CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN AMBIENTES MARINOS

POR

ING. ALFONSO BALLESTEROS HINOJOSA

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. SEPTIEMBRE DEL 2010

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN AMBIENTES MARINOS

POR

ING. ALFONSO BALLESTEROS HINOJOSA

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO, COAHUILA. SEPTIEMBRE DEL 2010

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

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía "ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN AMBIENTES MARINOS", realizada por el alumno ALFONSO BALLESTEROS HINOJOSA, con número de matrícula ES09-092 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial

Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila Tutor Académico

Ing. Mario Francisco Trejo Aguirre Tutor en Planta Ing. Fernando Macías López Asesor

Vo.Bo. M.C. Claudia Aracely González Rodríguez Coordinador de Posgrado

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno ALFONSO BALLESTEROS HINOJOSA, una vez leída y revisada la Monografía titulada "ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN AMBIENTES MARINOS", aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 14 días del mes de septiembre del 2010.

Dr. Dagoberto Vázquez Obregón Presidente MC. Víctor Hugo López Cortez Secretario

Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila Vocal

Agradecimientos

A Dios por haberme guiado en cada una de mis decisiones para poder llegar hasta aquí.

A mis padres por la educación que me brindaron y por su apoyo incondicional en cada paso que he dado tanto en mi vida como en mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico para poder realizar mis estudios de posgrado, como también para el poder realizar una estancia en una universidad en el extranjero, brindándome la oportunidad de poder conocer otros tipos de culturas y de conocimientos, para mi formación personal y profesional.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales por la oportunidad del poder formar parte de ella como estudiante en la continuación de mis estudios y de mi formación profesional. En especial al Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila y del Ing. Fernando Macías Lopez por la oportunidad de pertenecer en el desarrollo este proyecto y por el compartir de sus conocimientos sobre el tema y también a cada uno de los integrantes de esta corporación que me han ayudado en la realización de mi formación.

A la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), en especial al Dr. Alexandre Queiroz Bracarense por la oportunidad de ser aceptado como alumno de intercambio en esta universidad para el complemento de mi proyecto de investigación, así como también al Dr. Silverio Ferreira da Silva del Centro de Desenvolvimiento de Tecnología Nuclear por permitirme trabajar con él en conjunto con la UFMG para la experimentación con métodos no destructivos y a cada una de las personas que me atendieron en estas instituciones para el despeño de cada una de mis actividades.

ÍNDICE

CAPÍTUL	O 1	1
1 INTRO	ODUCCIÓN	1
1.1 A	ntecedentes	1
1.2 P	lanteamiento del Problema	2
1.3 Ju	ustificación	2
1.4 O	bjetivo General	3
1.4.1	Objetivo Específico	3
1.5 A	Icance	3
CAPÍTUL	O 2	4
2 ESTA	DO DEL ARTE	4
2.1 M	létodos no destructivos convencionales	4
2.1.1	Inspección visual	5
2.1.1.1	Condiciones de inspección	5
2.1.1.2	Métodos de inspección	7
2.1.1.3	Ventajas	7
2.1.1.4	Limitaciones	7
2.1.2	Líquidos Penetrantes	8
2.1.2.1	Clasificación	8
2.1.2.2	Mecanismo de Penetración	10
2.1.2.3	Propiedades Físicas	11
2.1.2.4	Aplicación y tiempo de penetración	12
2.1.2.5	Remoción del exceso de penetrante	12
2.1.2.6	Aplicación del revelador	13
2.1.2.7	Inspección	15
2.1.2.8	Limpieza	16
2.1.2.9	Ventajas	16
2.1.2.10	Limitaciones	17
2.1.3	Partículas magnéticas	17
2.1.3.1	Principio básico	17
2.1.3.2	Formación de indicaciones	19
2.1.3.3	Inducción de campo magnético	20

2.1.3.4	Tipo de corriente de magnetización				
2.1.3.5	Densidad de flujo				
2.1.3.6	Características				
2.1.3.7	Clasificación de las partículas magnéticas	24			
2.1.3.8	Condición de la superficie				
2.1.3.9	Ventajas				
2.1.3.10) Limitaciones				
2.1.4	Radiografía	28			
2.1.4.1	Aplicaciones	29			
2.1.4.2	Rayos X y Gamma	29			
2.1.4.3	Equipo	30			
2.1.4.4	Ventajas	31			
2.1.4.5	Limitaciones	32			
2.1.5	Ultrasonido	32			
2.1.5.1	Tipo de Ondas	33			
2.1.5.2	Características de las ondas	33			
2.1.5.3	Parámetros	34			
2.1.5.4	Procedimiento	34			
2.1.5.5	Equipo	35			
2.1.5.6	Sistemas de representación	35			
2.1.5.7	Aplicación	37			
2.1.5.8	Técnica de inmersión	38			
2.1.5.9	Determinación de discontinuidades	39			
2.1.5.10	Ventajas	39			
2.1.5.11	Limitaciones	40			
2.2 P	ruebas no destructivas aplicadas en ambientes marinos	40			
2.2.1	Inspección visual	41			
2.2.1.1	Aplicaciones	41			
2.2.1.2	Limitaciones	42			
2.2.1.3	Equipo	42			
2.2.2	Partículas magnéticas	42			
2.2.2.1	Aplicaciones	43			
2.2.2.2	Características	44			

2.2.2.3	Condiciones de visualización	44
2.2.2.4	Tipo de corriente	44
2.2.2.5	Ventajas	45
2.2.2.6	Limitaciones	45
2.2.2.7	Equipo	45
2.2.3	Ultrasonido	46
2.2.3.1	Aplicaciones	46
2.2.3.2	Ventajas	46
2.2.3.3	Limitaciones	46
2.2.3.4	Equipo	47
2.2.3.5	Método de ultrasonido Ultramonit ^{MR}	47
2.2.4	Radiografía	50
2.2.4.1	Equipo	50
2.2.4.2	Procesamiento de imágenes por radiografía en tiempo real	52
2.2.4.3	Ventajas	57
2.2.4.4	Limitaciones	57
2.2.5	Técnica de medición de campo de corriente alterna	57
2.2.5.1	Equipo	59
2.2.5.2	Registro de datos	60
2.2.5.3	Análisis de datos	60
2.2.6	Calibrador interno de tuberías	61
2.2.6.1	Principio de operación del calibrador interno de tubería	63
2.2.6.2	Equipo del calibrador interno de tuberías	64
2.2.6.3	Envío de calibrador en tubería	65
2.2.6.4	Recepción y análisis de datos	66
2.2.7	Láser ultrasónico	66
2.2.7.1	Principio y método de medición	67
2.2.7.2	Equipo	68
2.2.7.3	Detección de grietas	69
2.2.8	Robot de Inspección Submarina	72
2.2.8.1	Vehículos a control remoto	72
2.2.8.2	Sistemas de inspección de navíos	76
2.2.9	Método de ruido magnético Barkhausen	79

2.2.9.1	Esfuerzos residuales		
2.2.9.2 Métodos de medición de esfuerzos residuales			
2.2.9.3	Efecto Barkhausen	84	
2.2.9.4	Dominios magnéticos	84	
2.2.9.5	Curva de Magnetización	86	
2.2.9.6	Sistema de medición	89	
2.2.9.7 Barkhaus	Comparación de difracción de rayos X y ruido magnético en	de 90	
CAPÍTUL	O 3	92	
3 ANÁL	LISIS Y DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICO	92	
3.1 N	ledición de campo de corriente alterna	93	
3.2 F	Radiografía	93	
3.3 L	Jltrasonido	95	
3.4 L	áser-Ultrasónico	95	
3.5 F	Ruido magnético Barkhausen	96	
CAPÍTUL	O 4	98	
4 CON	CLUSIONES	98	
Bibliograf	ía	101	
Lista de 1	Tablas	107	
Lista de F	-iguras	107	
Resumen	Autobiográfico	110	

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Actualmente en México se cuenta con una industria petrolera, y afín a esta, una demanda de personal capacitado y certificado ante entidades internacionales para la aplicación de pruebas de inspección en los procesos de soldadura.

El desarrollo de trabajos de mala calidad o deficientes en la aplicación de soldadura, repercuten en la calidad del producto debido a que en caso de una falla no solo se puede provocar alguna catástrofe ambiental, si no hasta ocasionar pérdidas humanas.

Una acción para evitar lo anterior es la aplicación de técnicas, de evaluación de la calidad de la soldadura, entre las cuales se encuentran las denominadas destructivas y no destructivas, estas últimas llevándose a cabo el análisis sin llevar el material a una destrucción parcial o total.

Sin embargo, para la aplicación de estas técnicas es importante contar con personal capaz de manejar los equipos e interpretar los datos que generan estos métodos.

En México, a pesar de que las técnicas no destructivas en ambientes secos tienen ya varias décadas de desarrollo, en húmedo éstas han presentado un desfasamiento, entre otras razones por la naturaleza de la aplicación. Lo anterior ha ocasionado que el personal especializado sea escaso.

Por tal motivo, el presente trabajo contempla llevar a cabo la recopilación y análisis de las técnicas más empleadas y de uso potencial, así como determinar las características y funciones que éstas guardan.

1.2 Planteamiento del Problema

En la actualidad existe una gran cantidad de actividad laboral en las zonas marinas del mundo y México no es la excepción para este tipo de trabajos ya que como se sabe existe una gran cantidad de plataformas petroleras, ductos de transportación de hidrocarburos, buques, entre otros, en regiones marinas del Golfo de México e Istmo. Debido a las condiciones ambientales a las cuales están sometidas todas estas estructuras es importante llevar a cabo un monitoreo constante de ellas, con el fin de garantizar la seguridad de las personas que allí laboran como la protección del medio ambiente circundante.

Por tal motivo existe una demanda de métodos y técnicas que sean más eficientes, confiables y que evalúen el estado real de este tipo de estructuras y además que permitan establecer las correcciones necesarias en el momento oportuno de una manera fácil y económica.

1.3 Justificación

El trabajo de soldadura no sólo es posible realizarlo en tierra sino también bajo el agua para la construcción y mantenimiento de plataformas marinas, ductos, diques, barcos, entre otros. Sin embargo, a diferencia de las uniones realizadas en tierra firme, aquellas en ambientes marinos son más susceptibles de tener una calidad deficiente, al problema de la transferencia de calor deficiente y a la presencia de hidrógeno en la atmósfera del arco, entre otros factores. Por lo que la necesidad de mejorar la calidad de las soldaduras realizadas en ambientes marinos se ha hecho más latente, a medida que el petróleo y gas se extrae en aguas más profundas. Cabe recordar que la mayoría de las exploraciones en alta mar, perforaciones y producción se hacían hasta hace poco años en aguas que tenían una profundidad de 10 a 16 metros.

Debido a esta situación se presenta la necesidad de modificar y crear parámetros a las cuales cotidianamente no se está acostumbrado a trabajar, y como consecuencia se carece de información técnica y preparación humana en el tema.

Por tal motivo, al conocer la gran variedad de factores que intervienen para poder obtener una soldadura sana en este tipo de ambientes, es importante conocer las técnicas de inspección no destructiva más adecuadas.

1.4 Objetivo General

Determinar y analizar las técnicas no destructivas aplicadas para evaluar la calidad de uniones de metales en medios marinos en la industria localizada en la región del Golfo e Istmo de México.

1.4.1 Objetivo Específico

- Documentación y análisis de técnicas convencionales de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas.
- Búsqueda de técnicas convencionales y no convencionales empleadas en ambientes submarinos para la inspección de uniones soldadas.
- Análisis de técnicas con potencial uso para aplicaciones submarinas.

1.5 Alcance

El presente trabajo tiene la finalidad de integrar un documento con el estado actual de pruebas no destructivas en estructuras aplicadas en ambientes marinos presentando las ventajas desventajas, así como sus limitantes.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Métodos no destructivos convencionales

La evaluación no destructiva es conocida como prueba no destructiva, inspección no destructiva y examinación no destructiva (NDT, NDI y NDE por sus siglas en ingles). La actividad asociada con la evaluación incluye pruebas e inspección y primordialmente involucra medir algunas características del material (perfiles de dureza, esfuerzos residuales, precipitados, entre otros). Frecuentemente esto es requerido para determinar algunas características de la unión o para determinar si este contiene discontinuidades o defectos. Resultando en una herramienta poderosa que ayuda a garantizar la seguridad, la calidad y la confiabilidad; incrementando la productividad, disminuyendo el riesgo al medio ambiente y ahorrando dinero (Trimm, 2003). Entre las técnicas no destructivas más empleadas reportadas en la literatura se encuentran la inspección visual, partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido; a continuación se da una pequeña descripción.

2.1.1 Inspección visual

La inspección visual es el método más extensamente usado y frecuentemente no requiere equipo especial (AWS B1.10, 2009).

La inspección visual es el primer paso de cualquier evaluación, con lo cual se puede determinar:

- Cantidad y tamaño de imperfecciones.
- Forma o configuración.
- ✤ Acabado superficial.
- Reflectividad (reflexión).
- Características de color.
- Ajuste de parámetros.
- Características funcionales.
- Presencia de discontinuidades superficiales (Raj, 2002).

2.1.1.1 Condiciones de inspección

Existen varios factores que pueden interferir en el desempeño de este método no destructivo, algunos de ellos se describen a continuación:

- Limpieza: Es un requisito básico para una buena inspección visual; es imposible obtener datos visuales a través de capas de suciedad; además, al obstruir la visión, la suciedad puede enmascarar discontinuidades presentes. La limpieza típicamente puede hacerse utilizando medios mecánicos o químicos.
- Cambios de color: La evaluación del color y cambios de color es uno de los principios básicos de la mayoría de las inspecciones visuales. La corrosión u oxidación de metales o el deterioro de materiales orgánicos está frecuentemente acompañado por un cambio en el color, que puede ser perceptible para el ojo.
- Brillo: El brillo excesivo causa una sensación no placentera llamada resplandor, el cual reduce la visibilidad, interfiriendo con la habilidad de la visión clara, la observación crítica y el buen juicio. El resplandor puede

ser minimizado disminuyendo la cantidad de luz que llegue al ojo o puede evitarse utilizando luz o dispositivos polarizados.

- Superficie: La herrumbre, procedimientos como el pulido, fresado, ataque químico, la limpieza con arena, granalla, entre otros, son condiciones de una superficie que afectan la habilidad de verla adecuadamente.
- Forma o configuración de los objetos: Diferentes ángulos de la superficie de un objeto, causan que sean reflejadas diferentes cantidades de luz hacia el ojo. La forma del objeto y su superficie determinan el ángulo en el que debe realizarse la inspección.
- Tamaño del objeto inspeccionado: Si el objeto es más grande que el haz de luz, será necesario iluminar en pasos múltiples.
- Temperatura: El calor excesivo obstruye la vista, esto se debe a la distorsión de la imagen por la onda de calor.
- Textura y reflexión: La iluminación tiene como función importante acentuar un área de interés, pero no debe permitirse que exista resplandor, porque puede enmascarar la superficie inspeccionada. Una superficie altamente reflectora o una superficie con textura rugosa pueden requerir iluminación especial para no enmascarar las posibles discontinuidades.
- Factores ambientales: Las reflexiones y sombras de paredes, techo, muebles y equipo deben considerarse durante la inspección visual para tener una iluminación adecuada.

Ciertos factores psicológicos también afectan el desempeño visual del inspector, se ha demostrado que los colores de las paredes y el diseño tienen un efecto en la actitud, lo que es importante cuando se inspeccionan componentes críticos o pequeños.

- Factores fisiológicos: Ver es un proceso activo en el cual el observador mantiene seguimiento de las acciones, por lo que las cosas percibidas pueden ser alteradas por las acciones o condición física del observador; por lo que la fatiga reduce la eficiencia del observador para realizar una interpretación exacta del estado visual.
- Efectos de la salud del observador: El deterioro de la visión es progresivo, afectando el desempeño de la inspección por lo que se deben

realizar revisiones periódicas para detectar a tiempo este tipo de problemas (LLOG, Tutorial Inspección Visual).

2.1.1.2 Métodos de inspección

Examen Visual Directo

La inspección visual directa usualmente puede hacerse cuando el acceso es suficiente para colocar el ojo dentro de 24" (600 mm) de distancia de la superficie que será examinada y a un ángulo no menor de 30º, con el fin de obtener un panorama completo de la junta soldada.

Examen Visual Remoto

En algunos casos, el examen visual remoto puede sustituir al examen visual directo, el cual se desarrolla con ayudas visuales como boroscopios, cámaras u otros instrumentos semejantes (LLOG, Tutorial Inspección Visual).

2.1.1.3 Ventajas

Es el método menos costoso y más efectivo de control de calidad que asegura la conformidad con el procedimiento y es capaz de detectar algunos defectos como porosidades, grietas, socavado, entre otros, el examen visual del inspector se puede dividir en tres etapas: antes, durante y después de soldar (Castillo, Inspeccion de Soldaduras, 2001).

2.1.1.4 Limitaciones

- Se requiere de personal altamente calificado para la interpretación de las discontinuidades
- Solamente pueden ser evaluadas las condiciones superficiales.
- El poder de resolución del ojo humano es de 0,2 mm es decir que para ver dos objetos separados, estos deben estar como mínimo a esa distancia.
- Se requiere una fuente efectiva de iluminación.

 Es necesario el acceso a la superficie que requiere ser inspeccionada (AWS, AWS B1.10, 2009) (LLOG, Tutorial Inspección Visual).

2.1.2 Líquidos Penetrantes

La inspección mediante líquidos penetrantes puede ser definida como un método de inspección no destructiva diseñado para detectar y exponer discontinuidades superficiales en diferentes tipos de materiales.

Se utiliza para la inspección de materiales metálicos magnéticos y no magnéticos o materiales no metálicos (AWS B1.10, 2009).

2.1.2.1 Clasificación

Los distintos tipos de reactivos penetrantes se van a clasificar de diferentes maneras de acuerdo al estándar ASTM E-165 por lo cual se mencionan las clasificaciones más típicas:

- Tipo: El reactivo penetrante deberá ser visible después de haber entrado y salido de una discontinuidad. El método más fácil para cumplir con este requisito básico es agregando un tinte al reactivo penetrante, para proporcionar un color que contraste con el fondo, clasificándolos como sigue:
 - Reactivos penetrantes con tinte visible: El rojo proporciona un color altamente contrastante con muchos otros colores típicos de partes metálicas. Los tintes rojos son obtenidos fácilmente en muchos matices, son económicos y fáciles de mezclar. La principal ventaja de utilizar un reactivo penetrante con tinte visible es que puede ser usado con iluminación ordinaria y que puede ser aplicado con un juego pequeño portátil de inspección.
 - Reactivos penetrante con tinte fluorescente: Presenta mayor cantidad de aplicaciones y son más sensibles debido a que pueden proporcionar una indicación con un menor volumen de reactivo. La calidad de los tintes fluorescentes está determinada por su eficiencia para absorber luz ultravioleta y convertirla en luz visible.

- Técnica de remoción: Los métodos de inspección por penetrantes pueden ser clasificados por el procedimiento particular usado para remover el exceso de penetrante en la superficie de la pieza inspeccionada según la ASTM E-165, se clasifican en:
 - Reactivo penetrante tipo lavable con agua o auto-emulsificable: La sustancia es soluble en agua, por lo que el exceso es eliminado por este mismo medio.
 - Reactivo penetrante tipo post-emulsificable: El emulsificante hace al reactivo soluble en agua, de tal forma que el exceso sea removido con este mismo medio y que solo permanezca el penetrante necesario atrapado en las discontinuidades.
 - Penetrante tipo removible con solvente: Este tiene una base de aceite, por lo que no es soluble en agua. Normalmente se usa el mismo solvente en la limpieza previa y en la remoción del exceso.
- Sensibilidad: De acuerdo a la sensibilidad del reactivo penetrante se van a dividir en los siguientes grupos:
 - > Grupo I: Penetrante con tinte visible removible con solvente.
 - > Grupo II: Penetrante con tinte visible post-emulsificable.
 - > Grupo III: Penetrante con tinte visible lavable con agua.
 - Grupo IV: Penetrante con tinte fluorescente lavable con agua (Baja sensibilidad).
 - Grupo V: Penetrante con tinte fluorescente post-emulsificable (Media sensibilidad).
 - Grupo VI: Penetrante con tinte fluorescente post-emulsificable (Alta sensibilidad).
 - Grupo VII: Juego de penetrante con tinte fluorescente removible con solvente (consiste de penetrante del Grupo VI, solvente y un revelador húmedo en suspensión no acuosa).

La aplicación del tipo de reactivo depende prácticamente de los siguientes factores:

> Condición superficial del objeto a inspeccionar.

- > Características de las discontinuidades del material.
- > Tiempo y lugar de la inspección.
- > Tamaño de las piezas a inspeccionar (Castillo, 2002).

2.1.2.2 Mecanismo de Penetración

La capilaridad de los líquidos es una propiedad que depende de la condición superficial, tipo de penetrante, temperatura y presencia o ausencia de contaminación (LLOG, Tutorial Inspección Líquidos Penetrantes), ya que la capilaridad es la propiedad física en la que se basa la prueba de líquidos penetrantes y se va a definir como la fuerza que tienen los líquidos para ascender y/o descender a través de dos paredes muy juntas. (AWS A-3.0, 2001) (Figura 2.1).



Figura 2.1 Esquema del proceso de capilaridad (Castillo, 2002)

Las fuerzas que se generan por la atracción capilar son básicamente las que producen la entrada de un penetrante en una grieta; estas fuerzas hacen que un líquido suba por un tubo de diámetro pequeño. La presión capilar determinada está en función de la tensión superficial y también de su propiedad de mojabilidad. La altura a la que sube el líquido depende del diámetro del tubo, es decir, a menor diámetro mayor será la altura.

La habilidad del reactivo penetrante para formar una indicación lo bastante grande para ser visualmente detectada es conocida como "eficiencia de atrapamiento de la falla". El tamaño de una indicación está basado en el volumen de penetrante que entra en la discontinuidad. Entre más grande sea la discontinuidad, más penetrante entrará y más será extraído por el revelador para formar una indicación (LLOG, Tutorial Inspección Líquidos Penetrantes).

2.1.2.3 Propiedades Físicas

La Capacidad de penetración de un líquido es función de las propiedades del líquido, este se mencionan a continuación.

- Viscosidad: Propiedad de los líquidos de oponerse al flujo, debido a la fricción molecular o interna que depende de la temperatura y de la composición de la mezcla. La viscosidad determina la velocidad de penetración.
- Adhesión: Es la fuerza de atracción entre moléculas de sustancias diferentes.
- Cohesión: Es la fuerza que mantiene a las moléculas de un líquido a distancias cercanas unas de otras.
- Humectabilidad: Es la propiedad de los líquidos de "mojar" la superficie de un sólido. Afecta las características de penetrabilidad y sangrado del penetrante. Es controlada por el ángulo de contacto y la tensión superficial.
- Ángulo de contacto: Es la interface líquido-sólido, que considera que cualquier combinación penetrante-material que produzca un ángulo de contacto de 5° o menor producirá resultados satisfactorios durante una inspección (LLOG, Tutorial Inspección Líquidos Penetrantes). Ver Figura 2.2



Figura 2.2 Ángulo de contacto (Castillo, 2002)

2.1.2.4 Aplicación y tiempo de penetración

Después de que la pieza ha sido limpiada, secada y se encuentra dentro del rango de temperatura de 10 y 38ºC (ASTM E-165, 2002), el reactivo penetrante es aplicado sobre la superficie a inspeccionar.

El reactivo penetrante puede ser aplicado de varias formas; por inmersión, aerosol, brocha y vaciado. El método de aplicación depende de factores como; tamaño, forma y configuración de la pieza que se ha de inspeccionar.

El tiempo de penetración corresponde al tiempo transcurrido desde la aplicación del penetrante hasta su remoción. El objetivo es que la sustancia llene las posibles discontinuidades en la superficie inspeccionada. La Tabla 2.1 muestra los tiempos típicos de penetración (LLOG, Tutorial Inspección Líquidos Penetrantes).

2.1.2.5 Remoción del exceso de penetrante

La remoción del exceso de penetrante es un paso crítico en el proceso de inspección, una remoción errónea puede producir malas interpretaciones o resultados incorrectos. Idealmente, todo el reactivo penetrante de la superficie deberá ser removido sin que la remoción sea excesiva como para reducir o eliminar totalmente el reactivo atrapado en las discontinuidades. Así también, una remoción incompleta puede producir un contraste residual que puede interferir con una adecuada interpretación de las indicaciones.

Con un buen retiro del exceso de la sustancia, las indicaciones aparecerán claramente con un color intenso o un contraste brillante y pueden ser fácilmente vistas.

El secado después de la remoción del exceso de penetrante depende del método de remoción y del revelador que será usado. Con solvente se realiza solamente con aire o por evaporación normal, en cambio después de la remoción con agua se requiere calentar para evaporar el agua existente (García, 2005).

Material	Forma	Tipo de discontinuidad	Tien Lavable con agua	npo de penetración (minutos) Postemulsificable Removible con solvente	
Acero	Fundiciones Extrusiones y forjas Soldaduras	Porosidad Traslapes en frío Traslapes Falta de fusión Porosidad	30 30 NR 60	10 10 10 20 20	5 7 7 7
	Todas Todas	Fracturas Fracturas x fatiga	30 NR	20 30	7 10
Aluminio	Fundiciones Extrusiones y forjas Soldaduras	Porosidad Traslapes en frío Traslapes Falta de fusión Porosidad	5 a 10 5 a 10 NR 30 30	5 5 10 5	3 3 7 3 3
	Todas	Fracturas Fracturas x fatiga	NR	30	5
Magnesio	Fundiciones Extrusiones y forjas	Porosidad Traslapes en frío Traslapes	15 15 NR	5 5 10	3 3 7
	Soldaduras Todas Todas	Falta de tusion Porosidad Fracturas Fracturas x fatiga	30 30 30 NR	10 10 10 30	5 5 5 10
Latón, Bronce y	Fundiciones Extrusiones y forjas	Porosidad Traslapes en frío Traslapes	10 10 NR	5 5 10	3 3 7
Plásticos	Soldaduras Todas Todas	Falta de fusión Porosidad Fracturas Fracturas x fatiga	15 15 30 5 a 30	10 10 10 5	3 3 3 5
Cristales	Todas	Fracturas	5 a 30	5	5
Htas. de Carburo	Soldadura	Falta de fusión Porosidad Fracturas	30 30 30	5 5 20	3 3 5
Titanio	Todas		NR	20 a 30	15
Todos los Metales	Todas	Esfuerzos o corrosión íntergranular	NR	240	240

Tabla 2.1 Tiempo de penetración (Castillo, 2002)

NR= No recomendable

2.1.2.6 Aplicación del revelador

La cantidad de penetrante que emerge desde las pequeñas discontinuidades es casi invisible, por lo tanto, es necesario realizar otra operación antes de poder observar las indicaciones presentes. Los reveladores actúan aumentando la visibilidad de las indicaciones (García, 2005).

El propósito principal de un revelador es formar una indicación que pueda ser detectada a simple vista, para lo cual realiza cuatro funciones básicas:

- Extraer una cantidad suficiente de penetrante de la discontinuidad para formar una indicación.
- Expandir el ancho de la indicación lo suficiente para hacerla visible.
- Incrementar la brillantez del tinte fluorescente.
- Incrementar el espesor de la indicación.

* Tiempo de revelado

El revelador debe permanecer sobre la superficie de la pieza inspeccionada durante un periodo de tiempo no menor a 10 minutos antes de realizar la inspección, a este periodo se le conoce como tiempo de revelado (ASTM E-165, 2002). Para usar el tiempo necesario para el revelado de las indicaciones, deben controlarse las siguientes variables:

- Tipo penetrante.
- Sensibilidad de la técnica.
- Temperatura de la pieza.
- El tiempo de penetración.
- Las condiciones de la inspección (LLOG, Tutorial Inspección Líquidos Penetrantes).

Características

Al seleccionar un revelador, este deberá cumplir con algunas propiedades o características, a continuación se mencionan las más importantes:

- Absorbente.
- Grano fino y la forma de su partícula deberá producir indicaciones bien definidas.
- Producir un buen contraste.
- Fácil de aplicar.
- Fácil de remover.
- No contener elementos que afecten las características de las piezas inspeccionadas.
- No contener elementos que afecten al operador (LLOG, Tutorial Inspección Líquidos Penetrantes).

Selección

Se debe utilizar el revelador adecuado dependiendo el tipo de trabajo. Las siguientes son reglas generales con respecto al uso de los reveladores:

- Es preferible usar reveladores húmedos (Magnaflux SKD-S2) a usar revelador seco en superficies tersas o pulidas.
- Es preferible usar revelador seco (Cantesco) a usar reveladores húmedos en superficies muy rugosas.
- Reveladores húmedos son más adecuados para la inspección de altas cantidades de piezas pequeñas en serie, por la facilidad y velocidad de aplicación.
- Reveladores húmedos no pueden usarse con confianza donde pueda acumularse, como por ejemplo en filetes agudos, porque puede enmascarar indicaciones de discontinuidades.
- Reveladores húmedos no acuosos son los más efectivos para revelar grietas finas y profundas, pero no son adecuados para revelar discontinuidades anchas y poco profundas (LLOG, Tutorial Inspección Líquidos Penetrantes).

2.1.2.7 Inspección

La inspección es una parte crítica del proceso de líquidos penetrantes, pero no puede ser considerada como la más importante del proceso, porque si el proceso se aplica de forma inadecuada no se producirán indicaciones que sean observadas a un nivel de sensibilidad adecuado (García, 2005).

Las indicaciones de líquidos penetrantes visibles pueden ser inspeccionadas mediante luz natural o artificial, con una iluminación mínima de 1000 lux, sin embargo para la inspección de líquidos penetrantes fluorescentes se debe de utilizar luz negra en la cual se requiere una intensidad mínima de 1000 μ W/cm² y la luz visible del lugar de inspección no debe superar los 20 lux (ASTM E-165, 2002).

Interpretación y evaluación de las indicaciones

Interpretar es la acción de decidir si las indicaciones obtenidas son falsas, no relevantes o relevantes. Una indicación es la respuesta que se obtiene al

aplicar alguna prueba no destructiva, que requiere ser interpretada para determinar su significado, existen tres tipos de indicaciones (ASTM E-1316, 2006):

- Indicaciones falsas: Se presentan debido a una aplicación incorrecta de la prueba. La causa más común por la que se producen estas indicaciones es por una remoción deficiente del penetrante.
- Indicaciones no relevantes: Son producidas por la construcción o configuración del material y por el acabado superficial.
- Indicaciones relevantes (verdaderas): Son aquellas que se producen por una discontinuidad. Para determinar si una indicación es verdadera se requiere de un conocimiento previo del proceso empleado.

La evaluación se realiza basándose en un criterio de aceptación y rechazo, el cual, normalmente forma parte de los documentos que rigen y son aplicables al componente que está siendo inspeccionado. Este criterio de aceptación y rechazo considera el efecto que la discontinuidad tendrá en el servicio o funcionamiento del componente. Si una indicación es rechazada, entonces pasa a ser considerada como defecto, lo cual se define como, discontinuidad cuya dimensión, forma, orientación o localización excede los criterios de aceptación establecidos. No todas las discontinuidades son necesariamente defectos porque pueden no afectar el funcionamiento de la pieza en la cual se encuentran (LLOG, Tutorial Inspección Líquidos Penetrantes).

2.1.2.8 Limpieza

Es preferible que el revelador sea removido tan pronto como sea posible después de la inspección, esto se debe a que algunos tipos de reveladores son más difíciles de remover conforme pasa el tiempo (García, 2005)

2.1.2.9 Ventajas

• Método económico y rápido.

- Procedimiento sencillo.
- Pocas indicaciones falsas o no relevantes en superficies limpias (Trimm, 2003).

2.1.2.10 Limitaciones

- Las discontinuidades deben estar limpias y abiertas a la superficie.
- Algunas sustancias en los penetrantes son nocivos en el material.
- Difícil de remover en las discontinuidades (Trimm, 2003)

2.1.3 Partículas magnéticas

Con este método se pueden descubrir discontinuidades superficiales y por debajo de la superficie, pero no profundas. No hay restricción con respecto a la forma de la pieza y su tamaño, sin embargo solo se pueden analizar materiales ferromagnéticos (ASM, 2001).

2.1.3.1 Principio básico

El método de partículas magnéticas está basado en el principio de campo de las líneas magnéticas que se presentan en un material ferromagnético, que serán distorsionadas al haber un cambio en la continuidad del material, como un cambio fuerte en la geometría o una discontinuidad. Si la discontinuidad es abierta o cerrada a la superficie de un material magnetizado, las líneas de flujo serán distorsionadas en la superficie en una condición llamada fuga de flujo. Cuando finas partículas magnéticas son distribuidas sobre el área de la discontinuidad mientras la fuga de flujo existe se acumularan las partículas en el lugar siendo visibles bajo las condiciones apropiadas de luz (ASTM E-709, 2001), esto consta de tres operaciones básicas:

- Establecer un flujo magnético adecuado.
- Aplicación de las partículas magnéticas.
- Interpretación y evaluación de los resultados.

Un imán tiene la capacidad de atraer materiales ferromagnéticos. Esta capacidad de atraer o repeler no es uniforme sobre toda la superficie del imán, esto se localiza únicamente en las áreas conocidas como "polos. El flujo magnético, o las líneas de fuerza, entran o abandonan el imán por los polos magnéticos por lo que, un imán podrá atraer materiales ferromagnéticos, solamente en estas áreas (ASM, 2001).

Entonces, las leyes del magnetismo de atracción y repulsión para imanes (figura 2.3) son las siguientes:

- Polos magnéticos diferentes se atraen.
- Polos magnéticos semejantes se repelen.



Figura 2.3 Leyes de magnetismo (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas)

Al tener un imán con una grieta en la superficie externa, esto inducirá inmediatamente un polo norte y un polo sur en los bordes de la discontinuidad. Esta grieta interrumpe el flujo uniforme de las líneas de fuerza dentro del imán, por lo que algunas de ellas se verán forzadas a salir del imán dando como resultado "fugas de flujo" y el campo magnético creado por las fugas de flujo es llamado "campo de fuga". Por lo tanto, al esparcir las partículas magnéticas sobre el imán, éstas serán atraídas por los polos creados por la grieta, produciendo una indicación, por la concentración de partículas en la zona de la grieta, ver Figura 2.4



Figura 2.4 Principio de prueba de partículas magnéticas (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas)

La distorsión o fuerza de un campo de fuga, producido por una discontinuidad, depende de varios factores:

- El número de las líneas de fuerza; éste factor es afectado a su vez por varias características de la propia discontinuidad:
 - > Ancho de la discontinuidad (la distancia entre sus polos).
 - Longitud de la discontinuidad.
 - Profundidad de la discontinuidad.
 - Forma de la discontinuidad.
 - Orientación de la discontinuidad. La discontinuidad debe estar orientada a 90°, y hasta 45°, con respecto a la dirección del flujo magnético, para poder ser detectada.
- ✤ La condición de la superficie.
- La fuerza del flujo magnético generado, el cual es controlado por el amperaje utilizado para inducir el campo magnético y este determina directamente el número de partículas magnéticas que pueden ser atraídas para formar una indicación (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas).

2.1.3.2 Formación de indicaciones

Cuando las partículas magnéticas son atraídas al sitio donde se localiza una fuga de flujo, producen una indicación que es visible para el ojo humano, bajo condiciones de iluminación adecuada, la cual puede ser inspeccionada, interpretada y evaluada (ASTM, 2001). La formación de las indicaciones depende de las características de las líneas de fuerza.

2.1.3.3 Inducción de campo magnético

Los yugos son equipos portátiles en forma de "C" (Figura 2.5), los cuales, inducen un campo magnético longitudinal entre sus polos (piernas), y son usados para magnetización local.

El campo magnético es generado en un sistema de bobina, localizada dentro del yugo, y transmitido a la pieza a través de sus polos. En la magnetización con yugo no existe el riesgo de producir quemadas por arco, gracias a que se transmite a la pieza solamente el campo magnético y la corriente no entra a la pieza (ASM, 2001).



Figura 2.5 Magnetización con yugo (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas)

Existen yugos electromagnéticos que operan con corriente alterna solamente y otros que operan con corriente alterna y rectificada de media onda. Pueden contar con piernas fijas o articuladas, las cuales permiten ajustar el contacto en superficies irregulares o en superficies unidas en ángulo. La magnetización con yugo es más efectiva cuando las piernas se encuentran separadas entre 7.6 y 20 cm (3 a 8 in) (ASM, 2001).

2.1.3.4 Tipo de corriente de magnetización

Los cuatro tipos básicos de corrientes usados en la examinación de partículas magnéticas para establecer la parte magnetizada son los siguientes (ASTM E-709, 2001):

Corriente alterna

Es utilizada para casi todos los servicios. Su rango de voltaje comercialmente disponible es de 110 a 440 v. Los circuitos eléctricos para producir corriente alterna (CA) son simples y relativamente baratos, porque solo se requiere transformar el suministro comercial en voltajes bajos y corrientes de magnetización con altos amperajes (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas)

La corriente alterna tiene poca capacidad de penetración, por lo que, el campo magnético inducido por la CA se concentra cerca de la superficie de la pieza que está siendo magnetizada, a esto se le conoce como efecto de piel (ASTM E-709, 2001)

Por tal razón, la CA es considerada como la mejor para detectar discontinuidades superficiales, además que la CA cambia continuamente de dirección, a razón de 60 ciclos por segundo (Figura 2.6), este cambio de dirección constante del campo magnético tiene la tendencia de agitar o proporcionarles movilidad a las partículas magnéticas, provocando que las partículas sean atraídas más fácilmente a los campos producidos por las fugas de flujo (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas).



Figura 2.6 Esquema de corriente alterna (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas)

Corriente directa rectificada de media onda

Este tipo de corriente es frecuentemente usada en conjunto con partículas secas y con magnetización localizada para lograr la misma profundidad de penetración para la detección de las típicas discontinuidades encontradas (ASTM E-709, 2001)

Cuando se rectifica una fase de CA, la corriente resultante es conocida como corriente directa rectificada en media onda (Por sus siglas en ingles CDRMO). Esto significa simplemente que la polaridad inversa o porción negativa de la curva sinusoidal de CA es eliminada, como se muestra en la Figura 2.7



Figura 2.7 Esquema de corriente directa rectificada (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas)

La CDRMO consiste de pulsos individuales de corriente alterna, con intervalos de tiempo en los que no fluye corriente, cada pulso dura medio ciclo, lo que resulta en una corriente que fluye en una sola dirección. Tiene un valor de densidad de flujo de cero en el centro de la pieza inspeccionada, y se incrementa hasta que alcanza un valor máximo en la superficie, por lo que, la densidad de flujo en el interior de una pieza es mucho mayor empleándose en los ensayos para detectar discontinuidades bajo la superficie, aunque se podrá detectar también discontinuidades superficiales, pero no son tan eficaces como la CA para éste último caso (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas).

Corriente alterna de onda completa rectificada

Utiliza una o tres fases que tiene la ventaja de producir un bajo amperaje de línea, mientras que el equipo de fase simple es más barato. Esta técnica es usualmente utilizada cuando el método residual va a ser utilizado (ASTM E-709, 2001)

Corriente directa

La corriente directa (CD) es un flujo continuo de corriente en una sola dirección (Figura 2.8). Una fuente común de CD es la batería o la pila normal. Su principal desventaja es debido a que las altas corrientes sólo

pueden ser mantenidas mientras la carga de la batería o pila es adecuada y, muchas veces, es necesario contar con el flujo de corriente durante intervalos de tiempo prolongados (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas).

2.1.3.5 Densidad de flujo

Para producir una buena indicación, la fuerza del campo magnético generado debe ser adecuada y su dirección favorable, además, para que estas sean consistentes, la fuerza del campo debe ser controlada dentro de límites razonables.

Los factores que afectan la densidad de flujo magnético generado son el tamaño, forma, espesor, tipo de material y técnica de magnetización. Para lo cual existen varios tipos de medidores e indicadores que son herramientas utilizadas para determinar en forma cuantitativa y cualitativa la densidad del flujo magnético (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas).



Figura 2.8 Esquema de corriente directa (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas)

2.1.3.6 Características

Las partículas magnéticas son fabricadas de materiales ferromagnéticos, con propiedades físicas y magnéticas que afectan su funcionalidad como medio para formar indicaciones las cuales se mencionan a continuación (ASM, 2001).

Propiedades físicas

Las propiedades físicas principales de las partículas magnéticas son el tamaño, forma, densidad y color.

- Tamaño: Estas partículas son mucho más pequeñas donde el rango de dimensiones es de entre 0.125 a 60 micras. Las partículas muy finas no tienden a moverse como unidades separadas, se aglomeran para formar grandes acumulaciones.
- Forma: Las partículas magnéticas son una mezcla de formas esféricas y alargadas, unas proporcionan movilidad adecuada y otras polarizaciones magnéticas, juntas se enlazan para formar cadenas o puentes pequeños para los campos de fuga, con lo que se forman las indicaciones visibles.
- Densidad: Es una propiedad que afecta la movilidad de las partículas. Por ejemplo, los polvos de tipo metálico y óxido son más densos que el agua, por lo que las partículas húmedas, preparadas en agua o aceite, tienden a asentarse cuando no son agitadas.
- Color: Las partículas son coloreadas para proporcionar un color contrastante con la superficie de la pieza inspeccionada.

Propiedades magnéticas

Las partículas magnéticas deben ser muy sensibles al magnetismo, por lo que deben tener características magnéticas similares a los materiales ferromagnéticos (ASM, 2001), las cuales son:

- Alta permeabilidad magnética: Esto permite que las partículas puedan ser rápidamente magnetizadas, para que sean fácilmente atraídas y retenidas por campos de fuga débiles.
- > Baja retentividad magnética: Esto significa que no retendrán prácticamente ningún magnetismo residual, lo que permite que sean fácilmente removidas.

2.1.3.7 Clasificación de las partículas magnéticas

Las partículas magnéticas pueden ser clasificadas por:

- Medio de transportación para su aplicación
- a) Partículas secas: Las partículas empleadas en forma de polvo dependen de que el aire las lleve a la superficie de la pieza, por lo que se pueden utilizar pistolas, bulbos o aplicadores en forma de pera o tipo salero. El método para aplicar las partículas secas se lleva acabo esparciéndolas sobre el área a inspeccionar, proporcionando de esta forma un alto grado de movilidad. Como las partículas flotan hacia abajo, por encima de la pieza que está siendo magnetizada, tienen libertad para moverse en cualquier dirección, por lo que pueden ser atraídas por campos de fuga débiles (ASM, 2001).

Ofrece las siguientes ventajas; esta técnica es superior a la de partículas húmedas por la detección de discontinuidades cercanas a la superficie, para objetos largos cuando se usa equipo de magnetización portable, la movilidad es mayor para la detección de fallas relativamente profundas usando como fuente de magnetización CDRMO. En cuanto a las desventajas no pueden ser usadas en áreas confinadas sin la ayuda de equipo de seguridad, la probabilidad de detección es menor para discontinuidades muy finas en la superficie, puede ser muy dificultoso para usarse sobrecabeza, es probable que tenga menores velocidades de producción en comparación con las húmedas (ASTM E-709, 2001).

b) Partículas húmedas: Este tipo de partículas son designadas para ser usadas suspendidas en un vehículo tal como agua o petróleo ligero destilado para obtener la concentración de la aplicación para la superficie de prueba (ASTM E-709, 2001).

La presentación de estas partículas puede ser en forma de pastas, polvo y concentrados.

Pastas: Deben ser disueltas en aceite para conseguir el tamaño de partícula y la consistencia adecuada. La pasta es difícil de deshacer y no se puede evitar que se formen terrones que puedan mezclarse con la suspensión. Actualmente, casi ya no se suministran las partículas en forma de pastas.

Polvo: Las partículas en polvo tienen la necesidad de mezclarse con agentes que faciliten su dispersión, agentes humectantes, agentes inhibidores de corrosión. Este tipo de partículas pueden ser vertidas mezcladas previamente (ASM, 2001).

Al aplicar este método obtenemos partículas suspendidas en un medio destilado de petróleo sin el uso de un acondicionador y este vehículo provee una medida de protección de corrosión para las partes y el equipo usado. Sin embargo, los principales inconvenientes de este método son la flamabilidad y disponibilidad (ASTM E-709, 2001).

- Tipos de partículas
- a) Partículas visibles, no-fluorescentes, contrastantes o coloreadas

Las indicaciones de partículas visibles son examinadas con luz blanca, que pueden ser natural o artificial. Con partículas visibles la selección del color de la partícula a utilizar depende únicamente del cuál proporcione el mayor contraste con el color de la superficie de la pieza inspeccionada (ASM, 2001).

b) Partículas fluorescentes

En partículas magnéticas, la fluorescencia es la propiedad que tienen ciertas sustancias para emitir luz blanca, dentro del rango de luz visible, cuando son iluminadas o expuestas a la luz ultravioleta (ASTM E-1316, 2006).

Normalmente este tipo de partículas tienen una coloración verdeamarilla, la cual tiene la particularidad de ser la más fácilmente visible para el ojo humano, por encontrarse al centro del espectro visible. Con excepción de algunas aplicaciones, las partículas fluorescentes son usadas en el método húmedo. Con ello, la inspección con partículas fluorescentes es rápida, confiable y más sensible para discontinuidades muy finas en la mayoría de aplicaciones (ASM, 2001).

2.1.3.8 Condición de la superficie

Sin tener en cuenta las partículas que se van a utilizar, bien sean húmedas o secas, es primordial que las piezas examinadas estén bien limpias y libres de grasa, aceite, polvo, entre otros, ya que si no se cuenta con esto puede disminuirse la movilidad de las partículas y provocar que no sean atraídas hacia los campos de fuga (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas).

2.1.3.9 Ventajas

- Inspección relativamente rápida y de bajo costo.
- Equipo relativamente simple, provisto de controles utilizados para ajustar la corriente y un amperímetro visible para verificar la fuerza de magnetización que ha sido creada para la inspección.
- Equipo portátil y adaptable a muestras pequeñas o grandes.
- Se requiere menor limpieza que en líquidos penetrantes.
- Se pueden detectar discontinuidades con una profundidad cercana a la superficie.
- ✤ Las indicaciones se forman directamente en la superficie de la muestra.
- No se requiere de lecturas electrónicas de calibración o mantenimiento excesivo.
- Se obtienen mejores resultados en la detección de discontinuidades llenas de algún contaminante (escoria) y que no pueden ser detectadas en una inspección por líquidos penetrantes (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas) (Trimm, 2003)

2.1.3.10 Limitaciones

- Aplicable solamente en materiales ferromagnéticos.
- Requiere un suministro de corriente eléctrica.
- No se pueden detectar discontinuidades localizadas a grandes profundidades.
- Aplicación en el campo es de mayor costo, ya que se necesita suministro de energía eléctrica.
- Rugosidad superficial puede distorsionar el campo.
- Se requiere realizar dos o más magnetizaciones.
- Generalmente, es necesario desmagnetizar después de la inspección.
- Aunque las indicaciones son fácilmente observables, la experiencia para su interpretación y evaluación es necesaria.
- Capas de pintura o de algún otro recubrimiento no magnético afectan la sensibilidad del método (LLOG, Tutorial Partículas Magnéticas) (Trimm, 2003)

2.1.4 Radiografía

Este ensayo, se basa en la capacidad de penetración que caracteriza principalmente a los Rayos X y Gamma (Trimm, 2003). Comúnmente, una forma de determinar la radiación que pasa a través de un material, consiste en colocar una película radiográfica, cuya función es cambiar de tonalidad en el área que recibe radiación (Castillo, 2004). Este mecanismo se puede observar más fácilmente en la Figura 2.9



Figura 2.9 Esquema básico de método radiográfico (pndmx.comze.com)

Exposición

Se requiere una fuente de energía capaz de atravesar el material y el espesor que se quiere inspeccionar (Co-60 ó Ir-192). La radiación penetra en el material y se atenúa dependiendo del espesor atravesado, de tal manera que cuando hay una discontinuidad o una disminución en el espesor la radiación pasa con mayor intensidad en esos puntos, y esta información es capturada en una película sensible a la radiación. Entre más radiación recibe un área de la película más obscura resulta en la radiografía (Castillo, 2004).

Procesamiento de la película

La película que fue expuesta se somete a un proceso de revelado en el que se utiliza un químico revelador y un químico fijador de imagen, todo esto se realiza en un cuarto obscuro con una luz de trabajo llamada luz de seguridad, que es la mínima luz suficiente para trabajar sin afecta la película radiográfica.

Visión radiográfica

La película es examinada para realizar las siguientes actividades:

- Interpretación, para reconocer todas las imágenes que aparecen en la radiografía y determinar si son relevantes y no relevantes.
- Evaluación, en donde se va a determinar la aceptación o rechazo de la pieza de prueba en base a un estándar (ASTM E-1316, 2006)

2.1.4.1 Aplicaciones

La radiografía es aplicable a una gran variedad de materiales metálicos y no metálicos en gran variedad de configuraciones (Castillo, 2004).

2.1.4.2 Rayos X y Gamma

Los Rayos X y Gamma son ondas electromagnéticas que presentan las siguientes propiedades:

- Se propagan en línea recta a la velocidad de la luz.
- Penetran en el material.
- Son absorbidos por la materia y pueden ser dispersados por la materia.

- Ionizan la materia.
- Afectan las emulsiones fotográficas.
- Provocan fluorescencia en ciertos elementos químicos.
- No son afectados por los campos eléctricos o magnéticos.

La única diferencia que existe entre estos dos tipos de radiaciones es que los Rayos X se producen fuera del núcleo del átomo, y los Rayos Gamma se producen en el núcleo del átomo por la desintegración espontánea de los radioisótopos. Las fuentes radioactivas isotópicas más comúnmente utilizadas para la generación de este tipo de rayos son Iridio-192 y Cobalto-60 (Castillo, 2004).

2.1.4.3 Equipo

Un equipo básico para el desarrollo de este tipo de inspecciones consta de los siguientes elementos:

Contenedor (Figura 2.10), el cual es una caja comúnmente de acero inoxidable con un escudo de uranio agotado (U238) y un tubo de curvas a través del uranio que permite el paso, almacenamiento y blindaje de la fuente radioactiva.



Figura 2.10 Esquema del contendor de fuente radioactiva (Castillo, 2004)

Fuente de Ir-192 ó Co-60 el cual se encuentra contenido en una cápsula cerrada de acero inoxidable unida a un cable, al otro extremo se encuentra el conector de la fuente que será enganchada con el cable conductor para mover el material radioactivo (Castillo, 2004), como se observa en la Figura 2.11



Figura 2.11 Esquema de ensamble de fuente radioactiva (Castillo, 2004)

Unidad de control

Son dos tubos conductores que están conectados al maneral y que llevan en el interior el cable conductor que pasa por el maneral formando una "U" (Figura 2.12). Se utiliza para manipular la fuente a distancia, empujando la fuente por dentro de un tubo guía hasta llegar a la punta de la exposición, para después retraerla al contenedor en la posición de máximo blindaje (Castillo, 2004).



Figura 2.12 Esquema de unidad de control de la fuente radiográfica (Castillo, 2004)

2.1.4.4 Ventajas

- No representa una limitante la composición o microestructura del material para el ensayo.
- Detecta defectos superficiales e internos.

- ✤ La imagen radiográfica facilita las características de la discontinuidad.
- Proporciona un registro permanente (Trimm, 2003).

2.1.4.5 Limitaciones

- Peligro a la exposición a la radiación.
- Ensayo costoso.
- Se requiere personal altamente calificado.
- Se requiere acceso a ambos lados de la soldadura (Trimm, 2003).

2.1.5 Ultrasonido

Se considera ultrasonido aquellas oscilaciones de presión que poseen frecuencias por encima de la gama perceptible (esto es, superior a 20,000 Hz) (ASTM E-1316, 2006). Para el ensayo no destructivo de materiales es de particular interés el rango 0,5 a 15 MHz para poder obtener una atenuación adecuada; en algunos casos específicos (por ejemplo el ensayo de concreto) también el rango de 50KHz y frecuencias más altas.

El procedimiento del ensayo consiste en introducir un haz sónico de alta frecuencia en el material a analizar, con el objetivo de detectar discontinuidades internas y superficiales. La onda que recorre el material es reflejada por las interfaces y es detectada y analizada para determinar la presencia y localización de discontinuidades.

Para generar ondas ultrasónicas existen varios métodos, principalmente se utilizan cristales piezoeléctricos o materiales cerámicos ferroeléctricos, por las propiedades que estos materiales presentan.

La piezoelectricidad es una propiedad de algunos cristales como el cuarzo de convertir energía eléctrica en energía mecánica vibratoria y viceversa. Mientras que la ferroelectricidad es una propiedad de algunos materiales cerámicos previamente polarizados, de comportarse como los cristales piezoeléctricos.

De acuerdo a sus propiedades físicas, una onda ultrasónica incidente en una interface parte se refracta, y en parte se refleja si existe una variación en la reflectividad a la onda sonora, como en el caso en que exista un defecto dentro del material. De lo anterior se derivan dos procedimientos de ensayos ultrasónicos, basados respectivamente en la evolución de la parte transmitida de la onda o de la parte reflejada de la misma.

El procedimiento de transmisión evalúa la parte del ultrasonido que ha sido transmitido a través de la pieza que se ensaya. En presencia de un defecto, la intensidad sonora en el receptor disminuye a causa de la reflexión parcial o se hace nula en caso de reflexión total (Hatre, 1994).

2.1.5.1 Tipo de Ondas

- Las ondas ultrasónicas que se propagan a través de un cuerpo elástico (aire, agua, entre otros) pueden ser de la siguientes clases:
 - Ondas longitudinales; producidas por la sucesiva compresión y expansión del medio elástico en el que se propagan.
 - Ondas transversales; producidas por la vibración de las moléculas en sentido transversal a la propagación de la onda.
 - Ondas de superficie o de Raleigh; las cuales son ondas transversales que se propagan solamente en la superficie del cuerpo elástico (Hatre, 1994).

2.1.5.2 Características de las ondas

Las ondas que se transmiten en el interior de un cuerpo elástico, al ser excitado en un extremo por distintos tipos de vibración presentan las siguientes características:

- ✤ La oscilación de las ondas transversales y de superficie es sinusoidal.
- El movimiento requiere un cierto tiempo para ser transmitido.
- Las ondas se atenúan con la distancia recorrida.
- ✤ La atenuación aumenta con la frecuencia.
- ✤ La onda transporta energía y no masa.
- ✤ Las ondas no se transmiten en el vacío (Hatre, 1994).

2.1.5.3 Parámetros

Los parámetros que caracterizan a las ondas acústicas son:

- Frecuencia (f): Numero de oscilaciones por segundo.
- Longitud de onda (λ): Distancia entre dos planos en igual estado, es decir la distancia que recorre la onda en un intervalo de tiempo transcurrido entre dos máximos consecutivos.
- Amplitud (A): Desplazamiento máximo de la partícula vibrante transversal a la dirección de propagación.
- Velocidad acústica (C): Velocidad de propagación de la onda.
- Presión acústica (P): Indica la densidad de la partícula.
- Impedancia acústica (Z): Resistencia que el material opone a la vibración.
- Intensidad acústica (I): Cantidad de energía por unidad de superficie y de tiempo.
- Velocidad máxima de vibración (V): Máxima velocidad de las partículas vibrantes (ASTM E-1316, 2006).

2.1.5.4 Procedimiento

Las ondas ultrasónicas son refractadas y reflejadas, si existe una variación de la reflectancia a la onda sonora, esto en el caso de presentarse algún defecto. De ello se derivan dos procedimientos de ensayo, basados en la evaluación de la parte transmitida de la onda o de la parte reflejada de la misma (Echeverria, 2002).

Transmisión: Este método evalúa la parte del ultrasonido que ha sido transmitida a través de la pieza ensayada. En donde en un extremo de la pieza se coloca un emisor de sonido y al lado contrario un receptor. La señal emitida en caso de presentarse un defecto esta disminuirá su intensidad a causa de la reflexión parcial o se hace nula en caso de reflexión total. En este caso la profundidad de la localización del defecto no se puede determinar mediante este método.

Debido a lo anterior se utilizan dos palpadores ya que existen dos zonas de transición en el recorrido del sonido que influyen sobre la intensidad,

así mismo es necesaria una exacta alineación geométrica entre el emisor y el receptor.

Pulso-Eco: Este método utiliza la porción reflejada del sonido para la evaluación de los defectos. El oscilador piezoeléctrico funciona a la vez como emisor y receptor, ya que la energía recibida es mucho más débil que la emitida, en este caso no se puede operar sobre la base de sonido continuo, por lo cual se emplean exclusivamente pulsos del sonido.

Puesto que se puede medir el tiempo recorrido y se conoce la velocidad del sonido en la mayor parte de los materiales conocidos este método permite establecer la posición del reflector y además presenta la ventaja de utilizar una sola superficie de acoplamiento entre el transductor y la pieza, permitiendo mantener un sencillo acoplamiento constante.

2.1.5.5 Equipo

- Generador de señal eléctrica.
- Transductor que emita un haz de ondas ultrasónicas.
- Transductor para transferir la energía del haz de ondas ultrasónicas a la pieza de prueba.
- Un transductor para transferir la salida de las ondas ultrasónicas de la pieza de prueba al transductor.
- Amplificador electrónico para modificar la señal del transductor.
- Una pantalla o dispositivo indicador para caracterizar o registrar la salida de señal de la pieza de trabajo.
- Reloj electrónico para controlar varios componentes del sistema, para servir como punto de referencia y para proveer coordinación del sistema completo (ASM, 2001).

2.1.5.6 Sistemas de representación

Existen tres tipos básicos de representaciones de pantallas de tubo de rayos catódicos (TRC) para ensayos ultrasónicos (Echeverria, 2002):

Tipo A (Figura 2.13): Las indicaciones aparecen como deflexiones verticales, en donde el tiempo se representa en la escala horizontal y la amplitud en la escala vertical. La altura de los ecos pueden ser comparadas con la altura de un eco proveniente de un reflector de referencia conocido, a fin de tener una referencia de tamaño de la indicación.



Figura 2.13 Pantalla tipo A (Echeverria, 2002)

Tipo B (Figura 2.14): Usa una pantalla de osciloscopio en donde se muestra una sección transversal del material a ser ensayado. La imagen es retenida sobre el TRC el tiempo necesario para evaluar la pieza y para fotografiar la pantalla con el fin de realizar un registro permanente.



Figura 2.14 Pantalla tipo B (Echeverria, 2002)

Tipo C: Representa una vista superior, similar a la de una placa radiográfica, además de mostrar la forma y localización de las discontinuidades pero no su profundidad (Figura 2.15). Presenta la ventaja de su velocidad en la capacidad de registro.



Figura 2.15 Pantalla tipo C (Echeverria, 2002)

2.1.5.7 Aplicación

Existen diferentes situaciones en la aplicación de técnica de ultrasonido (Echeverria, 2002), las cuales pueden representar una variable importante en el proceso y las cuales se explican a continuación.

* Acoplamiento

Para asegurar el fácil paso de las ondas ultrasónicas del transductor a la pieza de trabajo es necesario remover todo el aire entre estos por medio de un líquido o una pasta, con el fin de igualar lo más posible la impedancia de los dos medio (ASTM E-164, 2003).

* Superficies de ensayo

Al presentarse superficies muy rugosas, esto puede provocar dispersión acústica debido a la refracción. Como consecuencia de esto la sensibilidad de las indicaciones se reduce en comparación con otras piezas de igual geometría y material pero con superficie más lisa, lo cual influye en la selección del medio acoplante de manera que la viscosidad (Ver Tabla 2.2) sea la apropiada según el acabado final de la superficie (ASTM E-164, 2003).

Los recubrimientos causan un defecto perturbador pequeño y en muchos casos estos espacios impiden la transmisión del ultrasonido. Superficies húmedas o grasosas en general no representa un inconveniente, ya que en

la mayoría de los casos ofrecen una ventaja para un mejor acoplamiento (Echeverria, 2002)

Promedio de rugosidad	Viscosidad del acoplante equivalente % peso
5-100	Aceite de motor SAE 10
50-200	Aceite de motor SAE 20
80-600	Glicerina
100-400	Aceite de motor SAE 30

Tabla 2.2 Tipo de acoplante según grado de rugosidad (ASTM E-164, 2003)

* Selección del palpador

Para facilitar esta operación es necesario conocer la información sobre los siguientes puntos: Método de ensayo (Transmisión ó Pulso-Eco), dirección en que se realizará la penetración del haz, frecuencia a utilizar en el ensayo y tamaño del transductor a emplear (Echeverria, 2002).

2.1.5.8 Técnica de inmersión

Para la realización de esta técnica es necesario que la pieza a inspeccionar sea sumergida totalmente en un líquido (agua) y el haz sea emitido desde una cierta distancia (ASTM E-1316, 2006), como se observa en la siguiente Figura 2.16



Figura 2.16 Esquema de proceso por inmersión (Echeverria, 2002)

La ventaja de este método es el acoplamiento constante y uniforme, además de que el eco de la superficie es más angosto que el eco de emisión, permitiendo así una mejor resolución a pequeñas profundidades en la pieza, ya que a diferencia de la técnica de contacto directo no hay reflexión total, debido a que el liquido es considerado mejor conductor del ultrasonido en comparación con el aire. En este método es también importante el uso de superficies lisas para su inspección (Pontigo, 2006).

2.1.5.9 Determinación de discontinuidades

Cualquier discontinuidad va a representar un obstáculo para la onda sónica, por lo cual se va a aplicar el método de medición de su intensidad, y la información que se puede obtener será representativo en los casos de discontinuidades grandes y regulares. Sin embargo los defectos naturales pueden ser tan pequeños que produzcan fenómenos de difracción, debido a esto las discontinuidades se clasificaran de acuerdo a sus dimensiones transversales con respecto al haz sónico en discontinuidades grandes y pequeñas.

Las discontinuidades grandes se puede evaluar mediante exploración dinámica, en donde como primer paso se barre la pieza en una zona donde el defecto no se encuentra, con esto se obtiene el eco de fondo, este se calibra a una determinada altura total en la pantalla, con el fin de que al interceptar el defecto, el fondo comenzara a disminuir debido a la superficie del defecto. En cuanto a las discontinuidades pequeñas se puede realizar solamente midiendo el eco de máxima amplitud producido por el defecto. Este método es conocido como determinación estática ya que no se mueve el palpador y se le compara con discontinuidades conocidas (Echeverria, 2002).

2.1.5.10 Ventajas

- Gran poder de penetración.
- Alta sensibilidad, para detectar discontinuidades muy pequeñas.
- Gran exactitud al detectar la posición de la falla.

- Requiere una sola superficie de acceso.
- Interpretación de resultados inmediatos.
- No existen riesgos o peligros al manejar el equipo.
- Equipos portátiles (ASM, 2001).

2.1.5.11 Limitaciones

- Personal altamente calificado para interpretación de resultados.
- Difícil de ejecutar en superficies rugosas o de forma irregular.
- Discontinuidades superficiales pueden no ser detectadas.
- Necesario patrones de referencia para calibración y caracterización de discontinuidades (ASM, 2001).

2.2 Pruebas no destructivas aplicadas en ambientes marinos

Las instalaciones localizadas en el mar, como ductos y plataformas, están sujetas a condiciones ambientales y operacionales que llegan a ocasionarles daños; tal es el caso de la corrosión y daños producidos por agentes externos, como las abolladuras, muescas, grietas, rayones, laminaciones entre otros. Todos estos daños, van en detrimento de sus propiedades mecánicas.

La seguridad en la operación de las instalaciones petroleras es de vital importancia, sobre todo cuando se detecta un daño, se debe evaluar su resistencia remanente, a fin de determinar las acciones de mantenimiento preventivo ó correctivo, que restablezcan el factor de seguridad y basado en las probabilidades de falla aceptados por la industria petrolera internacional que garantice integridad mecánica durante la vida útil del sistema.

Por lo anterior, la ejecución de los programas de inspección, evaluación y mantenimiento de las estructuras submarinas instaladas en el Golfo de México ha sido una de las tareas permanentes con la finalidad de que estas operen de forma segura y continua a lo largo de su vida de servicio. (Ortiz Hernandez, 2006), entre las técnicas aplicadas se encuentran inspección

visual, ultrasonido, radiografía, entre otras las cuales a continuación se describen.

2.2.1 Inspección visual

A diferencia de la inspección en un medio seco, esta es una metodología para la localización y definición de discontinuidades de superficie bajo el agua como son daños mecánicos, corrosión, daños de revestimiento, grietas evidentes, erosión (Figura 2.17). Con mayor frecuencia se aplica a las soldaduras, para evaluar su estado y grado de conformidad con los requerimientos dimensionales.



Figura 2.17 Buzo realizando inspección (www.marcanario.com)

La prueba se debe realizar con los equipos de medición o de comparación cuando se aplican restricciones cuantitativas, y el buzo debe de estar debidamente entrenado en el uso de tales dispositivos. El buzo también debe estar capacitado para reconocer los rasgos negativos asociados a los procesos de soldadura, así como superar las condiciones ambientales adversas, tales como la visibilidad limitada o iluminación inadecuada, que afecta directamente la realización y validez de la inspección.

2.2.1.1 Aplicaciones

Es utilizada para tres fines distintos:

- a) Al realizar el proceso de soldadura bajo el agua; verificar los requerimientos de dimensiones que las soldaduras deben de cumplir para el tamaño de filete, socavados permisibles, entre otros.
- b) Asegurar que las soldaduras están libres de grietas, fusión incompleta, golpes de arco y de otras imperfecciones.
- c) Garantizar la adecuación de las superficies bajo el agua para otros métodos de END, donde las condiciones de superficie inadecuada puede causar indicaciones falsas u ocultar indicaciones pertinentes (Davey, 1999).

2.2.1.2 Limitaciones

Las indicaciones de tamaño mínimo detectable pueden ser mayores bajo el agua, a pesar de la magnificación inherente obtenida cuando los objetos se observan en un ambiente submarino. La visibilidad limitada, la distorsión causada por la careta del buzo o de los gradientes térmicos y el empañado de la careta son algunos de los factores que pueden reducir la sensibilidad de inspección. La movilidad limitada o de acceso restringido por la protección térmica o equipo de soporte vital también puede reducir la sensibilidad de inspección. La disponibilidad y la calidad de las comunicaciones, de vídeo y material fotográfico pueden limitar la calidad final de los registros e informes (Davey, 1999).

2.2.1.3 Equipo

La gama completa de herramientas de pruebas visuales, incluyendo medidores de perfil de soldadura, dispositivos de medición de ángulos de unión, comparadores de superficie, entre otros, debe estar disponible para el buzo y utilizarse cuando se requiera, además debe de considerarse el uso de una adecuada fuente de luz blanca y línea de tierra (Davey, 1999).

2.2.2 Partículas magnéticas

Se utiliza con buenos resultados en las estructuras de acero para la detección de grietas en la superficie, si el agua no tiene presencia de

muchos sedimentos. La superficie a ser inspeccionada (Figura 2.18) debe limpiarse del crecimiento marino que pueda presentarse en la superficie de la estructura o contaminación grave y oxidación, es un proceso que consume tiempo.

En la operación, el material magnético o elemento de interés es magnetizado mediante un yugo electromagnético diseñado especialmente para uso subacuático. Dado que las discontinuidades de superficie existen dentro del campo de influencia del yugo, se establece el flujo magnético de la superficie de la pieza. Las partículas son de colores brillantes y forman una indicación visible de que corresponde a la ubicación de las discontinuidades en o muy cerca de la superficie de la pieza (Davey, 1999).



Figura 2.18 Aplicación de partículas magnéticas (www.oceancorp.com)

2.2.2.1 Aplicaciones

Las pruebas de partículas magnéticas se utilizan principalmente como un instrumento de garantía de calidad para la soldadura bajo el agua en las estructuras de los buques y tuberías. Se pueden utilizar también para inspeccionar los cascos u otros componentes magnéticos para detectar discontinuidades de superficie, tales como grietas y la falta de fusión, así como, para definir la longitud real de las discontinuidades detectadas visualmente y ayudar a determinar las medidas correctivas que deben aplicarse (Davey, 1999).

2.2.2.2 Características

Se emplean normalmente partículas magnéticas fluorescentes, almacenadas en el líquido en suspensión y dispersadas a través de una manguera a la zona de examinación mientras se lleva a cabo la magnetización. Después de la aplicación de las partículas el campo debe mantenerse durante unos segundos.

La concentración de las partículas debe ser de alrededor del 0.5% por volumen, con un rango de medidas de 0.15 a 0.25 µm, dependiendo de la condición de la superficie del área, 0.15 µm es comúnmente el promedio de diámetro usado. La suspensión debe contener un agente humectante como jabón (Ortiz Hernandez, 2006).

2.2.2.3 Condiciones de visualización

Luz ultravioleta de longitud de onda entre 320 y 400 nm es utilizada a una intensidad de 10W/m² para partículas fluorescentes, debido a que estas partículas absorben este tipo de radiación emitiendo luz visible, posteriormente permitiendo ser visibles en condiciones de poca visibilidad. Para partículas no fluorescentes, el área bajo examen debe ser iluminado por luz natural o artificial a niveles no menores de 500 lux, es importante que la zona donde se realice la inspección sea una área de buena visibilidad El registro de las indicaciones detectadas particularmente se realiza usando cámara fotografía o de video (Ortiz Hernandez, 2006).

2.2.2.4 Tipo de corriente

Esta técnica es únicamente para medición y detección de grietas. Existen equipos de baja y de alta frecuencia y son usados para la medición de la profundidad de las grietas presentes sobre el material a inspeccionar de soladuras a tope y soldaduras de nodos. Los equipos de baja frecuencia son recomendados para superficies rugosas (Ortiz Hernandez, 2006).

2.2.2.5 Ventajas

- a) Bajo costo.
- b) Equipo relativamente simple, provisto de controles utilizados para ajustar la corriente, y multímetro visible para verificar la fuerza de magnetización.
- c) Equipo portátil y adaptable a muestras de distintos tamaños.
- d) Las indicaciones se forman directamente en la superficie de la pieza inspeccionada.

No se requieren lecturas electrónicas de calibración o de mantenimiento excesivo por ser un equipo de componentes sencillos de fácil limpieza (Davey, 1999).

2.2.2.6 Limitaciones

- a) Se considera un método para detectar y medir discontinuidades de la superficie. No es un método aprobado para la detección de discontinuidades de profundidad cercana a la superficie.
- b) La exactitud de la inspección es en gran parte una función del conocimiento del operador y de su habilidad, por lo que las inspecciones con partículas magnéticas submarinas deben ser realizados únicamente por personal capacitado y certificado.
- c) Solo se utiliza en materiales ferromagnéticos (Davey, 1999).

2.2.2.7 Equipo

- a) Yugo magnético subacuático con patas articuladas
- b) Fuente de luz blanca
- c) Partículas magnéticas submarinas
- d) Línea de tierra
- e) Indicador de campo magnético
- f) Equipos de preparación de superficie:
 - a. Andamio de buzo (según proceda)
 - b. Pistola de agua a presión
- g) Equipos de grabación (opcional):

- a. Estéreo y/o cámara
- b. Video y sistema de seguimiento
- h) Equipos de medición como Gage de soldadura (Davey, 1999).

2.2.3 Ultrasonido

La medición de espesores por ultrasonido es fácilmente realizada bajo el agua. Sin embargo, la superficie del objeto a analizar debe estar limpia y relativamente lisa para un buen contacto con el transductor. Algunos modelos de equipos de ultrasonido disponibles están contenidos en cajas de plástico a prueba de agua para uso subacuático. La práctica más común es que la unidad de inspección este fuera del agua y los cables y el transductor bajo el agua. Un operador mueve el transductor a lo largo de la superficie del metal, mientras que otro operador por encima del agua con la unidad de control interpreta las lecturas y registros de la ubicación. La comunicación entre los dos operadores es por teléfono o radio (Davey, 1999).

2.2.3.1 Aplicaciones

La técnica es adecuada para medir espesores de aproximadamente ¹/4" a 2" en acero. Funciona mejor sobre superficies que son aproximadamente planas, pero se puede utilizar en superficies que están corroídas o con picaduras en uno o ambos lados (Davey, 1999).

2.2.3.2 Ventajas

- a) Mayor poder de penetración.
- b) El equipo requiere acceso a una sola superficie de la pieza para su inspección.
- c) Ausencia del peligro para el operario.
- d) Portátil (Davey, 1999)

2.2.3.3 Limitaciones

Al igual que con las técnicas convencionales de ultrasonidos, el grado de dificultad para obtener lecturas precisas aumenta con el grado de rugosidad

de la superficie (Figura 2.19). Las condiciones ideales son superficies lisas en la parte de enfrente y en la espalda, las peores condiciones son superficies muy rugosas o picadas. En este último caso, puede ser necesario reducir la velocidad de exploración de manera significativa con el fin de obtener lecturas precisas. En condiciones de extrema corrosión es imposible obtener lecturas precisas (Davey, 1999).

2.2.3.4 Equipo

- a) Consola.
- b) Transductor.
- c) Computadora.
- d) Línea de tierra.
- e) Programas de procesamiento de señales.
- f) Cables a prueba de agua (Davey, 1999).



Figura 2.19 Preparación de superficie (www.oceancorp.com)

2.2.3.5 Método de ultrasonido Ultramonit^{MR}

El Ultramonit^{MR} es un sistema basado en el uso de sensores de ultrasonido instalados de forma permanente sobre tuberías subacuáticas con el fin de realizar una evaluación continua de la tubería, detectando puntos de corrosión (Figura 2.20). Esto significa que la precisión y resolución pueden ser mejoradas considerablemente por la gran cantidad de sensores de ultrasonido que son utilizados lo que proporciona una lectura de mayor calidad en relación a la inspección por ultrasonido convencional, donde la

posición del transductor con respecto a la tubería cambia cada vez que se produce una inspección.

Los módulos de instrumentación pueden ser instalados en profundidades muy grandes bajo el agua sobre las tuberías existentes. Esto significa que la protección mecánica, el empaquetado, y el concepto de instalación debe ser desarrollado para permitir un costo efectivo e instalación costeable mediante un vehículo operado a distancia o una herramienta de ejecución especializada.



Figura 2.20 Soldadura corroída (Baltzersen, 2005)

La técnica de Ultramonit^{MR} se ilustra en la Figura 2.21, y se basa en el uso de varios arreglos de módulos de sensores (SAM por sus siglas en inglés) que se montan en el interior de una pinza de protección mecánica. Cada SAM es fabricado con una pieza de plástico donde se insertan los sensores de ultrasonido, al mismo tiempo brindando protección y la orientación correcta con respecto a la tubería (Underwater Ship Husbandry Manual Usage Guide, 1994).

La conexión entre los módulos de instrumentación y el medio exterior, así como la fuente de alimentación es proporcionada por un diseño especial de un acoplador inductivo que se conecta directamente a los módulos de instrumentación (Figura 2.22). El acoplador inductivo está diseñado para el suministro de 3 W de potencia a aprox. 12 V. La instalación contempla que la pinza se reducirá hasta el diámetro de la tubería.

El instrumento de ultrasonido se basa en un equipo estándar y se coloca en una carcasa de diseño convencional. Esta unidad contiene las partes más complejas de la instrumentación, por ello se considera conveniente que la unidad sea accesible para su actualización, mantenimiento y reparación aún después de que el Ultramonit^{MR} se haya instalado permanentemente.



Figura 2.21 a) Prototipo de abrazadera mecánica, b) Uno de los módulos de sensores es mostrado (Rommetveit, 2006).

La conexión entre el ROV y la instrumentación ultrasónica es por medio de un cable para suministrar energía y comunicación. La energía requerida es de sólo 10W, ya sea de CA (110-260V, 50 o 60 Hz) o 12 V DC, que normalmente estaría disponible desde el panel de control del ROV. Se cuenta con un módem de teléfono analógico estándar para la comunicación a la superficie. Esta solución ofrece una velocidad de 56kb/s y el acceso a toda la tecnología de comunicación que ha sido desarrollada para las conexiones de acceso telefónico por módem (Rommetveit, 2006).



Figura 2.22 Suministro de energía y adquisición de datos mediante ROV (Rommetveit, 2006)

2.2.4 Radiografía

El examen no destructivo de radiografía se basa en el fenómeno de absorción de radiación. La cantidad de energía absorbida por un material depende de varios factores, siendo los principales la densidad del material y la longitud de la trayectoria de la radiación en el material. Como una guía general, a mayor densidad del material y a mayor longitud de trayectoria, mayor es la absorción de la radiación. En este método, los Rayos X y Gamma se utilizan para detectar las características del material en una dirección paralela al haz de radiación. Se pueden detectar, discontinuidades con espesores medibles en todas las direcciones, siempre estas tienen un apreciable espesor en dirección paralela al haz de radiación paralela al haz de radiación (ASM, 2001)

Los isótopos radiactivos emisores de Rayos X o Gamma son contenidos con altas medidas de seguridad en un extremo, y las películas a prueba de luz y la cinta impermeable se asegura en el lado opuesto. La fuente está tan cerca de la superficie que no se registra en la película, y sólo la pared del fondo es registrada. Las exposiciones múltiples son necesarias para alcanzar una cobertura completa (Marinho, 2008)

2.2.4.1 Equipo

El sistema está compuesto por siete componentes, cuatro de los cuales operan bajo el agua: un dispositivo mecánico, una fuente radioactiva diseñada para trabajos submarinos, un detector (placa de imagen) y un colimador. En la superficie se encuentra el control remoto de exposición, el escáner de radiografía y la computadora.

El dispositivo mecánico es de fácil montaje para el buzo (Ver Figura 2.23), se compone de una cesta de hierro y de un envolvente de poliuretano. La fuente se coloca en la cesta de hierro mientras se introduce la placa diametralmente opuesta al envolvente. Este conjunto es adaptable para una amplia gama de diámetros.

La fuente radioactiva (Ir-192) es colocada en un colimador convencional, y este conjunto es protegido del agua a través de una cubierta de acero

inoxidable para ser operado a una profundidad de hasta 1800 m. La fuente es expuesta a través de una superficie controlada mediante un cable coaxial, comúnmente de 200 m de largo.



Figura 2.23 Colocación de equipo de inspección (www.oceancorp.com)

El colimador es adecuado a la geometría del haz de radiación permitiendo una completa protección del conjunto y permitiendo a la radiación ser confinada en la región de interés para la inspección. La Figura 2.24a muestra la exposición radiográfica, considerando que la figura 2.24b muestra la cubierta de acero del dispositivo mecánico teniendo una ventana.



Figura 2.24 a) Exposición radiográfica, b) Ventana de irradiación de la cubierta de acero (Marinho, 2008).

Los buzos colocan la fuente y la película impermeable en una posición firme y segura (Figura 2.25). Después de asegurar la fuente y la cinta en la ubicación deseada, el buzo se retira a un lugar seguro. La fuente es expuesta el tiempo adecuado por control remoto. Al término de la exposición, la fuente es asegurada, mediante control remoto para mayor seguridad. Una vez que esto ha sido verificado mediante la cámara de vídeo, el buzo es enviado a mover la fuente a la posición de la siguiente exposición. Este procedimiento se utiliza para cada exposición, hasta que se ha obtenido una cobertura total (Marinho, 2008).

2.2.4.2 Procesamiento de imágenes por radiografía en tiempo real

Los defectos de soldadura pueden ser vistos como zonas cuyo brillo es diferente de la zona circundante, y pueden ser fácilmente identificados por los seres humanos. Ahora bien, debido a la falta de iluminación uniforme, ruidos, bajo contraste e imágenes borrosas, se tienen dificultades en la extracción de los defectos.

A fin de mejorar el contraste y mejorar el aspecto visual de las imágenes a procesar, se adoptó la técnica de ecualización de histograma para ajustar la escala de grises de las imágenes (Reza, 2003). El ajuste de brillantes es también realizado en este paso.

El histograma de la misma imagen antes y después del proceso de mejora se muestra por separado en la Figura 2.26a y 2.26b. Se observa, que el histograma de la imagen mejorada es más equilibrado que la imagen original, mientras que se amplía la escala de grises a partir de 110 y 190 (tonalidades de negro a blanco) para la escala completa (Marinho, 2008).



Figura 2.25 Ensamble de equipo radiográfico, a) Colocación de la cubierta de acero b) placa, c) buzo instalando el irradiador en la cubierta, d) buzo verificando la instalación de la irradiación y, e) exposición (Marinho, 2008)



Figura 2.26 Histogramas y pre-proceso de imagen (Marinho, 2008)

Para realizar la inspección automática, el procesamiento de imágenes de radiografía en tiempo real de las soldaduras y la sustracción del fondo es uno de los métodos comunes para segmentar o separa cada parte de los defectos de soldadura. Lo cual se realiza en los siguientes pasos:

- a) Estimación de la imagen de fondo (que no contiene defectos de soldadura) de la imagen original de radiografía de la soldadura.
- b) Obtener la imagen residual (que contiene defectos y ruidos) a través de la sustracción de la imagen de fondo de la forma original.
- c) Transferir la imagen sustraída a una imagen binaria mediante la selección de un umbral apropiado y obtener los defectos de la soldadura.

El método para estimar la imagen de fondo es mediante una reconstrucción parcial de la superficie (Dong, 2007). La Figura 2.27 muestra la imagen de radiografía en tiempo real de una unión en tubería. Donde y(x) denota el nivel de grises a lo largo de la columna 180 a través de la región defectuosa.

El nivel de grises y(x) fue analizado (Figura 2.28) como sigue:

- a) Obtener la diferencia de primer orden y´(x) y diferencia de segundo orden y"(x).
- b) Buscar el intervalo convexo [X₁, X₂] en el interior de la soldadura mediante y´(x) y"(x).
- c) Analizar la imagen columna por columna, para obtener la posible región del defecto (Figura 2.29).



Figura 2.27 Imagen de radiografía en tiempo real de soldadura (Hou, 2008).



Figura 2.28 Análisis de la señal de nivel de grises (Hou, 2008).



Figura 2.29 Resultado de análisis de onda de nivel de grises (Hou, 2008).



La Figura 2.30 muestra la distribución de grises en 3D de la imagen original

Figura 2.30 Imagen original (Hou, 2008).

La Figura 2.31 muestra la distribución de grises de la imagen del fondo después de la reconstrucción parcial de la superficie



Figura 2.31 Imagen de reconstrucción parcial (Hou, 2008)



La Figura 2.32 muestra la distribución de grises 3D del defecto después de la sustracción del fondo.

Figura 2.32 Imagen de defecto sustraído (Hou, 2008)

El método de segmentación ya mencionado combina dos métodos para la segmentación, los falsos defectos y la disminución de detección pueden ser tratadas en forma separada. El fondo estimado mediante la reconstrucción parcial de la superficie en la región del falso defecto está muy cercano a la imagen original y después de la sustracción del fondo el nivel de grises es muy bajo como se muestra en la figura 2.33.



Figura 2.33 Imagen de defecto falso (Hou, 2008)

Entonces el falso defecto es fácilmente eliminado. Después de hacer binaria de la imagen residual mediante la selección del umbral apropiado, el

resultado de la segmentación del defecto es mostrado en la figura 2.34 (Hou, 2008).



Figura 2.34 Imagen de segmentación de defecto (Hou, 2008).

2.2.4.3 Ventajas

- a) La radiografía es aplicable a una gran variedad de materiales.
- b) Procesamiento de datos eficaz, detectando defectos en las imágenes muy rápido.
- c) Detección de manera más precisa de la forma de los defectos.
- d) Eliminación de defectos falsos y de la pérdida de detección al realizar el análisis

2.2.4.4 Limitaciones

La radiografía es un método costoso, que requiere amplias medidas de seguridad que deben adoptarse en el sitio. Puede pasar por alto las grietas, que no son paralelas al haz de radiación o en las secciones transversales de espesor.

2.2.5 Técnica de medición de campo de corriente alterna

Sistemas de Inspección "TSC" (Empresa británica) ha desarrollado un método de inspección llamado ACFM (Por sus siglas en ingles), que puede ser utilizado como una alternativa a las partículas magnéticas inspeccionando en menor tiempo. El equipo ACFM ha sido desarrollado

específicamente para la inspección submarina y es ampliamente utilizado en todo el mundo para la inspección de plataformas marinas.

El método ACFM es una técnica de inspección de campo electromagnético que puede ser utilizada para detectar el tamaño y la superficie de ruptura (o en algunos casos cerca de la superficie) de defectos en materiales magnéticos y no magnéticos. Hay un campo magnético asociado con un campo eléctrico y las perturbaciones del campo magnético (asociado con las perturbaciones en la corriente) se puede medir utilizando sensores (Hall o de bobina). Aunque el campo magnético resultante es complejo, los componentes pueden ser discriminados permitiendo que las perturbaciones debidas a las grietas sean identificadas y cuantificadas. La Figura 2.35 muestra cómo el campo eléctrico se ve perturbado en la superficie por la presencia de una grieta. En la práctica, los dos componentes del campo magnético se miden: B_X a lo largo del defecto, que responde a los cambios en la superficie de densidad de corriente y da una indicación de la profundidad de la grieta y B_Z, lo que da una respuesta negativa y positiva en ambos extremos del defecto, causado por la polarización, y por lo tanto da una indicación de longitud (Systems, Junio 2002).

La profundidad de penetración de esta corriente varia con el tipo de material y frecuencia pero típicamente 0.004 in (0.1mm) de profundidad en materiales magnéticos y de 0.08 a 0.3 in (2-7mm) en materiales no magnéticos (ASTM E 2261, 2003)

En las aplicaciones, se utilizan dos sensores de campo incorporados en una sonda, que también introduce la corriente uniforme en el componente usando un inductor de campo. La sonda no requiere patrón de barrido. Con el fin de inspeccionar las grietas de los pies de soldadura, la sonda es movida simplemente a lo largo del mismo. Dado que las señales producidas en los sensores son muy bajas, TSC ha desarrollado un instrumento denominado Micro-calibrador de grietas, que controla el campo de la inducción, amplificando y digitalizando las lecturas del sensor. Todas las funciones están bajo el control de un microprocesador a bordo, que envía los datos a una computadora portátil normal (Lugg, 2008).



Figura 2.35 Flujo de corrientes ACFM alrededor de defecto (Lugg, 2008)

2.2.5.1 Equipo

El equipo utilizado en los estudios ha sido desarrollado específicamente para operación submarina, y es capaz de operar en profundidades de hasta 300m bajo el agua (Zhou, 2003). Sus componentes se muestran esquemáticamente en la Figura 2.36 y consta de:

- Computador portátil. Controla todas las funciones del sistema y proporciona la visualización de datos, así como también registros de estos.
- La unidad en la superficie proporciona la interface entre la unidad sumergida y la computadora. La unidad sumergida es alimentada por 110 Volts CA desde la superficie y la unidad en la superficie también ofrece la seguridad de interrumpir la corriente para proteger al buzo.
- La unidad sumergida contiene el sistema electrónico y se conecta a la unidad de la parte superior a través de un cable especial.

- 350 mts de cable que proporcionan energía eléctrica y la comunicación entre la parte superior y la unidad sumergida.
- Las sondas de inspección que son conectadas a la unidad sumergida usando conectores resistentes al agua (Lugg, 2008).



Figura 2.36 Esquema del sistema ACFM subacuático (Lugg, 2008)

2.2.5.2 Registro de datos

La inspección es llevada a cabo mediante el barrido con la sonda elegida a lo largo de la soldadura. Las velocidades de exploración son de aproximadamente 10 mm / segundo. Los datos son mostrados y almacenados en la computadora (Lugg, 2008).

2.2.5.3 Análisis de datos

El operador de la sonda (Figura 2.37) no tiene pantalla de datos y no es un especialista en inspección. El inspector general, observa la pantalla en tiempo real como se analiza la sonda y busca las señales de defectos característicos. Los datos se pueden reproducir en cualquier momento y esto permite que los datos sean revisados, incluso en un sitio diferente al copiar los datos en un disquete o transferencia por correo electrónico (Lugg, 2008). La técnica ACFM fue inicialmente desarrollada para determinar el tamaño de grietas en estructuras inmersas en medios submarinos donde otras técnicas se ven obstaculizadas por el requerimiento de energía eléctrica. Sin embargo, las ventajas derivadas de no requerir contacto directo con la pieza a inspeccionar y el suministro de una corriente uniforme significo que la técnica fuera aplicada rápidamente en inspecciones a nivel de tierra, sobre todo en las estructuras soldadas pintadas o revestidas, donde otras técnicas no ofrecían una medición confiable. La técnica también ha demostrado ser capaz de detectar daños por fatiga de material soldado y de identificar las áreas que presentan cambios microestructurales. Esto debido a las microgrietas (Marquez, 2005).



Figura 2.37 Realización de prueba ACFM (Marquez, 2005).

2.2.6 Calibrador interno de tuberías

Las tuberías son consideradas la forma más eficiente de transferencia de fluidos (petróleo y gas) sobre largas distancias, estando sujetos a condiciones ambientales y operacionales que llegan a ocasionarles daños; como la corrosión y daños producidos por agentes externos todos estos daños van en deterioro de su vida útil. Para lo cual debe evaluarse su resistencia remanente, a fin de determinar las acciones de mantenimiento preventivo o correctivo, que restablezcan el factor de seguridad que garantice su integridad mecánica durante la vida útil del sistema (Ortiz Hernandez, 2006).

Las herramientas de inspección en línea comúnmente conocidas como calibradores internos de tubería (PIG por sus siglas en ingles), constituyen

una eficaz respuesta para obtener la información en el momento del estado físico del ducto, y que precisamente integra la información básica para elaborar los programas de rehabilitación (Peralta, 2006).

El PIG de inspección es usado para medir internamente y externamente las paredes de las tuberías (Tiratsoo, 2003). El uso de PIGs inteligentes (Figura 2.38) permite el acceso en tuberías enterradas o submarinas, en las cuales puede ser imposible usando métodos de inspección convencional. Una ventaja adicional del uso de estos instrumentos es que la inspección puede llevarse a cabo durante la operación normal de la tubería sin causar algún paro. Además los sensores del PIG son equipados con unidades de adquisición de procesamiento de datos y fuentes de energía siendo capaz de viajar por cientos de kilómetros sometido a altas presiones en contacto con los fluidos de la tubería.



Figura 2. 38 Esquema de PIG (Carvalho A., 2006)

Conforme la tecnología electrónica avanza, los diablos de inspección han evolucionado para brindar una mejor resolución en la localización y en las características de los daños y defectos, sin embargo las tecnologías más usadas para la realización de este tipo de trabajos son; fuga de flujo magnéticos (resolución estándar, alta resolución y flujo transversal) y ultrasonido de haz recto y haz angular (Carvalho A., 2006).

2.2.6.1 Principio de operación del calibrador interno de tubería

a) PIG de flujo de fugas magnéticas:

El flujo de fugas magnéticas (por sus siglas en ingles MFL) es el método más comúnmente usado en la inspección de tuberías (Yang, 2008), esto debido a que posibilita una cobertura del 100% de la tubería y la soldadura en la detección de diferente tipo de defectos (Slesarev, 2008). Los PIGs de línea de inspección han sido comúnmente usados para detectar y medir defectos de corrosión. Recientemente este tipo de herramientas tiene la capacidad para detectar y medir otros defectos, como son daños mecánicos y grietas.

El principio del PIG MFL de inspección se basa en la aplicación de un campo magnético externo conocido sobre un material ferromagnético y midiendo la respuesta por un sensor tipo Hall o de bobina como se observa en la Figura 2.39. Si el material presenta alguna discontinuidad en la superficie o en el interior, el campo magnético externos será perturbado siendo el tipo de perturbación dependiente de varios factores, como son; la intensidad del campo magnético aplicado, la geometría del defecto, el tipo de material, entre otros (Carvalho A., 2006).



Figura 2.39 Producción de campo magnético a través de la tubería (Carvalho A., 2006)
b) PIG de Ultrasonido:

Las herramientas de ultrasonido son comúnmente usadas en la detección de corrosión por su alta resolución de medición cuantitativa (Lei, 2009).

Su principio consiste en introducir un haz sónico de alta frecuencia (5 MHz) en el material a analizar, con el objetivo de detectar discontinuidades internas y superficiales. La onda que recorre el material es, reflejada por las interfaces, detectada y analizada para determinar la presencia y localización de discontinuidades, en la mayoría de los casos el medio liquido transportado en la línea de la tubería (petróleo, diesel, entre otros), es usado como medio acoplante (Dobmann, 2007).

2.2.6.2 Equipo del calibrador interno de tuberías

Los calibradores (PIG) están formados por un eje central o cuerpo de acero construido lo suficientemente resistente para soportar el recorrido en toda la extensión de la tubería donde se aplica la inspección. Unas copas de uretano se fijan al cuerpo de acero mediante tornillos y son las que están en contacto con la tubería, el diámetro de estas copas son usualmente 1/8" mayor que el diámetro interno de la tubería para un buen ajuste hermético (Velez, 2003). En la Tabla 2.3 se presenta las dimensiones máximas que debe mantener el PIG, así como la Figura 2.41 se muestra un esquema de cada componente.

Este instrumento adopta la forma de una estructura de tren el cual consiste en básicamente en varios vagones; copa de conducción, baterías, equipo de ultrasonido ó equipo de MFL y odómetros, entre los más típicos, los cuales tienen una función en particular (Lei, 2009) en la Figura 2.40 se muestra un ejemplo de un PIG de ultrasonido.



Figura 2.40 Esquema de equipo de PIG de ultrasonido (Lei, 2009)

2.2.6.3 Envío de calibrador en tubería

Las trampas ya sea lanzador, receptor o duales, son equipos que se utilizan para correr al PIG con el fin de dar mantenimiento o inspeccionar ductos de transporte de hidrocarburos, que permiten una manera fácil, rápida y sin interrumpir el servicio de transporte de producto (Hernandez, 2007), los cuales son arreglos de válvulas y tuberías para la colocación del instrumento.

Diámetro en	А	В	Peso
pulgadas	En pulgadas	En pulgadas	En libras
6	10.0	12.0	18.0
8	13.0	15.0	20.0
10	17.0	20.0	25.0
12	20.0	22.0	30.0
14	24.0	28.0	38.0
16	27.0	32.0	55.0
18	30.0	35.0	65.0
20	33.0	38.0	86.0
22	36.0	41.0	95.0
24	40.0	45.0	130.0
26	43.0	49.0	150.0
28	46.0	53.0	280.0
30	49.0	57.0	330.0
34	56.0	64.0	400.0
36	59.0	67.0	440.0
40	65.0	73.0	560.0
42	69.0	80.0	590.0
48	78.0	90.0	720.0

Tabla 2.3 Dimensión de longitudinal máxima para el PIG (Velez, 2003)



Figura 2.41 Componentes de PIG (Velez, 2003)

2.2.6.4 Recepción y análisis de datos

Normalmente la clasificación de las señales se realiza visualmente y esto básicamente depende de la habilidad y conocimiento de operador, sin embargo la correcta clasificación de los tipos de discontinuidades de la tubería podrían mostrar una rapidez y mayor precisión en la interpretación de los datos con el crecimiento de las técnicas computacionales que ofrecen una gran ventaja como herramienta de inspección; algunas de estas técnicas son de inteligencia artificial como son las redes neuronales (Carvalho A. , 2006), lo cual no es más que es un simple modelo matemático cuyo propósito es representar el desarrollo del cerebro humano en diferentes situaciones (Nacelle, 2009), así como también el uso de otros tipos de software como el sistema de adquisición de datos (Lei, 2009); todo esto va a depender de la técnica de inspección a utilizar, para su selección con el fin de obtener un análisis más preciso de las señales obtenidas.

2.2.7 Láser ultrasónico

Comúnmente en las centrales nucleares, particularmente en los componentes internos de los reactores, la iniciación de grietas por corrosión bajo esfuerzos (por sus siglas en ingles SCC) es uno de los típicos deterioros (Ochiai, 2008); por lo que hay tres factores importantes a considerar: Detección, localización y dimensión.

Estos tipos de componentes son generalmente inspeccionados mediante líquidos penetrantes (por sus siglas en ingles PT), debido a que es el método más sensible y fiable para la detección de grietas abiertas a la superficie, sin embargo, esta técnica se dificulta cuando se aplica en la inspección subacuática debido al uso de un líquido como penetrante y revelador (Miura, 2008), por lo que es sustituida por otros tipos de técnicas como radiografía la cual es capaz de detectar y localizar defectos internos, sin embargo esta es limitada en el uso de aplicaciones industriales para inspecciones en servicio, otra técnica utilizada es la inspección por ultrasonido, sin embargo tiene la limitante en la visualización de los resultados de superficies de cordones ásperos, ofreciendo una baja resolución.

Por lo que la técnica de láser ultrasónico se presenta como una alternativa al tener una alta resolución y desarrollando un nuevo método de análisis de señales para visualización en dos dimensiones comparable a la prueba de líquidos penetrantes al aire.

2.2.7.1 Principio y método de medición

Cuando un pulso de láser de corta duración (nanosegundos) y de alta densidad de poder (arriba de 10⁹ W/cm²) es focalizado sobre una superficie de un objeto solido, la energía de absorción del láser en la superficie del objeto genera un plasma cuya expansión es inducida por una reacción de choque de onda. (Boustie, 2008)

La generación del láser de irradiación induce a la ablación del plasma. El plasma genera ondas de choque (por sus siglas en ingles SW) en el agua y sobre la superficie de inspección ondas acústicas (por sus siglas en ingles SAW) por la neutralización del plasma. Al propagarse el SAW concéntricamente, con fugas de las ondas acústicas en la superficie (por sus siglas en ingles LSAW) que son generadas por una fuga de parte de la energía del SAW por el agua mediante el ángulo crítico derivado de la ley de Snell. Cuando hay una grieta en el camino de la propagación del SAW, interacciones entre las SAW y las grietas generan una fuga de ondas (por sus siglas en ingles LW).

En el láser ultrasónico convencional, el láser detector irradia directamente sobre la superficie de inspección y su sensibilidad de detección es alta dependiendo de las condiciones de superficie de aspereza, rugosidad y reflectividad, por lo que para evitar esto se coloco un reflector con el fin de que el láser de inspección no irradiara directamente sobre la superficie (Miura, 2008).

Por lo que el láser de detección irradia en un reflector con acabado superficial a espejo en el agua. Cuando las LW viajan a través de la trayectoria del haz del láser por el paso de los defectos a través del camino del haz, un interferómetro detecta las señales de las LW con el cambio de la longitud de la trayectoria del láser. Como consecuencia, el método propuesto puede detectar ultrasonido en el agua sin efecto de las condiciones de la superficie de inspección como se muestra en la Figura 2.42 (Miura, 2008) (Ochiai, 2008)



Figura 2.42 Principio y método propuesto de detección (Miura, 2009)

2.2.7.2 Equipo

Un láser pulsados Q-Switched Nd: YAG induce las SAW, cuya longitud de onda, energía de pulso y duración de pulso son de 532nm, 30mJ/pulso en alrededor de 10ns, respectivamente. El láser es conducido con una fibra óptica y focalizado en alrededor de 1 mm de diámetro del punto del diámetro. Para detectar las LW el otro láser Q-Switched Nd: YAG irradia la superficie del reflector, cuya longitud de onda y duración de pulso son de 1064nm y alrededor de 100µ, respectivamente. La señal de los LW es detectada con un interferómetro Fabry-Perot el cual tiene una frecuencia de respuesta de 0.5MHz a 50MHz. Las señales de ultrasonido son adquiridas con un convertido A/D cuya frecuencia de muestreo es de 200MHz. La siguiente Figura 2.43 muestra un esquema de todo el equipo.



Figura 2.43 Equipo para inspección mediante láser ultrasónico (Miura, 2008)

2.2.7.3 Detección de grietas

En una placa de acero inoxidable se fabricaron 4 hoyos artificiales de un diámetro de 1 mm con 1 mm de profundidad, los cuales se encontraban separados unos de otros 5 mm (Figura 2.44a), el área inspeccionada de 40x40 mm fue escaneada en intervalos de 0.2 mm.

Para obtener una buena resolución de los resultados, los datos obtenidos por el ultrasonido deben transformarse a información de 2D de superficie mediante el procesamiento de la señal, por lo cual se adopto el algoritmo de la técnica de focalización por apertura sintética (SAFT por sus siglas en ingles). Este análisis es un procesador de imagen que aumenta la relación señal-ruido numéricamente por el focalizado de los campos acústicos, registrado a lo largo del eje X hacia un punto localizado en una profundidad Z.

El uso del SAFT reduce el volumen y complejidad de los sistemas de imágenes, esta técnica se basa en la activación secuencial, uno por uno, de los elementos de la matriz emisión-recepción. Una vez que todas las señales han sido almacenadas, la forma del haz es aplicada en una etapa de pre-

procesamiento, enfocando en cada punto de la imagen y corrigiendo la emisión y recepción simultáneamente (Sicard, 2002).

La Figura 2.44b muestra la visualización de las cuatro indicaciones causadas por los hoyos, además que el método SAFT muestra ser aplicable para la visualización de la superficie de inspección en sustitución de los líquidos penetrantes (Miura, 2008).



Figura 2.44 Espécimen de prueba (Izquierda); Visualización de resultados mediante algoritmo SAFT (Derecha) (Miura, 2009).

La comparación del método del láser ultrasónico en comparación a la resolución y sensibilidad con el método de líquidos penetrantes puede ser corroborada de acuerdo al trabajo realizado por Daniel Lévesquie encontrando que el láser ultrasónico acoplado con un procesamiento F-SAFT es capaz de detectar grietas SCC en un acero inoxidable (Lévesque, 2002); en este estudio también comparo el uso de una onda longitudinal F-SAFT (L) con una onda en cizalla F-SAFT(S), donde los resultados con este procesador de imágenes superan los resultados obtenidos por el convencional método de líquidos penetrantes (Figura 2.45).



Figura 2.45 Comparación de técnica de láser ultrasónico y líquidos penetrantes (Lévesque, 2002)

Takario Miura al comparar los métodos vio que se tenía una mayor resolución espacial en comparación con el método de líquidos penetrantes como se ve en las siguientes Figuras.



Figura 2.46 Metal base (acero inoxidable tipo 304) con SCC (Miura, 2008)



Figura 2.47 Resultado de prueba de líquidos penetrantes (Miura, 2008)



Figura 2.48 Visualización de defectos con método de láser ultrasónico (Miura, 2008)

2.2.8 Robot de Inspección Submarina

Debido al gran avance tecnológico en el campo de la industria naval y consecuentemente, el aumento de la profundidad de trabajos en ambientes subacuáticos, tornándose inviable la exploración por medio de los seres humanos debido a las grandes presiones a las cuales podrían estar expuestos y de otros peligros, equipos que operan remotamente son necesidad de varios, los cuales puedan realizar diversas tareas de inspección en navíos, plataformas marinas, entre otros, ofreciendo grandes ventajas como son seguridad, rapidez, acceso a zonas las cuales estarían restringidas para el ser humano.

Por lo cual a continuación se presentan algunas de las tecnologías que se están aplicando mediante este tipo de instrumentos.

2.2.8.1 Vehículos a control remoto

Los Vehículos controlados remotamente (Por sus siglas en ingles ROV) son vehículos submarinos no tripulados, típicamente en forma de cajas, son manipulados a control remoto por un piloto. Algunos vehículos trabajan rutinariamente a profundidades de 3000 a 5000 metros, los cuales están conectados a través de un cable umbilical, por donde recibe la energía y

comandos de operación que se encuentran en un contenedor de la cubierta de un navío o plataforma y un operador colecta la información obtenida, como se observa en la Figura 2.49 (Carvalho A. A., 2009)

El umbilical es uno de los mayores activos del ROV, porque pueden llevar ilimitado poder para las operaciones de alta resistencia y este puede transmitir grandes cantidades de datos. El umbilical también es uno de los mayores inconvenientes, porque este limita el rango y velocidad al que puede viajar un ROV y además de crear resistencia. Hoy en día, los avances de la tecnología permiten que muchos ROV no tengan este cable, evitando esta limitante (Georgiades, 2005).

Básicamente los ROVs son equipados con cámaras de video y luminarias y dependiendo de su utilización él puede poseer sonares, hidrófonos, y muchos sensores para medir variables; tales como la temperatura, clasificación de aguas, nivel de corteza, algún equipo fotográfica, manipuladores, entre otros.



Figura 2.49 Sistema de operación de ROV (Carvalho A. A., 2009)

Los ROVs están constituidos de un modelo de flotabilidad en la parte superior y un chasis de liga metálica en la parte inferior promoviendo así la flotación del equipo, de tal forma que toda la carga sea bien distribuida, obedeciendo a un centro de flotación en el centro de gravedad lo que causa una buena estabilidad y equilibrio. Los cables son colocados dentro de la tubería de llenado de aceite para protección contra la corrosión. Los propulsores son responsables del movimiento del ROV (Figura 2.50).

Dentro de algunas funciones del ROV se pueden citar la realización de tareas típicas de gran destreza, tales como soldadura, posicionamiento de un sensor de ensayos no destructivos para la inspección de soldaduras en estructuras en altamar, reparos de defectos de soldaduras, entre otros, además de ofrecer las ventajas de poder ser utilizado en aguas profundas y ultra profundas.



Figura 2.50 Esquema de componentes de ROV (Carvalho A. A., 2009)

Estos equipos han sido utilizados en trabajos realizados en los mares de Noruega al realizar inspecciones de un tubing de 120 mm de diámetro de 120 km de longitud, el cual era un umbilical que estaba compuesto de una serie de cables en donde uno de ellos presentaba una fuga, por lo que se realizó un diseño para la adaptación y manejo de un equipo de radiografía conducido mediante un ROV para el trabajo de inspección (Figura 2.51) para lo que se utilizo una fuente de Iridio 142, y placas de fosforo para la realización de múltiples exposiciones, así como la cámara de exposición para evitar que el agua absorbiera la radiación (Mcnab, 2008).



Figura 2.51 Colocación de dispositivo de radiografía por medio de ROV (Mcnab, 2008).

En trabajos realizados de inspección de plataformas marinas y de instalaciones de líneas de tuberías en los mares de Dinamarca y Noruega, se adapto un equipo de ultrasonido (Figura 2.52) realizándose pruebas de hasta mil metros de profundidad (Jeppesen, 2005)



Figura 2.52 ROV con dispositivo de ultrasonido (Jeppesen, 2005)

2.2.8.2 Sistemas de inspección de navíos

a) Sistema de Lamp Ray

Este sistema pertenece a Imetrix una empresa americana especializada en la fabricación y aplicación de sistemas avanzados de inspección y posicionamiento marinos. El cual se utiliza principalmente en la inspección de cascos de navíos. Este vehículo de control remoto está equipado con diferentes dispositivos de inspección; visual, potencial electroquímico, medidor de espesores de revestimiento y de placa (ultrasonido), entre otros (Figura 2.53), además de un sistema de posicionamiento y navegación para proporcionar las coordenadas espaciales en su operación, sistema de energía, estación de control para la realización de los registros del análisis (Harris, 1999).



Figura 2.53 Inspección con Sistema Ray (Carvalho A. A., 2009)

La ventajas de este equipo; es la fácil operación, excelente maniobrabilidad, cámaras con excelente resolución para una buena inspección visual detallada. En cuanto a las desventajas es que es un vehículo de baja potencia y no muy robusto para su aplicación en altamar, además que la superficie de inspección requiere limpieza antes de utilizar el equipo (Carvalho A. A., 2009)

b) Sistema measuremate

Sistema que desarrolla un barrido de la superficie de la placa del fondo de un casco del navío sin la necesidad de limpieza de la superficie. Una inspección de un navío de 150,000 dwt (peso bruto) es realizada en 20 horas con un número de 1,500 mediciones.

c) Sistema Espectrum

Sistema desarrollado por la empresa DNV.Det Norske Veritas y Oceaneering, este sistema permite realizar mediciones con rendimiento de hasta 1 m²/s, trabaja con tecnología de medición de espesor por resonancia. El principio básico de este nuevo método de medición, conocido como resonancia de media onda.

Debido a su principio físico del método no requiere remoción de los productos de corrosión o de incrustaciones marinas para la realización de la inspección. La medición de los espesores es en tiempo real en gráficos 3D/2D y se pueden transferir a otros softwares para su análisis.

d) Robot Hexápodo

Robot escalador (seis patas) de superficies ferromagnéticas son diseñados principalmente para locomoción en superficies con cualquier ángulo de inclinación, inclusive sobre cabeza (Figura 2.54)



Figura 2.54 Robot Hexápodo (Carvalho A. A., 2009)

e) Sistema Octupus

Sistema desarrollado por la empresa francesa Cybermetix (Figura 2.55), el cual realiza operaciones de limpieza e inspección de cascos de navíos. El vehículo con ruedas capaz de inspeccionar superficies verticales, horizontales e inclinadas de acero por medio de sus potentes imanes, el sistema puede ser programado para seguir un camino predeterminado o

controlarlo remotamente utilizando un control. Puede limpiar una superficie de 40 cm de ancho, con un chorro de agua a alta presión (2500bar). Sus medidas son 1.1m de largo, 0.56m de ancho, 0.46 m de altura y un peso de 75 kg. El sistema integra dos motores eléctricos que le brindan una velocidad lineal de 0.3 m/s.



Figura 2.55 Inspección mediante sistema Octupus (Carvalho A. A., 2009)

El sistema de inspección (Figura 2.56) está compuesto por ruedas magnéticas para fijarse al casco de la embarcación. Su principal función es mover un conjunto de sensores de ultrasonido sobre los cascos de los navíos, con el objeto de localizar defectos en el área inspeccionada. Este sistema fue diseñado para trabajar en una profundidad máxima de 40 m y es controlado por un cable umbilical conectado a una computadora. Tiene un peso aproximado de 170 kg y con una dimensión de 1.7 m de longitud, 1 m de ancho y 0.5 m de altura. El sistema cuanta con cuatro motores controlados electrónicamente uno para cada rueda.



Figura 2.56 Equipo de vehículo de ruedas magnéticas (Carvalho A. A., 2009)

2.2.9 Método de ruido magnético Barkhausen

Los esfuerzos residuales son aquellos que resultan aun y cuando todas las fuerzas externas son removidas, también se llaman esfuerzos internos y normalmente aparecen cuando una pieza sufre un calentamiento que no es uniforme (Kou, 2003).

Las soldaduras introducen un alto calor de entrada en el material siendo soldado. Como resultado de esto se tiene una distribución no uniforme del calor, deformación plástica y transformación de fases en el material. Estos cambios generan diferentes patrones de esfuerzos por la región soldada y en la zona afectada por el calor (Yelbay, 2009).

La industria ha estado en la búsqueda de métodos capaces de medir los esfuerzos residuales con precisión, rapidez y facilidad sin dañar el material al ser probado. Varios métodos han sido desarrollados, sin embargo la mayoría son destructivos y limitados en sus capacidades. Uno poco más convencional, el método magnético de ruido Barkhausen, es de particular interés por ser de un potencial no destructivo y sirve como una herramienta de medición de esfuerzos residuales y de otros parámetros microestructurales.

2.2.9.1 Esfuerzos residuales

El desarrollo de los esfuerzos residuales se puede interpretar de la siguiente forma, la figura 2.57 muestra tres barras de metal conectadas a dos blocks rígidos. Las tres barras inicialmente están a temperatura ambiente. La barra de en medio es calentada, pero su expansión térmica es restringida por las barras de los lados (Figura 2.57a). Consecuentemente esfuerzos de compresión son producidos en la barra de en medio y estos incrementan con el aumento de la temperatura hasta que el esfuerzo de cedencia es alcanzado. El esfuerzo de cedencia representa el mayor límite de esfuerzo en el material, en el cual la deformación plástica ocurre. Cuando el calentamiento se detiene en la barra de en medio se permite su enfriamiento, restringiendo la contracción térmica por las barras de los lados (Figura 2.57b), consecuentemente, el esfuerzo de compresión en la barra de en medio disminuye rápidamente, cambiando a esfuerzos de tensión y aumentando con la disminución de la temperatura hasta que el esfuerzo de cedencia en tensión es alcanzado. Por lo tanto, el esfuerzo de tensión es igual al esfuerzo de cedencia a temperatura ambiente, establecido en la barra de en medio cuando se enfría a temperatura ambiente. Los esfuerzos residuales en las barras de los lados son de compresión y de tensión en la barra de en medio.

Hablando en términos generales, la soldadura y el metal base adyacente son analógicamente la barra de en medio y las áreas cercanas a la soldadura son analógicamente las dos barras de los lados, esto es porque la expansión y contracción de la soldadura y metal base adyacente son restringidos por las áreas más cercanas de la soldadura. Consecuentemente, después del enfriamiento a temperatura ambiente, los esfuerzos residuales existentes en la soldadura y en el metal adyacente, con los esfuerzos residuales de compresión en las áreas cercanas a la soldadura. La explicación se da como sigue.



Figura 2.57 Esfuerzo inducido térmicamente durante: a) Calentamiento; b) Enfriamiento (Kou, 2003)

La Figura 2.58 es la representación esquemática del cambio de temperatura (Δ T) y los esfuerzos en la dirección de la soladura (σ _X) durante el soldado. El

área sombreada M-M['] es la región donde la deformación plástica ocurre. La sección A-A es adelante de la fuente de calor y no es aún afectada significativamente por el calor de entrada; la temperatura cambia debido a la soladura, Δ T, es esencialmente cero. A lo largo de la sección B-B hay intersección de la fuente de calor, la distribución de la temperatura es bastante pronunciada.

A lo largo de la zona C-C es la misma distancia detrás de la fuente de calor, la distribución de la temperatura tiene una menor pendiente y es eventualmente uniforme a lo largo de la sección D-D lejos detrás de la fuente de calor. Considerando ahora la inducción térmica a lo largo de la dirección longitudinal, σ_X , dado que la sección A-A no es afectada por el calor de entrada, σ_X es cero. A lo largo de la sección B-B, σ_X está cerca a cero en la región debajo de la fuente de calor, dado que el charco de soldadura no tiene algún esfuerzo para soportar alguna carga. En algo de las regiones cercanas de la fuente de calor, los esfuerzos son de compresión (σ_X es negativo) porque la expansión de estas áreas es restringida por el metal rodeado de baja temperatura. Debido al bajo esfuerzo de cedencia del metal a alta temperatura en estas áreas, σ_X alcanza el esfuerzo de cedencia del metal base a la correspondiente temperatura. En las áreas cercanas a la soldadura σ_X está en tensión, y σ_X es balanceado con los esfuerzos de compresión en las áreas cercanas a la soldadura.

A lo largo de la sección C-C la soldadura y el metal base adyacente tiene enfriamiento y por lo tanto tiene tendencia a contracción, esto produciendo esfuerzos de tensión (σ_X es positivo). Y en las áreas cercanas σ_X es de compresión. Finalmente a lo largo de la sección D-D la soldadura y el metal adyacente tiene enfriamiento y favorece a contraerse, esto produciendo altos esfuerzos de tensión en las regiones cercanas a la soldadura y esfuerzos de compresión en las regiones cerca a la soldadura. Dado que la sección D-D está muy atrás de la fuente de calor, los esfuerzos de distribución no cambian significativamente más allá de esto, y esta distribución de esfuerzos es resultado de la distribución de esfuerzos residuales. (Kou, 2003)



Figura 2.58 Cambios de temperatura y esfuerzos residuales durante la soldadura (Kou, 2003)

2.2.9.2 Métodos de medición de esfuerzos residuales

Existen varios métodos por los cuales se pueden estimar la cantidad de esfuerzos residuales por lo cual se mencionaran algunos de los más comunes.

a) Difracción de Rayos X

Este método los Rayos X son difractados en los planos de la red atómica y marcan la interferencia de ondas lo cual puede ser descritos por la ley de Bragg. Si los ángulos de difracción son determinados sobre un cristal con diferentes orientaciones relacionado a la superficie los esfuerzos residuales pueden ser calculados fácilmente con la ayuda del método de sin² Ψ y la generalizada ley de Hooke. Las líneas de difracción son usadas para determinar los ángulos de Bragg. Además el método requiere usualmente un

equipo el cual es solo aplicable bajo condiciones de laboratorio. Por lo tanto las mediciones de varias líneas de difracción bajo diferentes ángulos de Ψ puede variar el tiempo consumido debido a la microestructura del material. Además el tiempo de intervalo requerido puede variar de pocos minutos a muchas horas para cada medición. La pequeña penetración por el uso de Rayos X sobre materiales metálicos permite la determinación de esfuerzos residuales siendo esto posible solo mediante pulido electrolítico de las placas de las superficies en cada caso, por lo cual incrementa el tiempo de medición. (Bruns, 2005)

b) Método de Hoyo Perforado

Este método se basa en el factor de interferencia local en el equilibrio del esfuerzo residual el cual puede ser produciendo un pequeño hoyo perforado en el campo del esfuerzo residual causando cambios macroscópicos de elongación, las tensiones son producidas mediante la perforación del hoyo, esto puede ser registrado con un calibrador especial de tensiones sobre la superficie del espécimen y así mismo ser atribuido sobre la generalizada ley de Hooke el estado original del esfuerzo. El método permite fácilmente la determinación de la profundidad de la distribución de los esfuerzos residuales. Sin embargo el método del hoyo perforado es difícil de manipular porque la precisión de los resultados depende de la evasión de la deformación plástica debido al proceso de perforación. Además es bien conocido que la relación de la alta tensión de esfuerzos residuales puede producir esfuerzos plásticos en el borde del hoyo el cual puede afectar fuertemente el cálculo de los esfuerzos residuales (Bruns, 2005).

c) Método micromagnético

El método de magneto-elasticidad para la medición de esfuerzos residuales se basa en el principio de la interacción entre los movimientos de los dominios de pared magnéticos y los esfuerzos elásticos en el material. Este método es simple, viable y rápido, pero solo puede usarse en materiales ferromagnéticos (Kesavan, 2005).

2.2.9.3 Efecto Barkhausen

El efecto Barkhausen fue descubierto en 1919 por H. Barkhausen, el cual se basa en el concepto de que los materiales ferromagnéticos están compuestos de pequeñas regiones similares o en barreras individuales magnéticas llamadas dominios y cada dominio se encuentra separado el uno del otro por bordes conocidos como bordes de pared (Ruiz, 2008). Cada dominio es magnetizado a lo largo de cierta dirección cristalográfica de fácil magnetización. Un campo magnético aplicado puede causar que los dominios se muevan (Kesavan, 2005), estos cambios aparecen en la región irreversible (Figura 2.59) y son debido a los desplazamientos irreversibles de las paredes y la rotación irreversible de los dominios. A cada cambio discontinuo se le denomina salto de Barkhausen (Hoyo, 2005), lo que genera el ruido por el movimiento discreto de las paredes de los dominios magnéticos, los cuales producen pulsos magnéticos que pueden ser monitoreados por una bobina lectora colocada sobre la superficie del material (Karpushewski, 1998)

Los cambios producidos en la microestructura afectan considerablemente el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos (Karpushewski, 1998), lo cual le da gran sensibilidad a las características de la microestructura del material. Esta es la razón por la cual este efecto puede ser usado para evaluar algunos de estos parámetros como el contenido de carbono, tamaño de grano, deformación plástica entre otros (Rodriguez, 2008).

2.2.9.4 Dominios magnéticos

Los dominios de pared son regiones en las cuales magnetizaciones espontáneas están en diferentes direcciones (Cullity, 2009). Las regiones con diferentes orientaciones de su magnetización pueden estar cerca uno del otro si bien con un borde llamado dominio de pared (conteniendo típicamente alrededor de 10²-10³ átomos). La saturación de estos dominios ocurre cuando estas regiones se alinean a lo largo de una dirección común impuesta por un campo de magnetización externo (Tannous, 2007).



Figura 2.59 Efecto Barkhausen en zona irreversible (arriba); señal de tensión de los saltos Barkhausen (abajo) (Hoyo, 2005)

La formación de dominios es consecuencia de un balance energético de minimización de energía en el cual intervienen las siguientes energías:

- a) Energía de intercambio: Hace que todos los spines se orienten en paralelo formándose un único dominio (Figura 2.60a).
- b) Energía magnetostática: La configuración de la energía de intercambio, en realidad es un imán muy poderoso, con una energía magnetostática muy alta. La suma de estas dos energías ha de tender a un mínimo, permitiendo que la energía de intercambio a expensas de que la energía magnetostática baje formándose dos dominios con los espines en antiparalelo entre sí, lo que hace una disminución en la energía magnetostática (Figura 2.60b), sin embargo la fuerza de intercambio es de corto alcance (una o dos distancias atómicas), por ello la energía de intercambio es mayor en la frontera de los dominios que en el interior, lo que provocaría que la energía de intercambio fuera muy alta si la transición de orientación de espines entre uno dominio y otro fuera abrupto. Por ello las paredes tienen un cierto espesor en el que los espines se orientan paulatinamente (Figura 2.60c).
- c) Energía de anisotropía magnetocristalina: Esta energía tiende a disminuir las paredes de los dominios (Figura 2.60d).
- d) Energía de magnetostricción: Debido la configuración anterior el cristal se deforma severamente cuando los dominios se alargan en la dirección de

la imantación lo que aumenta la energía de magnetostricción. Para mitigar el esfuerzo interno además de disminuir su energía se forman un número mayor de dominios, así el volumen total deformado es menor tomando la configuración de la Figura 2.60e (Hoyo, 2005).



Figura 2.60 Formación de patrones de dominios como proceso de disminución de energía (Hoyo, 2005)

2.2.9.5 Curva de Magnetización

Los materiales ferromagnéticos difieren en la facilidad en los que ellos pueden ser magnetizados.

Los mecanismos que se producen en el proceso de magnetización se pueden agrupar en varias zonas, como se muestra en la Figura 2.61

 a) Rango de magnetización coherente: Si el campo aplicado sigue creciendo, la curva de magnetización se vuelve menos empinada y el proceso se torna reversible de nuevo. El desplazamiento de los dominios se ha completado y la magnetización se produce por rotación coherente. Los dominios que estaban orientados en los ejes cristalográficos favorables más cercanos a la dirección del campo han ocupado toda la muestra y ahora rotan a la dirección del campo a medida que este aumenta de valor.

b) Rango de saturación técnica: En esta zona se aproximan gradualmente a la saturación. Este efecto se produce por el alineamiento de los espines con el campo. No obstante el alineamiento se ve afectado por la agitación térmica, con lo que en la práctica no se logra la saturación total, de ahí la denominación de saturación técnica.



Figura 2.61 Proceso de magnetización (Hoyo, 2005)

Al aplicar un campo magnético y se detienen en algún punto de los anteriormente explicado, se esperaría que la inducción siguiera el mismo camino en forma descendente, sin embargo esto no ocurre así, ya que la inducción sigue un camino diferente a lo que se denomina fenómenos de histéresis (Hoyo, 2005).

Al analizar el ciclo de histéresis (Figura 2.62) tenemos que; H_m y B_m es el campo y la inducción respectivamente para los cuales se produce el cambio de campo aplicado de ascendente a descendente. Al continuar reduciendo el campo llegamos a eliminar totalmente la intensidad del campo H=0, pero

esto no quiere decir que la inducción se ha eliminado completamente ya que nos queda una inducción B_r , que se denomina remanente, ahora con H=0 cambiamos la polaridad del campo aplicado, H<0, la inducción disminuye siguiendo la curva 2 hasta que desaparece B=0 (al campo necesario para que la inducción desaparezca se le denomina campo correctivo), al continuar disminuyendo la intensidad del campo, la inducción se hace negativa y la cual también tiene un punto de saturación. Si en el punto -H_m y -B_m comenzamos a hacer el campo cada vez menos negativo, la inducción seguirá la curva 3 similar a la 2.

La curva 2 y 3 forman el ciclo o curva de histéresis, en donde la señal de excitación es periódica, la inducción seguirá dicha curva, trazando el mismo ciclo de histéresis, pero si en un momento se cambia la excitación la inducción adoptara otra curva diferente a este ciclo (Hoyo, 2005).

Esta descripción es válida para materiales blandos como aceros ferriticos entre otros, en los cuales el desplazamiento de paredes se da fácilmente pero la magnetización por rotación necesita un campo bastante alto. En los materiales duros no se puede realizar una distribución tan clara de las zonas en las que acontecen los mecanismos de magnetización. El desplazamiento de las paredes y la rotación de la magnetización se dan en forma casi simultánea. (Hoyo, 2005).



Figura 2.62 Ciclo de histéresis (Hoyo, 2005)

2.2.9.6 Sistema de medición

El conductor del campo del magnético es excitado por un imán en estrecho contacto a la superficie, esto es registrado mediante una sonda Hall. Una pequeña bobina la cual está detectando pulsos debido a los movimientos de los bloques de pared. Estos dos sistemas son integrados en un sensor receptor con una mínima área de contacto de aproximadamente 16 mm². El imán necesario puede también ser integrado en una unidad de sensor o por separado. La profundidad de penetración puede variar para analizar diferentes frecuencias. Esto es posible mediante la variación de la excitación y del rango de frecuencia de análisis para poder registrar una profundidad de penetración mínima de alrededor de 10µm. Dos rectificadores de deducción de la pendiente superior e inferior de la curva de histéresis puede ser evaluada por cualquier tipo de sistema computacional.

El tiempo de medición de todo este sistema es muy corto, las cuantificaciones son viables con unos pocos segundos dependiendo de los parámetros de medición. Pero en algunos casos tiene que ser adaptado a la geometría de la pieza de trabajo. Debe ser posible la magnetización del material de una manera suficiente y la unidad del conjunto de sensores sobre el área de interés de la parte (Karpushewski, 1998). La siguiente Figura 2.63 muestra un esquema de todo el equipo de medición.



Figura 2.63 Equipo de ensayo de ruido de Barkhausen (Ruiz, 2008)

2.2.9.7 Comparación de difracción de rayos X y ruido magnético de Barkhausen

Durante el estudio de una prueba de fatiga de los rodamientos de un motor después de su uso, se encontró que se tenía una disminución en el costo de hasta 40 veces menos, además del mapeo realizado de 200 puntos de mediciones este fue 60 veces más rápido. También se obtuvo una diferencia del valor de esfuerzos residuales medidos por ambos métodos, lo cual se puede explicar debido a que el volumen inspeccionado por cada método era distinto, ya que para el método de difracción de Rayos X la medición fue localizada solo en unos cuantos µm³, mientras que por el método ruido magnético de Barkhausen el volumen de material contribuido para la medición fue realizada en varios mm³ (Figura 2.64), por lo cual los resultados obtenidos vario con respecto a cada método (Desvaux, 2004).



Figura 2.64 Inspección a) Difracción de Rayos X; b) Ruido Barkhausen (Desvaux, 2004)

Otro ejemplo de la rapidez de medición del método de ruido de Barkhausen se obtuvo en el trabajo de la medición de esfuerzos residuales en placas ferromagnéticas soldadas se reporto un tiempo de inspección de 63 min con el método de difracción de Rayos X mientras que para el método de ruido de Barkhausen se tomo un tiempo de 1 min incluyendo un análisis estadístico, además se encontró una mayor sensibilidad de este método al cambio de la microestructura del material soldado (Tönshoff, 1998).

Al igual que en la investigación de la caracterización de soldaduras sometidas a fatiga por cargas cíclicas donde se encontró que el método de

ruido Barkhausen se puede utilizar para medir esfuerzos residuales originados por los cambios térmicos como también presenta una gran sensibilidad a los cambios de la microestructura lo cual el método de difracción de Rayos X no puede realizar (Lachmann, 1998).

CAPÍTULO 3

3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICO

La selección de cada método, debe ser acorde a la naturaleza de la parte que va a ser analizada y al tipo de mediciones que se llevaran a cabo, por lo cual es importante tomar en cuenta estos puntos que se mencionan a continuación, sin embargo cabe mencionar que solo son una guía, por lo que se pueden considerar otros aspectos:

- ✤ Naturaleza del material; magnético, no magnético, textura, entre otros.
- Geometría de la parte a ser analizada.
- Donde se realizara la inspección; profundidad, temperatura, visibilidad, entre otros.
- El tiempo del que se dispone para realizar la inspección.
- La precisión y repetitividad del método.
- El costo de la inspección y el precio del equipo requerido.

El presente análisis de los diferentes artículos se realizo en base a las técnicas encontradas de forma separada para establecer un panorama de a cuerdo al método de inspección.

3.1 Medición de campo de corriente alterna

Este método de inspección electromagnético fue desarrollado en los años 80s originalmente con el fin de realizar mediciones de grietas por esfuerzos así como su profundidad, sin embargo debido a sus características ha resultado un equipo de inspección muy eficaz de evaluación en otros campos de trabajo.

Este sistema ha venido sustituyendo al método de partículas magnéticas, debido al ahorro de costos que se tiene al utilizar ACFM ya que es posible la inspección de componentes marinos y terrestres sin la necesidad de remover recubrimientos o la realización de una limpieza previa a su utilización, generando un ahorro en los costos de los trabajos de limpieza y en el tiempo de inspección.

El uso de este método se ha reportado en diferentes artículos en diversas aplicaciones como son; medición de grietas por esfuerzos en tuberías submarinas, vías de trenes, cascos de navíos, recipientes a presión, por mencionar algunos.

Desde sus inicios este sistema ha desarrollado importantes avances en su sistema de medición por lo que logra ofrecer cada vez una mayor precisión y seguridad en los datos obtenidos de cada inspección, además de incorporar los sistemas ROV para el uso en trabajos a mayores profundidades o para ambientes peligrosos a los que pueda estar expuesto el buzo.

Por lo que lo convierte en un método muy confiable y seguro en la detección y medición de grietas, además de ofrecer las ventajas de ahorro de costos y mayor rapidez en comparación al tradicional método de partículas magnéticas utilizado para este tipo de trabajos.

3.2 Radiografía

El análisis de esta técnica se hizo en base al artículo "Sistema de rayos gamma operado por buzos para inspección marina" realizado en Rio de Janeiro, Brasil.

Con este artículo se comprobó que es posible la aplicación de la técnica de radiografía en medio submarino al ser utilizado para la inspección de diversos ductos, los cuales en un inicio fueron inspeccionados por un PIG MFL el cual había arrojado datos de difícil interpretación, por lo cual se optó por la utilización de un equipo de radiografía con fuente radioactiva de Ir-192.

Al realizar la inspección por este medio se pudo determinar que existía una pérdida de espesor debido a la corrosión del medio, los resultados obtenidos fueron buenos en el uso de este equipo, además de tener cuidado en el diseño del equipo para un fácil posicionamiento de la fuente por el buzo, al igual de tener en consideración un rango de diámetros de inspección para el mismo equipo.

Sin embargo el método de radiografía requiere un consumo de tiempo considerado en la lectura de cada punto ya que se debe posicionar el equipo, realizar la exposición, retirar la placa de fosforo y enviarla a la superficie a ser escaneada y posteriormente empezar de nuevo el procedimiento en cada punto. El tiempo consumido para cada punto de inspección no fue registrado en este artículo, lo cual resultaría un dato importante para su posible selección para otros tipos de trabajos.

En el caso de este artículo la tubería se encontraba recubierta, por lo que solo fue necesario retirar un pedazo de esta para la inspección, por lo cual sería también importante establecer qué tipo de preparación sería necesaria para la realización de una inspección a una tubería u otro componente que se encuentre en contacto directo con el medio marino, de igual manera sería interesante ver su comportamiento en la evaluación con otro tipos de componentes submarinos que no fuesen ductos.

Este método de ensayo no destructivo resulta ser una alternativa viable para su aplicación en medios submarinos, tomando en consideración sus limitantes para poder obtener resultados confiables de las piezas examinadas y de acuerdo al tipo de trabajo a realizar.

3.3 Ultrasonido

De acuerdo a los artículos analizados, la técnica de ultrasonido por inmersión es una técnica viable y confiable en la evaluación de soldaduras y espesores, sin embargo está limitado para piezas de compleja configuración o de superficies rugosas, también se encontró que la contaminación del agua por burbujas de aire u otros agentes externos puede causar dispersión del haz.

El uso de equipo de ultrasonido asistido mediante ROV, permite la colocación del equipo en diferentes componentes a inspeccionar en diferentes profundidades de hasta de 1000mts lo cual representa un amplio campo de medición.

La aplicación de sistemas de monitoreo permanentes también es una opción para la medición de soladuras corroídas, en donde el sistema es asistido de igual forma por un ROV para su colocación y en la adquisición de información, ofreciendo un monitoreo de la unión soldada permanente de partes criticas para la operación de algún sistema.

De igual forma los equipos PIG equipados con instrumentos de ultrasonido, permiten realizan un escaneo interno de las tuberías para la detección de pérdidas de espesor debido a la corrosión, ubicando el punto exacto del desperfecto para su reparación.

Con todo esto se establece que la técnica de ultrasonido submarino es una vía confiable para la examinación de componentes submarinos, siempre y cuando se realice una buena calibración y uso del equipo, dependiendo de las condiciones o del tipo de trabajo a realizar.

3.4 Láser-Ultrasónico

El análisis de esta técnica se realizó en base al artículo "Visualización de defectos de soldadura en el agua mediante láser-ultrasónico", realizado en Yokohama Japón.

Esta tecnología ofrece un nuevo método de visualización de defectos en componentes internos de los reactores nucleares los cuales comúnmente se inspeccionan con líquidos penetrantes, debido a que este método ofrece una sensibilidad apropiada así como un buena resolución de los defectos encontrados, sin embargo el uso de este método no es posible cuando el componente se encuentra sumergido en un medio liquido.

Por lo que la técnica no destructiva láser-ultrasónico ofrece una alternativa adecuada para realizar la evaluación, ya que otros métodos como en el uso de radiografía se complica para la inspección cuando se encuentra en servicio el componente y en el caso de ultrasonido la resolución no es la óptima para una buena interpretación de los resultados.

Los resultados presentados en este artículo son obtenidos a través de pruebas experimentales, por lo que sería de interés realizar la experimentación en campo con el fin de conocer el funcionamiento del equipo en condiciones reales y de esta forma determinar que tan práctico es su utilización para este tipo de inspecciones, así como la determinación de variables a controlar. Establecer de igual forma las profundidades en las cuales puede desempeñar un buen funcionamiento.

Esta técnica resulta ser una buena innovación para el sistema de inspección, sin embargo aun es necesaria la realización de un mayor número de experimentación, para la determinación de aquellos factores que puedan afectar en el sistema de detección de defectos.

3.5 Ruido magnético Barkhausen

Los esfuerzos residuales presentes virtualmente en todos los componentes manufacturados y de estructuras ensambladas, pueden alterar la capacidad de carga de las estructuras cuando se encuentran bajo esfuerzos externos. En partículas los esfuerzos residuales debidos a la soldadura puede degradar la resistencia al pandeo, a la fractura frágil y a la fatiga. Por lo que es importante estimar la distribución de estos y sus efectos en el desarrollo de la estructura soldada.

De acuerdo a los artículos analizados en el uso de esta técnica se encontró lo siguiente:

El uso de este método es amplio ya que con el podemos medir esfuerzos residuales, cambios de microestructura, tamaños de grano, entre otros.

En diversas publicaciones se establece una comparación de los resultados obtenidos por ruido Barkhausen con los obtenidos por métodos como hoyo perforado y difracción de Rayos X, encontrando una buena correlación entre ambos resultados, por lo cual es un método viable para este tipo de mediciones.

Además de ofrecer buenas ventajas en comparación con los métodos de hoyo perforado y difracción de Rayos X, al poderse utilizar en campo para la realización de este tipo de mediciones sin tener la necesidad de condiciones de laboratorio, además de poderse llevar a cabo con una mayor rapidez.

Sin embargo para poder obtener estas ventajas es necesario realizar una muy buena calibración de este método debido a su sensibilidad de medición a las condiciones en que la pieza de trabajo se encuentre (tamaño de grano, carburos presentes, entre otros).

Por otro lado, de esta técnica no destructiva solo existen publicaciones en inspecciones terrestres, debido a que es necesaria la experimentación este método en medios submarinos para analizar su comportamiento en este tipo de medios y establecer si es posible su uso para estos tipos de inspecciones.

Por lo cual se puede considerar un buen proyecto de investigación para ser desarrollado y aprovechar las ventajas que este proceso puede ofrecer en el medio de inspecciones no destructivas aplicadas en medios marinos.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis realizado respecto a los documentos encontrados referente al tema en cuestión se pueden obtener las siguientes conclusiones sobre la aplicación de técnicas de ensayos no destructivos en ambientes marinos:

- Las técnicas de ensayos no destructivos es una forma viable de inspección para todas aquellas estructuras que se encuentran en ambientes marinos arrojando resultados muy similares a las condiciones reales en las cuales estas se encuentran.
- 2. El uso de pruebas no destructivas representa un ahorro en costos, al facilitar la evaluación de las estructuras sin tener que realizar paros en la producción o en el funcionamiento de estas, además de poder prevenir algún desastre reparando o cambiando con tiempo aquellos componentes que lo requieran.
- La principal técnica como método no destructivo, es la inspección visual ya que es siempre el primer paso (en la mayorías de los casos) con el cual se puede definir que otro método no destructivo se puede utilizar y

las condiciones que se requieren establecer para que el método seleccionado ofrezca un buen funcionamiento.

- 4. Es importante tomar en cuenta todas las condiciones que se tienen; tipo de componente, forma, tamaño, tipo de superficie, tipo de material accesibilidad, condiciones climáticas, entre otras para poder seleccionar el método apropiado de inspección, así como conocer las ventajas y desventajas de cada método con el fin de poder obtener una mejor precisión de los resultados obtenidos.
- Los métodos de inspección submarina toma de referencia los mismos principios de los métodos convencionales, por lo cual es necesario primero comprender estos para facilitar el manejo de aquellos métodos en vías marinas.
- El manejo de los equipos debe estar siempre en manos de personas certificadas, según sea el nivel que se requiera por el método, esto con el fin de obtener resultados con alto nivel de credibilidad, veracidad y seguridad.
- 7. Con los avances que se han tenido en tecnología se ha podido aprovechar de manera que se utilizan como complementos de los métodos no destructivos ofreciendo un mejor desempeño de la inspección, haciendo de esta manera una manera más fácil de interpretar los resultados.
- De acuerdo a los métodos empleados, el método ACFM presenta grandes ventajas en la detección de grietas así como su medición, por lo cual es de amplio uso en las tareas de inspección de plataformas petroleras.
- 9. Cuando se habla del tema de inspección interna de tuberías el principal método empleado son los PIG ya sea en su modalidad MFL o de ultrasonido ofreciendo una buena técnica de inspección confiable en la determinación de defectos y de pérdidas de espesor en la tubería
- 10. La inspección mediante radiografía resulta ser una técnica confiable para la medición de defectos volumétricos incorporando innovaciones en su sistema de inspección, sin embargo es un método que consume tiempo y requiere de mayor seguridad para su aplicación.
- 11. Los métodos de ultrasonido ya sea en monitoreo permanente o portátil establece ser una técnica viable la cual ha ido teniendo un gran avance con el uso de la tecnología lo cual representa un método confiable y seguro, tomando en cuenta que requiere de una adecuada calibración para obtener resultados más confiables.
- 12. En cuanto al método de láser-ultrasónico resulta ser una buena técnica de inspección, sin embargo aun se requiere más investigación sobre las variables que pueden afectar las mediciones en operación.
- 13. El método no destructivo magnético de ruido Barkhausen para la medición de esfuerzos residuales, presenta un amplio campo de aplicación sin embargo está en vías de estudio para su aplicación en ambientes marinos.

Bibliografía

ASM. (2001). Metals Handbooks, Non-Destructive Evaluation and Quality Control (Novena ed., Vol. 17).

ASTM. (2006). ASTM E-1316. Standard Terminology for Nondestructive Examinations.

ASTM. (2003). ASTM E-164. Standard Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldements .

ASTM. (2002). ASTM E-165. Liquid Penetrant Examination .

ASTM. (2003). ASTM E-2261 Standard Practice for Examination of Welds Using the Alternating Current Field Measurement Technique.

ASTM. (2001). ASTM E-709. Standard Guide for Magnetic Particle Examination .

AWS. (2001). AWS A-3.0 . Standard Welding Terms and Definitions .

AWS. (2009). AWS B1.10. Guide For The No Destructive Inspection Of Welding.

Baltzersen, O. (2005). Multichannel Ultrasonic Monitoring Of Corrosion On Subsea Pipelines (Vol. 10). Trondheim, Norway.

Boustie, M. (2008). Láser Shock Waves: Fundamentals and Applications. 1st International Symposium on Láser Ultrasonic: Sicience, Technology and Applications.

Bruns, M. (2005). Determination of Residual Stresses in Steel Weldments by Micromagnetic Measurements. 5th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing.

Carvalho, A. A. (2009). Inspeção submarina: perspectivas e avanços. Tecnol. Fortaleza, 189-209. Carvalho, A. (2006). MFL signals and artificial neural networks applied to detection and classification of pipe weld defects.

Castillo, A. F. (2002). Inspeccion Y Sistemas de Calidad.

Castillo, A. F. (2001). Inspeccion de Soldaduras.

Castillo, A. F. (2004). Inspeccion Radiografica.

Cullity, B. D. (2009). Introduction to Magnetic Materials (Second ed.). Wiley.

Davey, V. S. (1999). Non-Destructive Examination of Underwater Welded Steel structures IIS/IIW Document V-1097-97 (IIS/IIW-1372-97).

Desvaux, S. (2004). The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise effect. 9-17.

Dobmann, G. (2007). State of the Art of In-Line Nondestructive Weld Inspection of Pipelines by Ultrasonics. Russian Journal of Nondestructive Testing, 43 (11), 755–761.

Dong, D. (2007). Automatic Inspection Of Weld Defects With X-Ray Real-Time Imaging. 362, 359-366.

Echeverria, R. (2002). Ultrasonido. Univesidad Nacional de Camahue, Laboratorio de Ensayos No destructivos.

García, A. R. (2005). Procedimiento y Practicas de Liquidos Penetrantes Nivel I y II (Segunda ed.).

Georgiades, C. (2005). Simulation and Control of an Underwater Hexapod Robot. Departament of Mechanical Engineering, McGill University .

Harris, S. E. (1999). Lamp Ray: Ship Hull Assessment for Value, Safety and Readiness. Imetrix Inc.

Hatre, A. F. (1994). Ensayos No Destructivos por Ultrasonido. Asturias.

Hernandez, L. O. (2007). Trampas de Diablos en Plataformas Marinas. NRF-178-PEMEX-2007 . Hou, R. (2008). Segmentation of Weld Defects in X-ray Image Based on Partial Surface Reconstruction. 17th World Conference on Nondestructive Testing.

Hoyo, A. d. (2005). Modelación de la Histéresis Magnética y su Aplicación al Cálculo Numérico en Máquinas Elécricas. Barcelona.

Jeppesen, L. (2005). Subsea Automated Ultrasonic Inspection. 3rd MENDT -Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition .

Karpushewski, B. (1998). Introduction to Micromagnetic Techniques. 1st International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing.

Kesavan, K. (2005). Non Destructive Evaluation of Residual Stresses in Welded Plates Using the Barkhausen Niose Technique.

Kou, S. (2003). Welding Metalurgy (Segunda ed.).

Lachmann, V. (1998). Characterisation of the Fatigue of Cyclically Loaded Welded Joints by Micromagnetic Testing and X-Ray Diffraction. 1st International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing.

Lei, H. (2009). Ultrasonic Pig for Submarine Oil Pipeline Corrosion Inspection. Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 45 (4), 285–291.

Lévesque, D. (2002). Láser-Ultrasonic Inspection of Surface-Breaking Tight Crecks in Metals Using SAFT Processing.

LLOG. (n.d.). LLOG S.A de C.V. Retrieved 02 22, 2010, from http://www.llogsa.com/nueva_web/tutoriales/inspeccion-visual

LLOG. (n.d.). LLOG S.A de C.V. Retrieved 02 23, 2010, from http://www.llogsa.com/nueva_web/tutoriales/liquidos-penetrantes

LLOG. (n.d.). LLOG S.A de C.V. Retrieved 02 22, 2010, from http://www.llogsa.com/nueva_web/tutoriales/particulas-magnetica

Lugg, M. (2008). The First 20 Years Of The A.C. Field Measurement Technique. 17th World Conference on Nondestructive Testing .

Marinho, C. A. (2008). Gamma Ray System Operated By Divers For Underwater Inspection, ,17th World Conference on Nondestructive Testing (Vol. 10). Shanghai, China.

Marquez, F. C. (2005). Experiences in the Use Of ACFM for Offshore Plataform Inspection in Brazil (Vol. 10).

Mcnab, J. R. (2008). Computed Radiography deployed subsea by a Remotely Operated Vehicle. 17th World Conference on Nondestructive Testing.

Miura, T. (2009). Development of Multifunction Láser Welding Head as Maintenance Tecnologies against Stress Corrosion Cracking for Nuclear Power Reactors.

Miura, T. (2008). Visualization of Weld Defects in Water by Láser-Ultrasonics. 17th World Conference on Nondestructive Testing.

Nacelle, A. (2009). Redes neuronales artificiales. Facultades de Medicina e Ingenieria, Uruguay.

Ochiai, M. (2008). Development and Applications of Láser-Ultrasonic Testing in Nuclear Industry. 1st International Symposium on Láser Ultrasonic: Sicience, Technology and Applications.

Ortiz Hernandez, L. (2006). Inspeccion, Evaluacion y Mantenimiento de Ductos Marinos. NRF-014 PEMEX-2006, .

Peralta, J. D. (2006). Inspección de Ductos de Transporte Mediante Equipos Instrumentados. NRF-060-PEMEX-2006.

pndmx.comze.com. (n.d.). PND-MX. Retrieved Noviebre 04, 2009, from http://pndmx.comze.com/

Pontigo, R. R. (2006). Implantación de Técnicas de Ultrasonido por Inmersión en la Inspección de Ensambles Automotrices.

Raj, B. (2002). Practical Non-Destructive Testing (Segunda ed.).

Reza, A. M. (2003). Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement. Milwaukee, USA.

Rodriguez, J. (2008). Nondestructive inspection of plastic deformation in commercial carbon steels using magnetic Barkhausen noise. Revista Mexicana de Fisica, 51-53.

Rommetveit, T. (2006). On The Efficiency Of Data Comunicaction For The Ultramonit Corrosion Monitoring System. Norweing University Of Science And Tenchnology.

Ruiz, D. (2008). Ruido Barkhausen y emisión magneto acústica para la caracterización de materiales ferromagnéticos. Revista Matéria, 12 – 22.

Sicard, R. (2002). A SAFT Algorithm for Lamb Wave Imaging of Isotropic Plate-Like Structures. Elsevier, 487-494.

Slesarev, D. (2008). Practice of Inline Pipeline Inspection with MDSCAN Intelligent Pigs. Shanghai, China.

Systems, T. I. (Junio 2002). Cost Benefit Aplications Using the Alternating Current Field Measurement Inspection Technique. Barcelona.

Tannous, C. (2007). Magnetic Domain Walls and Relaxation Method. France.

Tiratsoo, J. (Ed.). (2003). Pipeline Pigging and Integrity Technology (Tercera ed.). Luisiana, Houston, USA: Scientific Surveys Ltd.

Tönshoff, H. K. (1998). Residual Stress Determination of Ferromagnetic Sheets. 1st International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing.

Trimm, M. (2003). An Overview of Nondestructive Evaluation Methods (Vol. 3).

Underwater Ship Husbandry Manual Usage Guide. (1994). Retrieved 10 01, 2009, from http://www.supsalv.org/manuals/uwsh/chap07/chap7toc.html

Velez, G. A. (2003). Prototipo PIG Inteligente. Universidad Nacional Facultad de Ingenieria Electrica y Electronica, Manizales.

www.marcanario.com. (n.d.). Mar Canario. Retrieved Noviembre 09, 2009, from www.marcanario.com/.../06/foto-submarina.jpg

www.oceancorp.com. (n.d.). Ocean Corp. Retrieved Noviembre 10, 2009, from http://www.oceancorp.com

Yang, L. (2008). Inspection and Identification of Inner-outer Defects on Oilgas Pipeline. 17th World Conference on Nondestructive Testing.

Yelbay, H. I. (2009). Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. NDT&E International , 29–33.

Zhou, J. (2003). Automated Crack Detection System Deployed By An Underwater Roving Vehicle (Vol. 9).

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Tiempo de penetración	13
Tabla 2.2 Tipo de acoplante según grado de rugosidad	38
Tabla 2.3 Dimensión de longitudinal máxima para el PIG	65

Lista de Figuras

Figura 2.1 Esquema del proceso de capilaridad	10
Figura 2.2 Ángulo de contacto	11
Figura 2.3 Leyes de magnetismo	18
Figura 2.4 Principio de prueba de partículas magnéticas	19
Figura 2.5 Magnetización con yugo	20
Figura 2.6 Esquema de corriente alterna	21
Figura 2.7 Esquema de corriente directa rectificada	22
Figura 2.8 Esquema de corriente directa	23
Figura 2.9 Esquema básico de método radiográfico	28
Figura 2.10 Esquema del contendor de fuente radioactiva	30
Figura 2.11 Esquema de ensamble de fuente radioactiva	31
Figura 2.12 Esquema de unidad de control de la fuente radiográfica	31
Figura 2.13 Pantalla tipo A	36
Figura 2.14 Pantalla tipo B	36
Figura 2.15 Pantalla tipo C	37
Figura 2.16 Esquema de proceso por inmersión	38
Figura 2.17 Buzo realizando inspección	41
Figura 2.18 Aplicación de partículas magnéticas	43
Figura 2.19 Preparación de superficie	47
Figura 2.20 Soldadura corroída	48
Figura 2.21 a) Prototipo de abrazadera mecánica, b) Uno de los módulos	de
sensores es mostrado	49
Figura 2.22 Suministro de energía y adquisición de datos mediante ROV	49
Figura 2.23 Colocación de equipo de inspección	51

Figura 2.24 a) Exposición radiográfica, b) Ventana de irradiación de la
cubierta de acero 51
Figura 2.25 Ensamble de equipo radiográfico, a) Colocación de la cubierta
de acero b) placa, c) buzo instalando el irradiador en la cubierta, d) buzo
verificando la instalación de la irradiación y, e) exposición 52
Figura 2. 26 Histogramas y pre-proceso de imagen 53
Figura 2.27 Imagen de radiografía en tiempo real de soldadura 54
Figura 2.28 Análisis de la señal de nivel de grises 54
Figura 2.29 Resultado de análisis de onda de nivel de grises 54
Figura 2.30 Imagen original 55
Figura 2.31 Imagen de reconstrucción parcial 55
Figura 2.32 Imagen de defecto sustraído 56
Figura 2.33 Imagen de defecto falso 56
Figura 2.34 Imagen de segmentación de defecto 57
Figura 2.35 Flujo de corrientes ACFM alrededor de defecto 59
Figura 2.36 Esquema del sistema ACFM subacuático 60
Figura 2.37 Realización de prueba ACFM 61
Figura 2. 38 Esquema de PIG 62
Figura 2.39 Producción de campo magnético a través de la tubería 63
Figura 2.40 Esquema de equipo de PIG de ultrasonido 64
Figura 2.41 Componentes de PIG 65
Figura 2.42 Principio y método propuesto de detección
Figura 2.43 Equipo para inspección mediante láser ultrasónico 69
Figura 2.44 a) Espécimen de prueba; b) Visualización de resultados
mediante algoritmo SAFT 70
Figura 2.45 Comparación de técnica de láser ultrasónico y líquidos
penetrantes
Figura 2.46 Metal base (acero inoxidable tipo 304) con SCC 71
Figura 2.47 Resultado de prueba de líquidos penetrantes
Figura 2.48 Visualización de defectos con método de láser ultrasónico 72
Figura 2.49 Sistema de operación de ROV 73
Figura 2.50 Esquema de componentes de ROV 74
Figura 2.51 Colocación de dispositivo de radiografía por medio de ROV 75
Figura 2.52 ROV con dispositivo de ultrasonido

Figura 2.53 Inspección con Sistema Ray 76	6
Figura 2.54 Robot Hexápodo	7
Figura 2.55 Inspección mediante sistema Octupus	8
Figura 2.56 Equipo de vehículo de ruedas magnéticas	8
Figura 2.57 Esfuerzo inducido térmicamente durante: a) Calentamiento; b))
Enfriamiento	0
Figura 2.58 Cambios de temperatura y esfuerzos residuales durante la	а
soldadura 82	2
Figura 2.59 Efecto Barkhausen en zona irreversible (arriba); señal de tensión	n
de los saltos Barkhausen (abajo) 85	5
Figura 2.60 Formación de patrones de dominios como proceso de	е
disminución de energía	6
Figura 2.61 Proceso de magnetización	7
Figura 2.62 Ciclo de histéresis	8
Figura 2.63 Equipo de ensayo de ruido de Barkhausen 89	9
Figura 2.64 Inspección a) Difracción de Rayos X; b) Ruido Barkhausen 90	0