que fueron efectuadas a lo largo de la estructura, suspendiéndose estas en el punto en el cual se obtenga un valor de 0.80 volts.

Para el cálculo de porcentaje de área desnuda es necesario tomar dos secciones de la estructura a cada lado del punto de drenaje como derivadores, localizándolos en los puntos donde se obtengan potenciales de 0.80 y 1.0 Volts; la corriente que fluye en ambas secciones se calculará determinando potenciométricamente las caídas de voltaje en los extremos de dichas secciones.

Calculando la resistencia eléctrica de la estructura se puede calcular la corriente que fluye aplicando la ley de Ohm. La longitud de las secciones usadas como derivadores, dependerá del diámetro y el espesor de la pared, y por lo tanto de su resistencia por unidad, de tal modo que permita obtener estructuras de caídas de potencial lo suficientemente grandes para que el calculo de las corrientes pueda ser preciso. La resistencia eléctrica de la estructura se puede determinar con aproximación conociendo el diámetro, espesor y material.

Si se tiene un tramo de longitud conocida "A" limitada por las secciones 1 y 2 citadas, en las pruebas de requerimiento de corriente y se conoce la intensidad de las corrientes que fluyen en dichas secciones, cuya diferencia es la corriente de protección consumida en el tramo de longitud "A", el porcentaje de área desnuda "A" será:

$$A = \frac{10^5 (I_2 - I_1)}{DA \times \rho}$$

I_1 e I_2 - Son las corrientes en amperes en las secciones 1 y 2 respectivamente.

DA = Área externa en piés cuadrados del tramo de longitud "A".

ρ = Densidad de corriente estimada, la cual puede variar de 1 a 2 miliamperes por pie cuadrado.

Esta determinación de porcentaje de área desnuda se debe hacer en todos los puntos en que se aplique corriente de prueba, con el fin de obtener datos suficientes para juzgar la calidad del recubrimiento, disminuyendo las posibilidades de error.

En algunos otros casos suele calcularse la vida de un ánodo por la fórmula siguiente:

Fórmula de Tafankjian

$$V = \frac{A \times P \times E \times FU}{I_D}$$

Donde:

V= vida útil del ánodo en años.

A= Factor del material en $\frac{mAmp \cdot año}{Lb}$

P= Peso del ánodo a utilizar en libras - (W_T)

E= Eficiencia de corriente.

FU= Factor de utilización = 75%.

I_D = Corriente de diseño en $mAmpers$

Los factores del material son:

Para el magnesio $0.114 \frac{Amp \cdot Año}{lb} = 114 \frac{mAmp \cdot año}{lb}$

Para el zinc $0.0424 \quad " \quad = \quad 42.4 \quad "$

Para el aluminio $0.154 \quad " \quad = \quad 154 \quad "$

$$I_D = 1.15 I_p \quad \text{donde : } I_p = \text{corriente de protección (dato de la prueba de requerimiento de corriente)} \text{---(1)}$$

Para el magnesio:

$$V = L_m = \frac{114 \times 0.50 \times 0.75 \times W_T}{I_D}$$

$$L_m = \frac{42.75 \cdot W_T}{I_D} \quad \text{Es la vida útil del Magnesio en años.} \text{---(2)}$$

$$I_m = \frac{150\,000}{\rho \cdot Y} \quad \text{donde } I_m = \text{corriente (teórica) que drena un ánodo de Mg (mAmp).} \text{---(3)}$$

La corriente efectiva drenada por cada ánodo = $I_m \times$ factor de corrección por efecto pantalla. ----- (4)

De la misma manera para el ánodo del zinc.

$$L_z = \frac{28.68 \cdot W_T}{I_D}$$

L_z = vida útil del zinc en años.

W_T = Peso total del zinc a usar en lbs.

I_D = Corriente de diseño del sistema en mAmps

$I_D = 1.15 I_P$ I_P = Corriente de protección, dato de la prueba de requerimiento de corriente en mAmps

I_Z = Drenaje de corriente de un ánodo de zinc en mAmps.

"f" y "Y" Factores en las tablas 5.4 y 5.5

ρ = resistividad en ohms - cm.

Tabla 5.4. Valores de los factores de corrección "f" y "Y"

W (lb)	"f"	pot	"Y" Magnesio	"Y" Zinc
9	0.81	- 0.70	1.14	1.60
17	1.00	- 0.80	1.07	1.20
32	1.16	- 0.85	1.00	1.00
50	1.22	- 0.90	0.93	0.80
		- 1.00	0.79	0.40
		- 1.10	0.64	---
		- 1.20	0.50	---

Tabla 5.5 - Factores de corrección por efecto pantalla.

No. De ánodos En paralelo	Espaciamiento entre ánodos (pies)			
	5'	10'	15'	20'
2	1.893	1.920	1.946	1.964
3	2.455	2.705	2.795	2.848
4	3.036	3.455	3.625	3.714
5	3.589	4.188	4.429	4.563
6	4.125	4.902	5.223	5.411
7	4.652	5.598	6.000	6.232
8	5.152	6.277	6.768	7.036
9	5.670	6.964	7.536	7.875
10	6.161	7.643	8.304	8.679

Los pesos de los ánodos comerciales son:

9, 17, 32, 50, 100 y 250 libras.

Las eficiencias de corriente se han indicado en la tabla de propiedades electroquímicas de los ánodos galvánicos.

El Factor de utilización (FU) se considera un 75% de todo el ánodo, es decir, se considera que 25% no se utiliza.

La intensidad de corriente de protección (I), se determina en la forma descrita. Para este cálculo, también se puede utilizar el nomograma adjunto. (Ver fig. 5.9)

La figura 5.7 muestra el efecto de la Resistividad del suelo en la corriente drenada por un ánodo de magnesio de peso.

La nomograma de la figura 5.8 se refiere a la reducción en la corriente de salida por ánodo, cuando se conectan juntos varios ánodos de a 5, 10 y 20 pies de espaciamiento.

5.14 RELLENO

El relleno que se utiliza en las excavaciones donde se colocan los ánodos, se fundamenta en lo siguiente:

- a) Se reduce el efecto de polarización .
- b) Se distribuye el ataque o corrosión a lo largo de todo el ánodo.
- c) Se reduce la resistencia de contacto entre ánodo y suelo.

Los rellenos típicos para ánodos galvánicos están constituidos como sigue:

	CaSO ₄ (Hidratado) %	Bentonita %	Na ₂ SO ₄ %	Resistividad aproximada ohms-cm
A)	25	75	-	250
B)	50	50	-	250
C)	75	20	5	50

El relleno C) que tiene baja resistividad, es útil en suelos de alta resistividad.

El yeso, para crear un medio adecuado, para que el consumo del ánodo sea uniforme.

Bentonita, para proveer de humedad a la mezcla, aprovechando sus propiedades higroscópicas, es decir aquellas donde se condensa fácilmente el vapor de agua atmosférico.

Sulfato de Sodio Anhidrido, para aumentar la conductividad del electrolito, valiéndose de sus propiedades ionizantes.

5.15 PROTECCION CATODICA CON RECTIFICADORES DE CORRIENTE ALTERNA

Al considerar la protección catódica con ánodos de sacrificio, se vió claramente que el tipo de corriente formada espontáneamente en la pila ánodo galvánico-electrolito o medio agresivo y cátodo o equipo por proteger, es del tipo denominado corriente directa, es decir, que siempre fluye en un solo sentido.

La pila formada espontáneamente, puede ser sustituida con ventaja en algunos casos, utilizando la técnica que se conoce con el nombre de protección catódica por corriente impresa, que consiste en energizar los ánodos por medio de una fuente externa de corriente directa. En este tipo de protección catódica, los ánodos

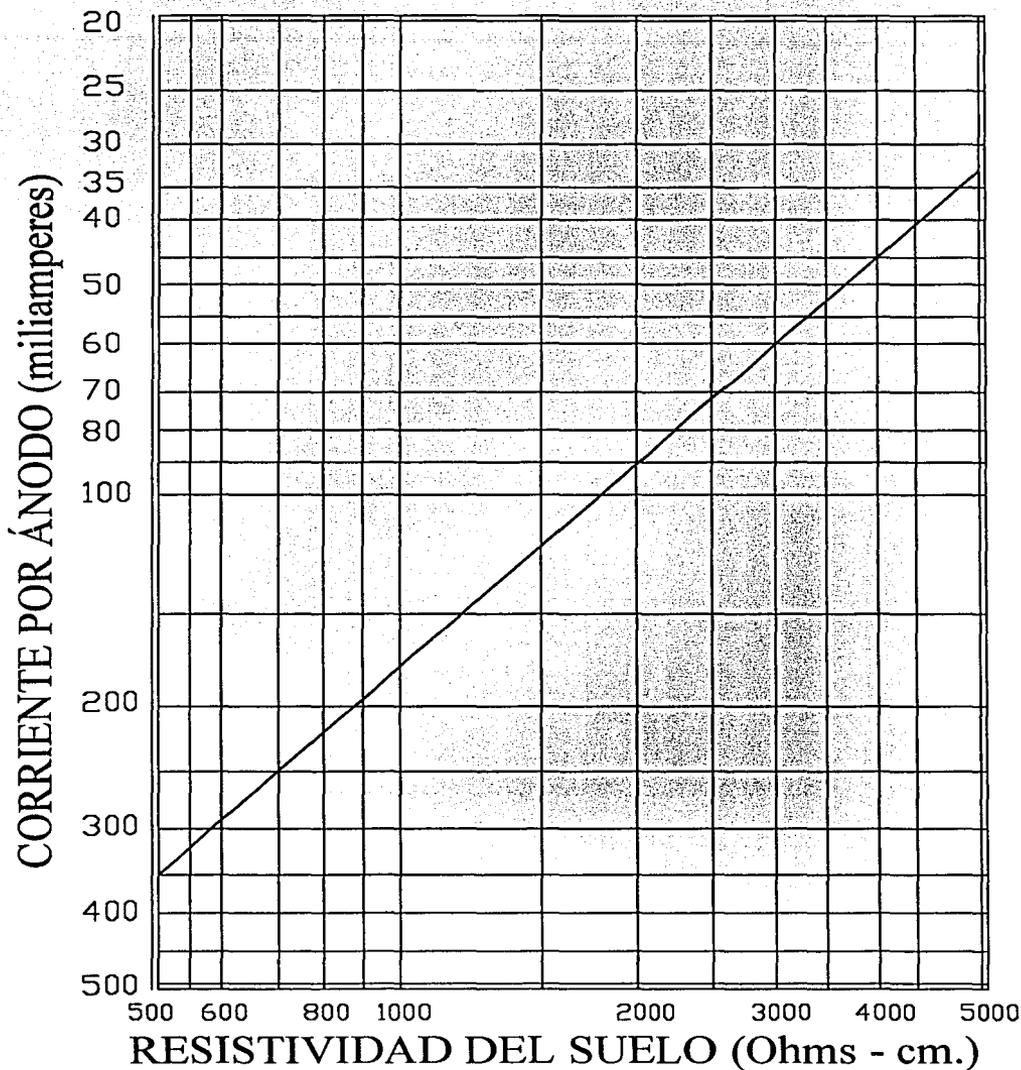


Fig. 5.7 GRÁFICA DE RESISTIVIDAD CONTRA CORRIENTE PARA 10 AÑOS DE VIDA DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO.

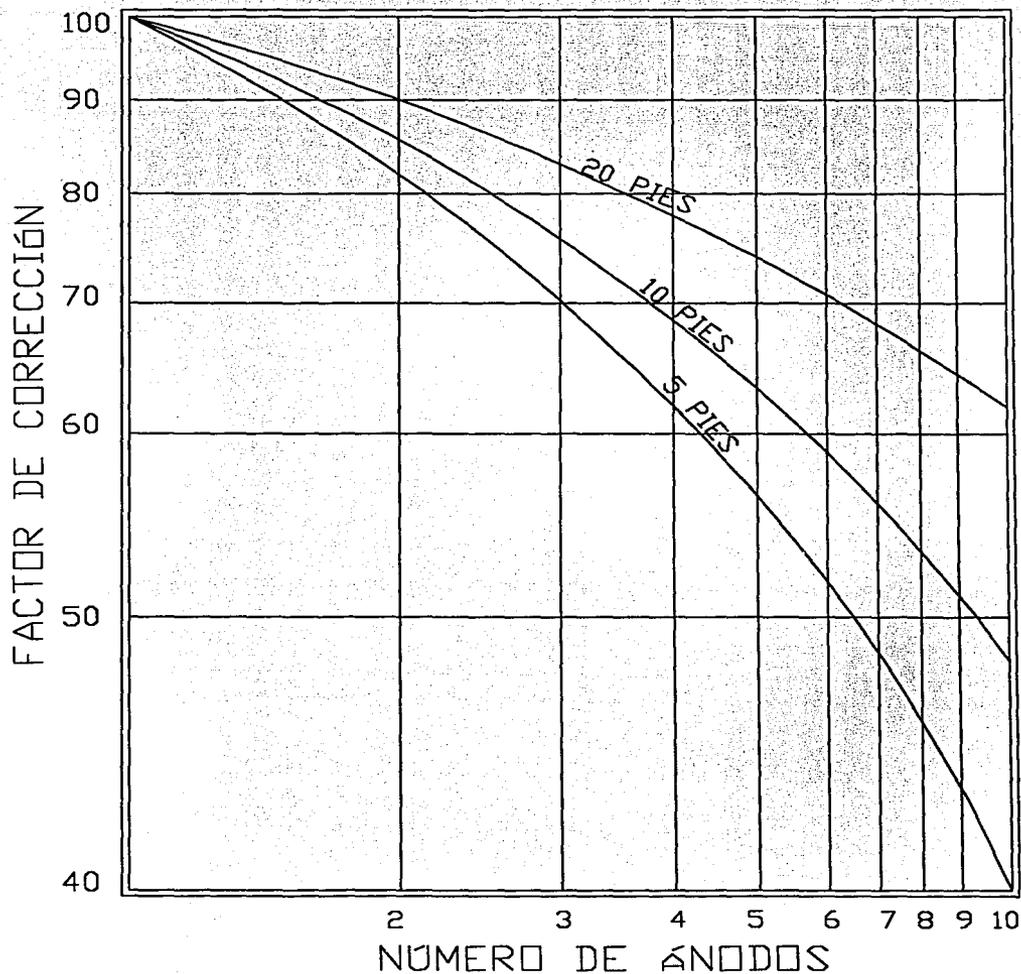


FIG. 5.8 NOMOGRAMA PARA CALCULAR LA DISMINUCIÓN DE LA CORRIENTE GENERADA POR ÁNODO CUANDO SE CONECTAN EN GRUPO.

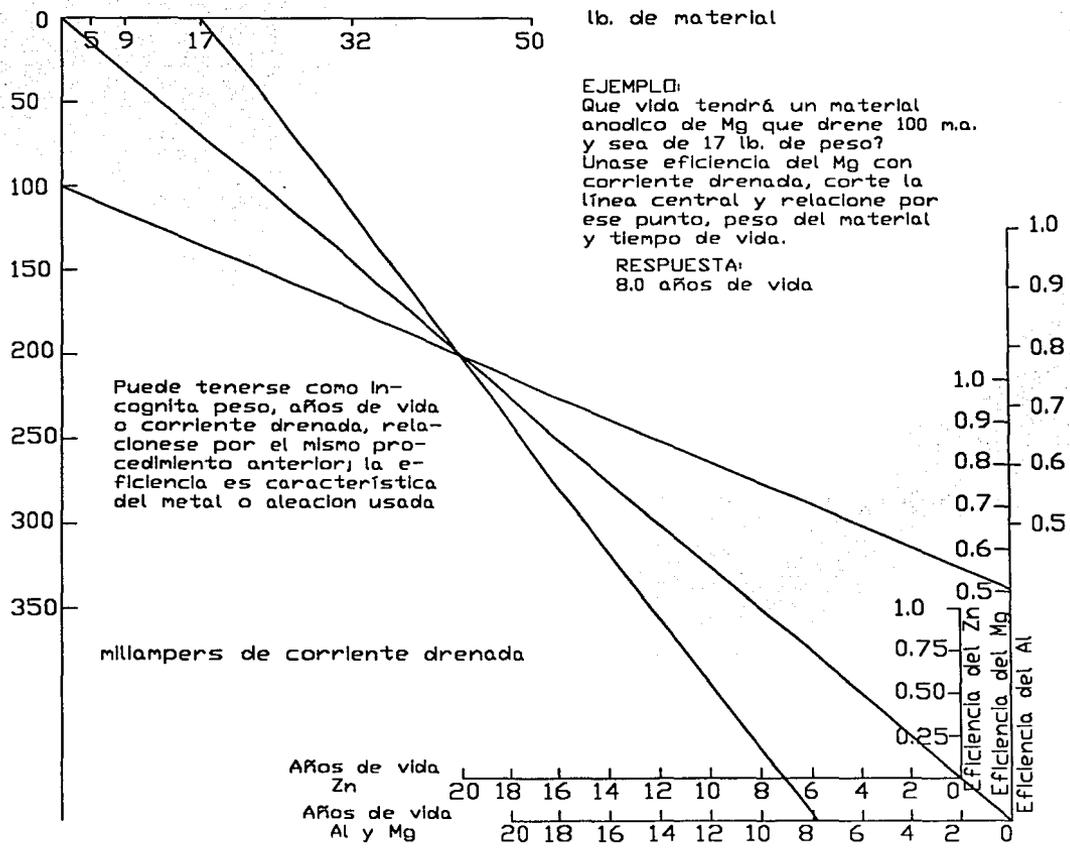


FIG. 5.9 NOMOGRAMA DE ÁNODOS DE SACRIFICIO.

RELACIONA PESO DE MATERIAL, CORRIENTE DRENADA, AÑOS DE VIDA Y EFICIENCIA.
 ELABORADO EN EL DEPARTAMENTO DE CORROSIÓN DEL INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO.

se instalan en el electrolito y se conectan al polo positivo de la fuente externa de corriente directa, mientras que la estructura que se quiere proteger se conecta a la terminal negativa de la misma fuente.

La fuente externa de corriente directa, es un rectificador de corriente alterna que transforma a ésta en corriente directa que es la única forma que puede ser utilizada adecuadamente en los procesos electrolíticos como es el caso del fenómeno de la corrosión. Los ánodos energizados utilizados en la protección catódica impresa, generalmente son de grafito o de hierro fundido con alto contenido de silicio. En medio ambiente con cloruros como agua de mar, el grafito es más eficaz que el hierro fundido con alto contenido de silicio, mientras que en medios de agua dulce donde se libera oxígeno en los ánodos, resulta mejor el uso de los ánodos de hierro fundido con alto contenido de silicio.

Cuando las estructuras por proteger se encuentran enterradas no hay mucha diferencia en el comportamiento de estos ánodos y para abatir la resistencia ánodo tierra, se utilizan "rellenos" de carbón de coque pulverizado.

5.15.1 TIPOS DE RECTIFICADORES

Aún cuando existen rectificadores de corriente alterna con elementos rectificadores de muy diversos materiales, los más comúnmente usados son los que utilizan diodos de selenio y diodos de silicio. La rectificación de la corriente se lleva a cabo al colocar los diodos antes mencionados en un circuito eléctrico de corriente alterna con una carga eléctrica adecuada.

5.15.2 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO

El tipo básico de este circuito funciona en forma similar, a una válvula check en una línea de agua, permitiendo que la corriente fluya libremente en una sola dirección (hacia delante para una sola mitad onda sinusoidal de la corriente alterna), bloqueando el voltaje en la dirección contraria sobre la otra mitad de la onda. (Ver fig. 5.10)

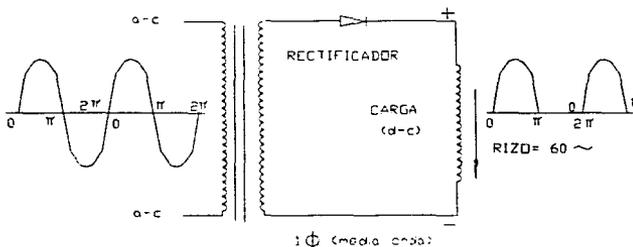


Fig. 5.10 Circuito de un rectificador de media onda.

En este tipo de rectificador, solamente se bloquea la mitad de la onda produciendo una forma de corriente directa altamente pulsátil, ésta naturalmente lo hace poco eficiente y en algunos casos poco deseable para ser usada en protección catódica.

Para poder utilizar ambas mitades de la onda, es necesario utilizar un circuito de onda completa como se indica en la Figura 5.11 En este caso la corriente es directa y pulsátil pero se ha cambiado la frecuencia del rizo de 60 a 120 ciclos, dando un voltaje de corriente del ánodo hacia la estructura más uniforme.

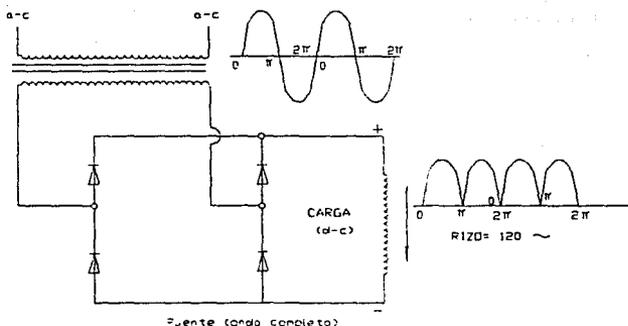


Fig. 5.11 Circuito de un rectificador de onda completa

Lo mismo que se ha descrito en los párrafos precedentes para una línea monofásica de corriente alterna, se puede aplicar a circuitos trifásicos que pueden ser considerados como tres ondas sinusoidales de una sola fase, separadas en tiempo una de la otra, por un tercio de ciclo.

Para una unidad rectificadora completa, se necesita un gabinete, un circuito de apertura (breaker), un transformador, elementos rectificadores, derivador de corriente directa, voltímetro y amperímetro. La información adicional sobre los rectificadores para protección catódica se obtienen, naturalmente, a solicitud expresa del comprador.

5.15.3 EFICIENCIA DE LOS RECTIFICADORES

Los rectificadores usados para la protección catódica por corriente impresa son generalmente baratos y simples en su construcción operando con corriente alterna de 60 ciclos monofásico o trifásico, por lo que se pueden conectar rápidamente a las líneas de transporte de energía eléctrica para uso doméstico.

Estos operan con eficiencias menores del 100% que significa que se obtiene una salida de corriente eléctrica directa menor a la entrada de corriente alterna suministrada al rectificador y operan a su máxima eficiencia cuando trabajan a su máxima capacidad por lo que, al diseñar la protección catódica, se deberá seleccionar el rectificador de tal forma que opere lo más cercano posible a su capacidad máxima.

La eficiencia del rectificador se puede calcular midiendo la entrada de corriente alterna, con ayuda de un wattímetro y midiendo el voltaje y amperaje de salida de la corriente directa.

La eficiencia se determina con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{\text{Volts (C.D.)} \times \text{Ampas. (C.D.)} \times 100}{\text{watts (C.A.)}}$$

Por ejemplo, un rectificador operando a 20 Amp. y 32 volts de corriente directa tiene una potencia de corriente alterna de 940 watts, luego, la eficiencia será:

$$\frac{20 \text{ Amp.} \times 32 \text{ volts} \times 100}{940 \text{ watts}} = 68 \%$$

5.15.4 DETALLES DE INSTALACIÓN

La diferencia entre las potencias de entrada de C.A. y de salida de C.D. representan la pérdida de potencia debido al proceso de rectificación y que se manifiesta como un desprendimiento de calor en el rectificador siendo necesario enfriar los diodos para que no se calienten mucho y fallen.

Los rectificadores se enfrían por medio de ventiladores, que pasan una corriente de aire forzado a través del armazón que soporta los diodos encerrados en el gabinete del rectificador o bien sumergiendo los componentes del rectificador en aceite aislante para uso eléctrico, cediendo a este el calor y enfriando el aceite en la parte exterior del rectificador por circulación continua del líquido enfriador.

Los detalles de instalación como en el caso de los ánodos de sacrificio deberán estar contenidos en las especificaciones particulares de la obra. Las tablas 5.6 y 5.7 pueden servir como guía, para que el ingeniero responsable de la instalación de la protección catódica haga una selección apropiada del método a emplear.

PROBLEMAS COMUNES	CAUSAS	SOLUCIONES
1. Bajo alcance de protección	a) Limitación de potencial a circuito abierto - 1.5 V Mg - 1.1 V Al - 1.1 V Zn	Utilización de corriente impresa No encontrarse ubicado correctamente.
	b) Área excesiva. Tuberías de diámetros grandes.	Aumento de cantidad de ánodos.
	c) Deficiente recubrimiento anticorrosivo.	
2. Rapidez de desgaste del ánodo	a) Terreno corrosivo o de baja resistividad.	Mayor cantidad de ánodos
	b) Relleno mal diseñado.	Balanceo de componentes del relleno.
	c) Bajo libraje para gran área	Aumentar el libraje.
3. Usar corriente impresa	a) Mayor corriente y voltaje en el sistema de sacrificio.	Si no existe problemas en otras estructuras, inutilizar ánodos de sacrificio.
4. Ineficacia del sistema en un tramo o en su totalidad.	a) Corrientes parásitas.	Detectar fuente de energía y conectar regreso, o simplemente diodos para alimentación.

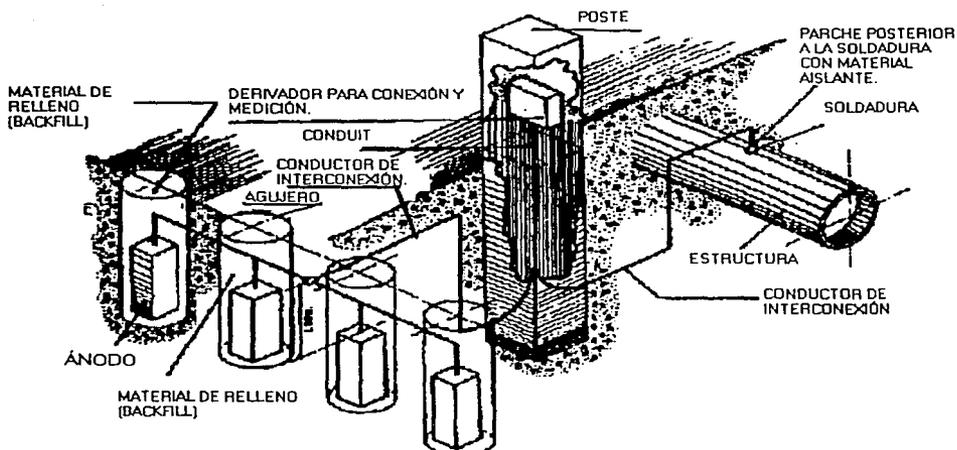
Tabla 5.6

Protección catódica por ánodos de sacrificio

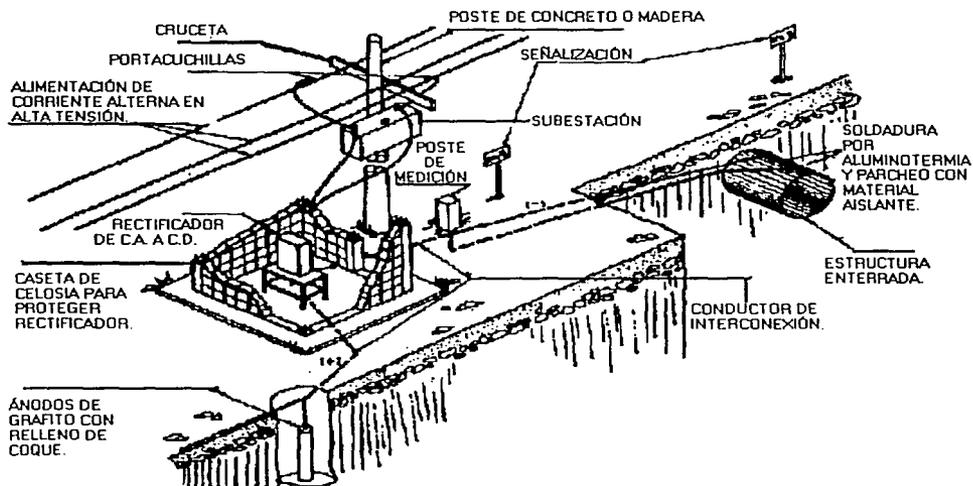
<u>PROBLEMAS COMUNES</u>	<u>C A U S A S</u>	<u>SOLUCIONES</u>
1.- Alcance incompleto para cubrir La tubería.	a). Pocos lugares de localización por falta de alimentación de energía eléctrica.	Auxiliarse con ánodos de sacrificio.
	b). Mal recubrimiento anticorrosivo. (Mala aplicación y/o mala calidad del producto).	Idem. Anterior
	c).- Fugas de corriente debidas a	Colocación de aislantes de monoblock
	I.- Válvulas de seccionamiento en llegadas y salidas. II.- Trampa de diablos. d).- Alta resistividad del terreno	Saturar de H ₂ O la cama anódica.

Tabla 5.7 Protección catódica por corriente impresa

En la figura 5.12 se representa esquemáticamente mediante un isométrico los dos sistemas de protección catódica empleados para proteger tuberías enterradas en contra de la corrosión.



PROTECCIÓN CATÓDICA. SISTEMA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO



PROTECCIÓN CATÓDICA. SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA

Fig. 5.12 Isométrico que representa los dos métodos de protección catódica empleados para proteger a las tuberías enterradas en contra de la corrosión.

CONCLUSIONES

A) La instalación de una línea de tuberías que conducen hidrocarburos, debe ser altamente confiable y segura, con el objeto de evitar cualquier riesgo de accidentes, que pudieran contaminar el medio ambiente y poner en peligro, el ecosistema y vidas humanas, y en razón de la gran importancia que tiene para el país, donde se reportan aproximadamente 60,000 km. de tubería.

B) Para ello, es importante llevar a cabo un estricto control de calidad, en cada paso durante la construcción del proyecto, tomar en cuenta cada aspecto, cada detalle que pueda ocasionar un problema por mínimo que sea, ya que en un corto, mediano o largo plazo el problema pudiera llegar a ser de grandes consecuencias.

C) Los aspectos a los que se refiere el punto anterior incluyen:

La supervisión de cada tubo desde su fabricación.

El cuidado de la protección mecánica anticorrosiva que cubre los tubos, durante el manejo, transportación e instalación de los mismos para que no sufran ningún daño.

Tener cuidado de que los tubos no sufran daños, durante un proceso de doblado.

Utilizar el espesor adecuado del tubo (cédula) y recubrimiento mecánico, en la región apropiada.

Llevar a cabo una inspección detallada y cuidadosa en el proceso de soldadura, para una óptima hermeticidad en la construcción.

Una vez enterrada la tubería se debe hacer un estudio adecuado, para emplear el sistema de protección catódica óptimo.

Y en otros aspectos, para que los resultados se vean reflejados en una mejor calidad de las obras y en el cumplimiento de los programas para reducir costos, y así seguir apoyando en el desarrollo de ésta industria de nuestro país.

Lo anterior es importante para la concientización del ingeniero, en cuanto a la importancia de su actividad con relación a su entorno social, económico, humano y ecológico, y sobre todo en lo referente a la peligrosidad del material que se transporta por dichas líneas. Todo esto se reflejará en la construcción de obras duraderas, seguras y de alto rendimiento.

D) Este trabajo pudiera servir como referencia, para tomar en cuenta cada uno de los aspectos fundamentales a considerar en la preparación técnica del responsable de una obra de esta naturaleza, es decir, capacitarse en cuestiones de materiales para tuberías de conducción de hidrocarburos, procedimiento de recubrimiento anticorrosivo, técnica y control de calidad de soldadura de línea, protección catódica de tuberías enterradas, operaciones de control de calidad como las pruebas hidrostáticas, etc.

Considero que esta tesis pudiera servir como un punto de vista general, que permita al interesado en este tipo de obras, dirigirse por un camino de capacitación adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

1. PEABODY W.A. CONTROL OF PIPE LINE CORROSION
NACE. 1997.
2. DUCTOS PUBLICACIÓN DEL COMITE INTERORGANISMOS
BIMESTRAL DE DUCTOS. MAYO-JUNIO 2000
3. PIPELINE & GAS PUBLICATION MENSUAL. MARZO 2000.
JOURNAL.
4. API-ESTANDAR-1104 ESTANDAR PARA SOLDADURA DE LINEAS DE TUBERÍAS E
INSTALACIONES RELACIONADAS.
5. WRIGHT E. JOHN. PRACTICAL CORROSION CONTROL METHODS FOR GAS
UTILITY PIPING. NACE 1995.
6. BADGER Y BANCHERO INTRODUCCION A LA INGENIERIA QUIMICA.
EDITORIAL Mc. GRAW-HILL 1996.
7. R.M. BURNS Y PROTECTIVE COATINGS FOR METALS
W.W. BRADLEY NACE 1996.
8. A. V. BLOM ORGANIC COATING IN THEORY AND PRACTICE ELSERIER
PUBLISHING CO.
9. PEMEX GERENCIA DE REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO PARA TUBERÍAS DE
PROYECTOS Y PROCESO Y SERVICIOS AUXILIARES. 2000
CONSTRUCCIÓN
10. C.E. MILLER OPERATION AND MAINTENANCE INSTRUCTION FOR PIPE
LINES. CRAWFORD INTERNATIONAL INCORPORATED.

APÉNDICE I

**DIAGRAMA DE FLUJO CON
ETAPAS DE CALIDAD EN LA
FABRICAIÓN DE TUBERÍAS.**

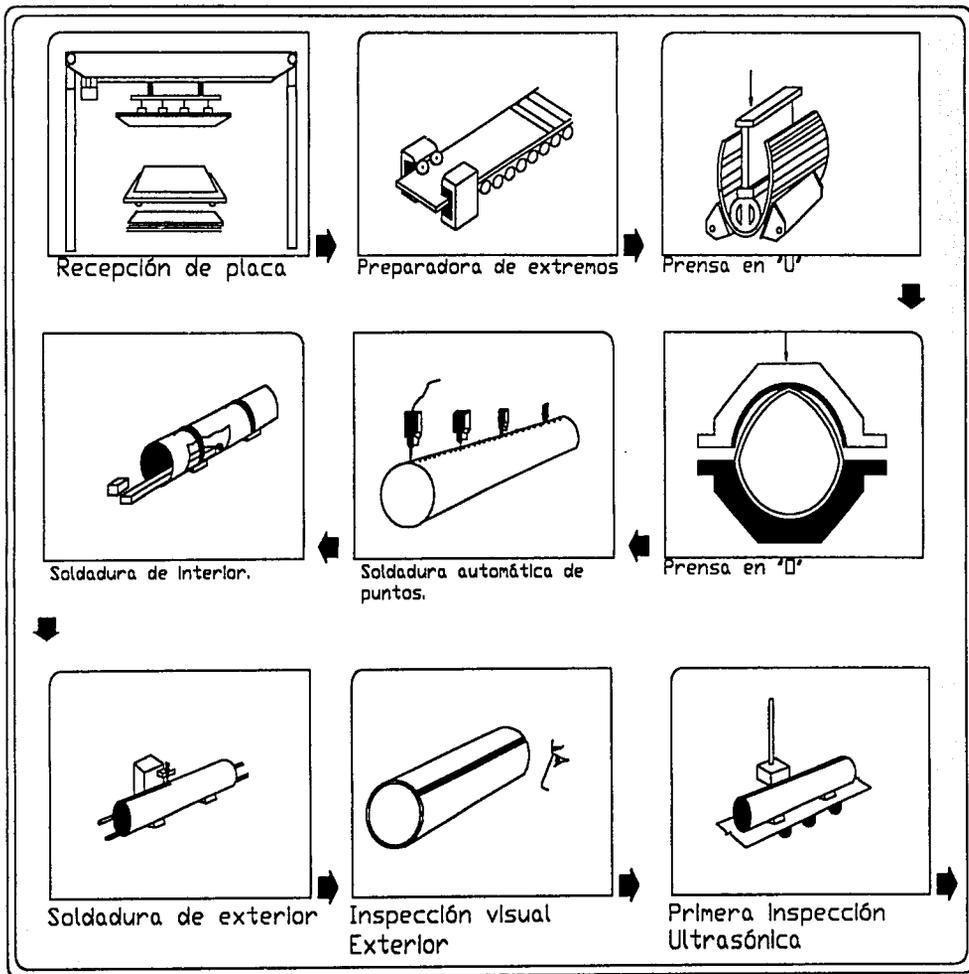


DIAGRAMA DE FLUJO CON ETAPAS DE CALIDAD
(PARTE 1)

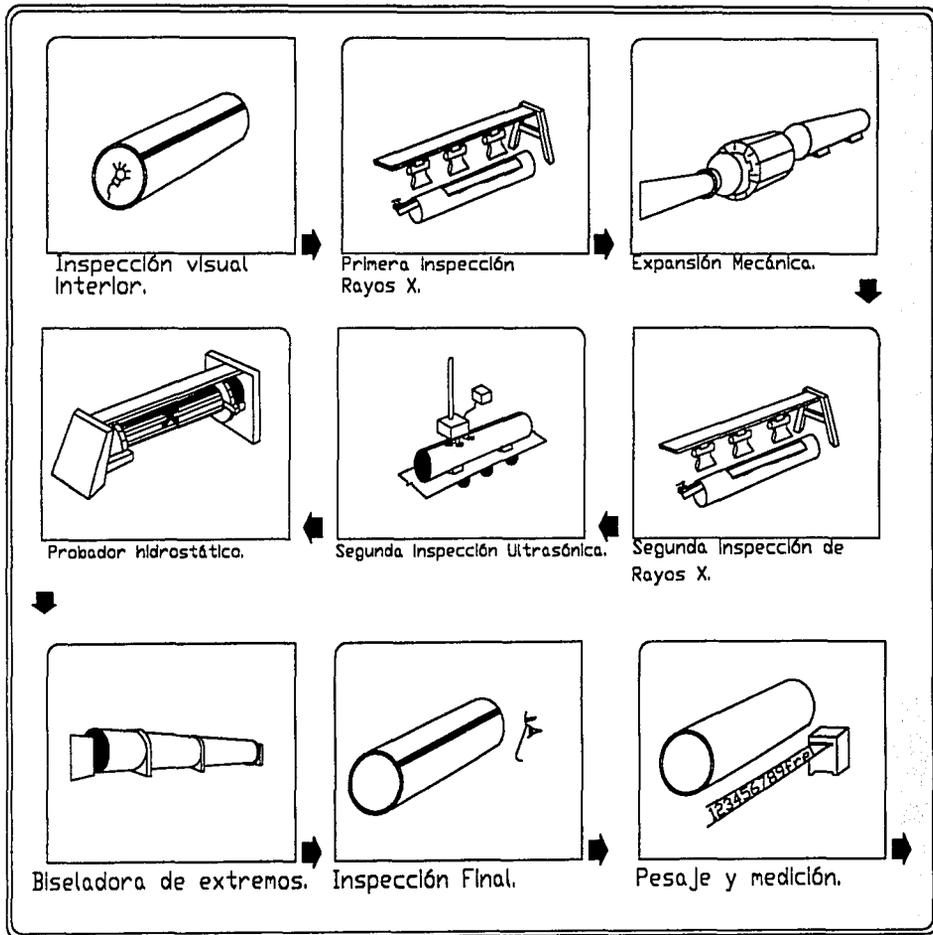


DIAGRAMA DE FLUJO CON ETAPAS DE CALIDAD
(PARTE 2)

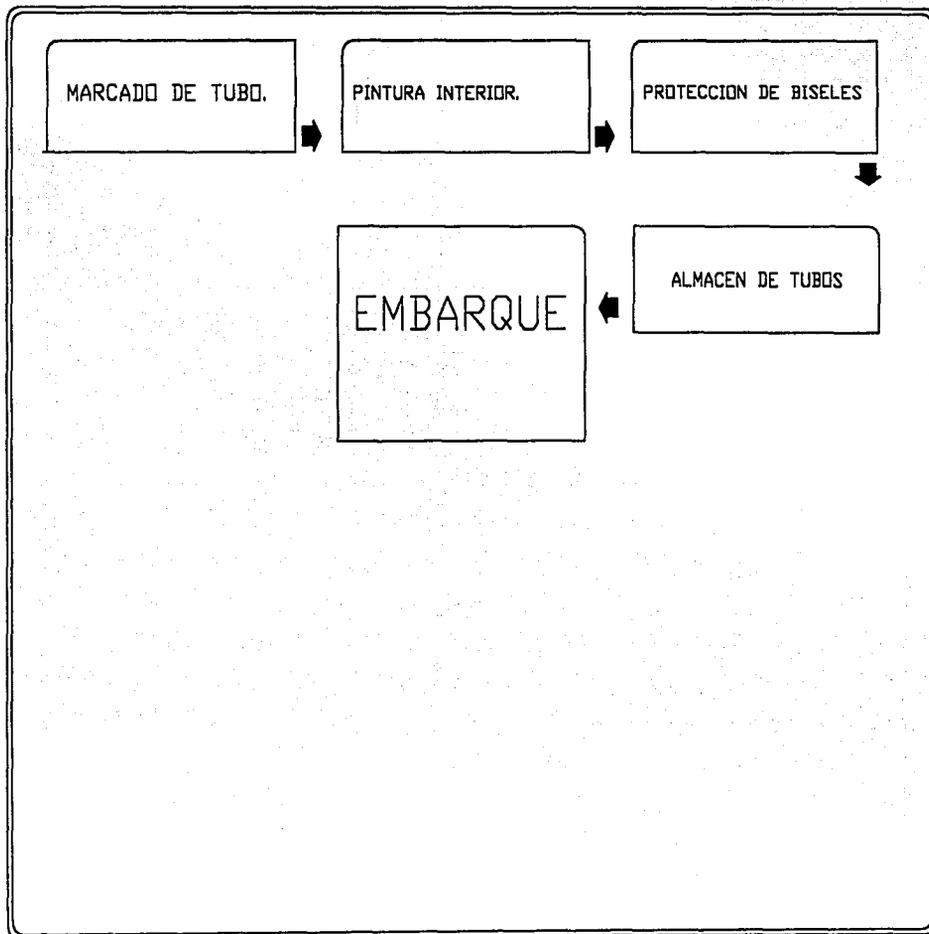


DIAGRAMA DE FLUJO CON ETAPAS DE CALIDAD
(PARTE 3)

APÉNDICE II

**INSTRUMENTOS PARA MEDIR
RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD**

INSTRUMENTOS PARA MEDIR RESISTENCIA Y RESISTIVIDAD

La resistencia se mide empleando un voltmetro y un amperímetro, o bien con instrumentos especiales que dan lecturas directas. En los trabajos de protección catódica con frecuencia es necesario medir la resistividad del suelo directamente en el campo. Estas mediciones se hacen por el método de los 4 electrodos, el cual consiste en introducir en el suelo cuatro electrodos separados por espaciamientos iguales. Los espaciamientos representan la profundidad a la que se desea conocer la resistividad.

Para un espaciamiento entre electrodos determinados, el primer paso es encontrar la resistencia en ohms entre electrodos centrales y después multiplicar esa resistencia por un factor para obtener la resistividad del suelo. Este factor es 191.5 veces el espaciamiento en pies entre electrodos.

En la tabla siguiente se indican los factores para diferentes espaciamientos entre electrodos.

ESPACIAMIENTO		
PIES	PULGADAS	FACTOR
2	7	500
5	3	1 000
7	10	1 500
10	6	2 000
13	1	2 500
15	8	3 000

En la figura 1 se ilustra la forma de medir la resistividad del suelo por el método de los cuatro electrodos con instrumentos de C.D. o sea mediante un voltmetro y un amperímetro.

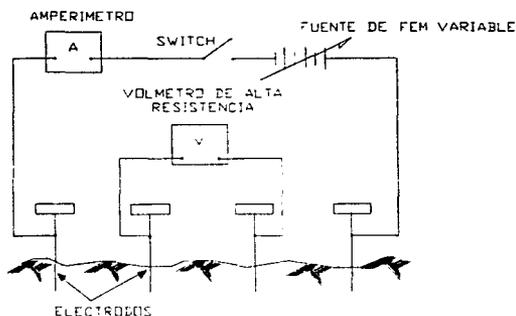


FIG 1 - METODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS PARA MEDIR LA RESISTIVIDAD DEL SUELO CON INSTRUMENTOS DE CORRIENTE DIRECTA

En este caso el voltaje se mide sin corriente y con corriente. El cambio del voltaje (ΔV) se anota junto con la corriente requerida para producirlo. La resistencia entre los electrodos centrales es igual a $\frac{\Delta V}{i}$ y está dada en ohms.

El valor de la resistencia se multiplica entonces por el factor para obtener el promedio de la resistividad en el suelo. Ejemplo: supóngase que el espaciamento entre electrodos es de 2' 7" y que las lecturas de potencial que se obtuvieron son de 0.12 V sin corriente y 0.36 V con 2.7 mA de corriente. El ΔV es de 0.24 volts y la resistencia entre los electrodos centrales es $\frac{240 \text{ mV}}{2.7 \text{ mA}} = 89$ ohms utilizando el factor apropiado

para el espaciamento entre electrodos, se obtiene:

$$\text{Resistividad: } 89 \times 500 = 44\,500 \text{ ohms - cm}$$

EL VIBROGROUND

Los instrumentos que miden directamente la resistencia entre los electrodos centrales son de diversos tipos pero todos utilizan un rápido inversor de C.D. para nulificar los efectos potenciales galvánicos y de polarización. Uno de los métodos usados para medir resistencia directamente es igualando la resistencia desconocida con un valor conocido.

Con el Vibroground se pueden medir por lo general resistencias de 0 a 1, 0 a 10, 0 a 100 y 0 a 1000 ohms. Estos rangos permiten medir resistividades del suelo muy elevadas por medio del método de los cuatro electrodos.

El Vibroground trabaja según el principio de operación de balance a cero. La caída de voltaje que origina el flujo de corriente a través de la resistencia desconocida que es el suelo, se mide por comparación con la caída de voltaje desarrollada por esa misma corriente al fluir a través del potenciómetro calibrado. Como puede observarse en la figura 2 el instrumento consta de una fuente de fuerza, un circuito de corriente y un circuito de medición.

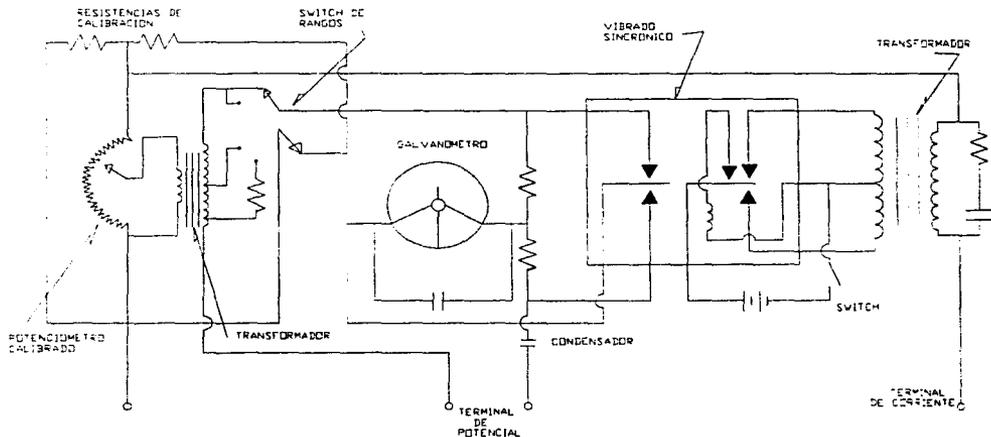


FIG. 2 - CIRCUITO DE INSTRUMENTO TÍPICO LLAMADO COMERCIALMENTE VIBROGROUND

La fuente de fuerza cambia el bajo voltaje de C.D. de la batería mediante un vibrador sincrónico de 97 CPS, en una corriente alterna con la que se alimenta el primario del transformador, en esta forma el voltaje es elevado hasta 125 volts C.A. en el secundario del transformador.

En el circuito de corriente secundario del transformador está conectado en serie con un potenciómetro calibrado y con las terminales C_1 y C_2 las que se conectan a los 2 electrodos de corriente. La resistencia del suelo entre los electrodos completa el circuito.

El circuito de medición consiste del secundario del transformador proporcional, el switch selector de rangos, dos resistencias del medidor, el galvanómetro, un condensador y las terminales P_1 y P_2 que se conectan a los electrodos de potencial. La resistencia del suelo entre los electrodos completa el circuito.

La corriente que fluye entre los electrodos conectados C_1 y C_2 produce una caída de voltaje a través de la resistencia del suelo entre los electrodos de potencial P_1 y P_2 . Esta caída de voltaje origina un flujo de corriente en el circuito de medición. La corriente que fluye a través del potenciómetro calibrado produce a su vez una caída de voltaje, el cual se alimenta al primario del transformador proporcional induciéndose en su secundario un voltaje que causa también un flujo de corriente en el circuito de medición. Esta corriente tiende a nulificar la corriente debida a la caída de voltaje a través de la resistencia del suelo. Cuando el potenciómetro calibrado y el switch selector se ajustan de manera que ambas corrientes se igualen, el galvanómetro indicará cero y por lo tanto estará balanceado. La resistencia leída en el potenciómetro calibrado se multiplica por el valor que señale el switch de rangos, obteniéndose de ésta manera el valor de la resistencia de la tierra entre los electrodos de potencial conectados a P_1 y P_2 .

APÉNDICE III

**EQUIPO DE INSPECCIÓN
INTERIOR DE FALLAS EN
TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN**

EQUIPO DE INSPECCION INTERIOR DE FALLAS EN TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN

En términos generales los calibradores electrónicos "Diablos instrumentados" detectan y con certeza localizan todas las anomalías físicas en tubería construida de material ferro-magnético que tenga una dimensión transversal significativa. Estos instrumentos operan basándose en el principio de fuga de flujo magnético. Es sensible a todas las discontinuidades de carácter interno y externo. Una discontinuidad puede ser en forma de pérdida de metal, tal como corrosión por defecto de manufactura y daño mecánico o podría ser en forma de exceso de metal como aquellos encontrados en soldaduras, bridas, válvulas, parches, etc.

Otra forma de falla por manufactura que es detectable primariamente por razones mecánicas en lugar de flujo magnético, es la curvatura de la tubería.

Ejemplos de éste último caso son abolladuras, ampollas de hidrógeno, curvas con arrugas y combas.

A continuación se detalla el funcionamiento del equipo.

Los instrumentos son completamente auto contenidos y operan basándose en el principio de localizar las fugas en el flujo magnético creadas en la vecindad de las anomalías e imperfecciones a medida que el instrumento pasa a través de la tubería.

COMPONENTES DEL CALIBRADOR ELECTRÓNICO

Consiste de tres instrumentos principales: La sección impulsora en el frente, la sección combinada de imanes y transductores en el centro y la de amplificadores electrónicos y sistemas de grabación en la parte trasera del instrumento. (Ver fig. 1)

SECCION IMPULSORA. - Las baterías localizadas en la sección delantera, proveen la energía necesaria para el instrumento durante las corridas. La sección impulsora está centralizada por copas de poliuretano. Las copas permiten que se introduzca un diferencial de presión, causando éste a su vez que el instrumento se mueva dentro de la tubería.

SECCION TRANSDUCTORA. - La sección del centro está provista de un número adecuado de zapatas transductoras montadas en dos anillos para equiparlas y éstas a su vez mantienen un contacto estrecho entre los sistemas sensores y la superficie interior de la tubería a través de la corrida de inspección. Los sensores cubren los 360° completos de la circunferencia de la tubería con un amplio margen de empalme. La suspensión de los sensores provee un factor de colapso suficiente para que le permita al instrumento pasar a través de reducciones localizadas en el diámetro interior de la tubería sin que esto cause daños al equipo.

A medida que el instrumento pasa a través de la tubería un activo campo de flujo magnético es inducido a la pared de la tubería. Señales electrónicas son generadas de la fuga del campo magnético, causadas a su vez por anomalías de carácter interno o externo del material de la tubería. Esta fuga de campo magnético se detecta por los dos grupos de sensores colocados en posición tal que se cubra, como ya se mencionó, los 360° de la tubería.

SECCION INSTRUMENTADA. - La sección trasera consiste en el sistema electrónico completo y los instrumentos de grabación donde todas las señales son procesadas y acumuladas en una cinta magnética. Anexado a la sección trasera del instrumento se encuentran dos ruedas de odómetro, cuya función es la de medir la distancia.

Estas tres secciones están unidas por uniones universales, las cuales permiten que el instrumento pueda negociar efectivamente los virajes que tenga que hacer en curvas normales en la tubería.

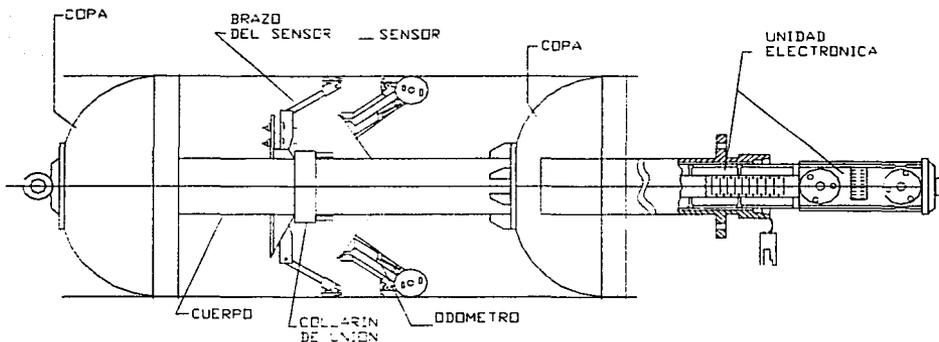


FIGURA 1 - DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA HERRAMIENTA DE INSPECCION DE 762 mm 30" DIAM.

EL SISTEMA DE REPRODUCCIÓN

Al finalizar la corrida la cinta magnética es removida del instrumento. El sistema de reproducción entonces recobra y procesa la información que fue acumulada en la cinta magnética. Esa información procesada se envía a un oscilógrafo de rayos de luz donde es transferida al papel para que la persona que lo vaya a interpretar tenga un formato visual sobre el cual revisar e interpretar los datos de la inspección.

INTERPRETACIÓN DE LAS GRAFICAS.- CAPACIDAD DE DETECCIÓN.

La gráfica resultante es un registro de las indicaciones producidas por las anomalías localizadas en la tubería durante la corrida del "diablo instrumentado", el instrumento detecta anomalías internas o externas, dependiendo de la extensión de la penetración o deformación de las mismas en la pared de la tubería

Los tipos de anomalías que se detectan son las siguientes:

- Picaduras de corrosión.
- Daño mecánico
- Ranuras. y Arrugas.
- Defectos de fabricación.
- Marcas de esmerilado.
- Ampollas de Hidrógeno.
- Rajaduras circunferenciales.

En adición a la corrosión, y otros tipos de defectos, la gráfica claramente indica muchos otros incidentes de la tubería que ayudan a correlacionar la misma con los puntos conocidos a lo largo de la tubería. (Ver fig. 2)

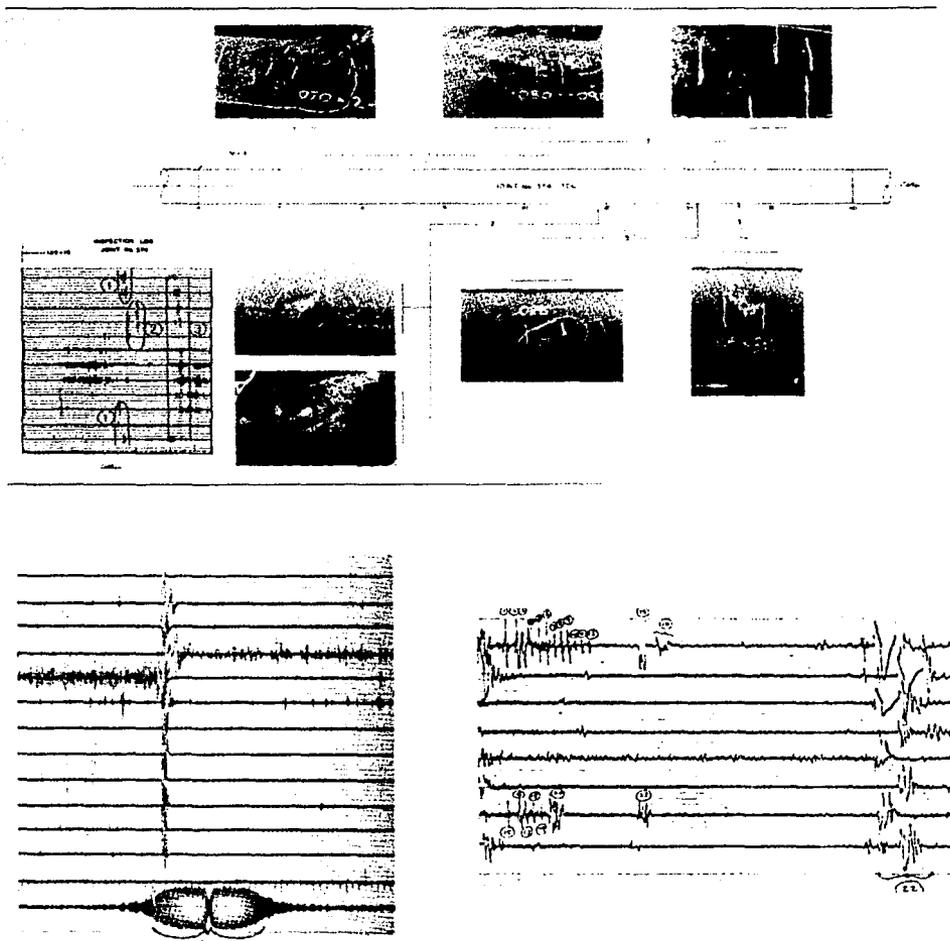


FIGURA 2 - REGISTROS DE LAS INDICACIONES PRODUCIDAS POR LAS ANOMALIAS LOCALIZADAS POR UN "DIABLO INSTRUMENTADO"

Considerando que las anomalías son detectadas por un método indirecto, no por medir y registrar las anomalías por ellas mismas, sino por observar el efecto de un campo magnético inducido en el tubo; por saber que existen diferentes variables que no pueden ser compensadas en los registros (configuración del defecto, variaciones en la permeabilidad magnética del tubo); por la incidencia del defecto a la zapata detectora, y por variaciones fuera de la capacidad de compensación del equipo.

La clasificación de defectos se realiza en los siguientes términos y con una tolerancia del 10%.

GRADO 1 (LIGERO): Se asigna a anomalías que se creen indican más del 15% pero menos del 30% de penetración en la pared de la tubería.

GRADO 2 (MODERADO): Se asigna para anomalías que se creen indican más del 30% pero menos del 50% de pérdida del material del ducto.

GRADO 3 (SEVERO): Se asigna para anomalías que se creen indican 50% o más pérdida del espesor de la tubería.

GRADO "U": Significa anomalías sin clasificar, éste grado está asignado a distorsiones que se creen no están asociadas con deterioros significativos en la pared del tubo, como son las deformaciones geométricas, astillas, laminaciones, etc. Es significativo señalar que las zapatas al desplazarse y saltar estas deformaciones, pueden ocultar la existencia asociada de corrosión que puede ser inclusive severa.

En la figura 3 se muestra el corte en una tubería en donde corre un "Diablo instrumentado", procedente de una plataforma marina de extracción de crudo.



FIGURA 3 – EL “DIABLO INSTRUMENTADO” DENTRO DE UNA TUBERIA

APÉNDICE IV

GLOSARIO DE TÉRMINOS

“GLOSARIO DE TÉRMINOS”

CHUPADA O CHUPARSE.- Es una deformación del tubo debido principalmente a la flexión.

COLCHÓN.- Es el procedimiento de depositar material suave sobre la parte superior de la tubería que se encuentra dentro de la zanja.

CONFORMACIÓN (D.D.V.).- Es la nivelación del D.D.V. conforme al proyecto.

COSTURA.- Es la unión de placas roladas por medio de soldadura, realizada para dar forma a un tubo.

DERECHO DE VIA (D.D.V.).- Franja de terreno en donde se tiende una línea de conducción.

DIABLO.- Elemento mecánico que se utiliza en la limpieza interior de la tubería.

DIABLO INSTRUMENTADO.- Elemento que sirve para detectar fallas de construcción como abolladuras, falta de protección, corrosión, cambios de espesor, etc.

DIÁMETRO NOMINAL.- Diámetro especificado por el fabricante.

ENVOLVENTE.- Camisas o medias cañas alrededor de la tubería.

ESMALTADO.- Es la aplicación de protección exterior a la tubería.

LINGADA.- Tramo de dos o más tubos soldados.

PAREDE NOMINAL.- Espesor de la tubería.

PIQUETE.- Esfuerzo que se aplica al tubo cada determinado tramo para obtener una curva.

TENDIDO.- Colocación de tubería antes de soldar sobre el Derecho de Vía.

TIENDE TUBOS.- Tractor especial, con contrapesos y una pluma capaz de levantar y tender tubos de varias toneladas de peso.

ZAPATAS DOBLADORAS.- Elementos que se utilizan en el doblado de tubería. Molde intercambiable que se adapta a las máquinas dobladoras de acuerdo al diámetro del tubo.

INSTITUCIONES QUE ELABORAN NORMAS Y ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.

AISI .- Instituto Americano del Hierro y el Acero.

API.- Instituto Americano del Petróleo.

ANSI.- Instituto Nacional Americano de Estándares.

ASME.- Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos.

ASTM.- Sociedad Americana de Pruebas no Destructivas.