

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**“Inspección de fondo de tanques de
almacenamiento API 650 mediante Emisión
Acústica”**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,
que presenta el bachiller:**

Alvaro Gerardo Jesús Reyna Barandiaran

ASESOR: Ing. Daniel Merino Ponce

Lima, Junio del 2015

RESUMEN

En la actualidad existe una gran cantidad de tanques de almacenamiento en la industria petrolera, los cuales deben ser inspeccionados con cierta periodicidad para garantizar su buen estado. El mayor problema que existe en la actualidad es que las refinerías evitan realizar estas tareas debido al prolongado tiempo de inspección y se requiere dejar fuera de servicio a los tanques evaluados. En muchas ocasiones, las inspecciones ofrecen resultados favorables, indicando que los tanques se encuentran en buen estado; sin embargo, con la finalidad de evitar que un equipo quede fuera de servicio durante la inspección, se plantea emplear una técnica alternativa de la emisión acústica, la cual evalúe la integridad de los fondos de tanques de almacenamiento, permitiendo un ahorro de tiempo y dinero a la industria petrolífera. La presente tesis está avocada a implementar y documentar la técnica alternativa de inspección de tanques de almacenamiento API-650, partiendo de los procedimientos generales de inspección hasta la aplicación en un caso específico, cuyos resultados obtenidos mostraron la gran capacidad del método de Emisión Acústica para evaluar la integridad de los fondos de tanques de almacenamiento.

Tabla de contenido

RESUMEN	I
INTRODUCCIÓN	1
1.0. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	2
1.1. Introducción a los Ensayos No Destructivos (END).....	2
1.2. Inspección Visual.....	5
1.2.1. Fundamentos	6
1.2.2. Procedimiento de Ensayo.....	7
1.2.3. Mediciones y equipamiento	9
1.2.4. Discontinuidades en uniones soldadas.....	11
1.3. Tintes Penetrantes.....	13
1.3.1. Fundamentos	14
1.3.2. Procedimiento de ensayo	15
1.3.3. Equipamiento	17
1.4. Partículas magnéticas.....	19
1.4.1. Fundamentos	20
1.4.2. Procedimiento de Ensayo.....	23
1.4.3. Equipamiento	24
1.5. Magnetic Flux Leakage (MFL)	26
1.5.1. Fundamentos	26
1.5.2. Procedimiento de Ensayo.....	27
1.5.3. Equipamiento	27
2.0. MÉTODO NO DESTRUCTIVO - EMISIÓN ACÚSTICA	30
2.1. Conceptos básicos.....	30
2.1.1. El fenómeno de la Emisión Acústica.....	30
2.1.2. Características de la Emisión Acústica	30
2.1.3. Mediciones de Emisión Acústica	34
2.1.4. Tipos de onda acústica.....	42
2.1.5. Principio de Emisión Acústica.....	48
2.1.6. Procedimiento de Inspección.....	60
3.0. ENSAYOS CON TANQUES EN OPERACIÓN	633

3.1. Primer caso de estudio	¡Error! Marcador no definido.
3.2. Segundo caso de estudio.....	¡Error! Marcador no definido.
4.0. ANÁLISIS DE RESULTADOS	722
4.1. Estudio de la Probabilidad de detección (PoD)	722
5.0. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN	811
CONCLUSIONES	899
RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	911



INTRODUCCIÓN

La inspección de tanques de almacenamiento API – 650 de la industria petrolífera es necesaria debido a que estos contienen hidrocarburos y de producirse una fuga podrían causar una muy grave contaminación del medio ambiente. A lo largo de la historia de la industria petrolífera, se han encontrado muchos casos en los que no se han detectado a tiempo discontinuidades que produjeron fallas con consecuencias graves, tales como contaminación y degradación de los suelos. Por esta razón, es necesario evaluar la integridad de los tanques verificando la adecuada hermeticidad; sin embargo, existe la dificultad que los tanques deben estar vacíos y limpios para poder utilizar métodos de inspección convencionales que permitan detectar problemas que producen fugas, tales como inspección visual, ultrasonido, radiografía industrial y MFL. Cabe mencionar que solo la operación de evacuar el producto de un tanque a otro o reducir la capacidad de almacenamiento de las instalaciones, tiene un impacto económico significativo sobre las empresas petrolíferas. La propuesta que plantea la presente tesis, es utilizar un método de inspección avanzado, el cual permita realizar la inspección a un tanque en servicio, logrando ahorro de tiempo y dinero, por tal motivo se mencionan los fundamentos de la emisión acústica, probabilidad de detección y procedimientos de inspección. Estudios provenientes de laboratorios de desarrollo de emisión acústica, indican que este método alternativo tiene resultados iguales o superiores a los métodos convencionales.

Objetivo General:

- Implementar el ensayo de emisión acústica en tanques de almacenamiento API-650.

Objetivos Específicos:

- Definir los principios que utiliza el método de emisión acústica.
- Implementar un procedimiento de inspección general.
- Evaluar dos casos de tanques de almacenamiento mediante el procedimiento implementado.
- Contrastar resultados obtenidos de la emisión acústica contra métodos convencionales.

Capítulo 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Introducción a los Ensayos No Destructivos (END)

En la actualidad existen una variedad de ensayos que nos permiten analizar la integridad de un sistema o parte de esta sin dañarla. “Los ensayos no destructivos han sido definidos como las pruebas usadas para examinar o inspeccionar una parte o material o sistema sin perjudicar la utilidad de este en un futuro” (Nondestructive testing handbook, 1996). La finalidad de utilizar estos ensayos es asegurar la integridad del producto o sistema, evadir fallas, dar ahorros al detectar a tiempo ciertas fallas que pueden ser solucionadas sin mucho esfuerzo.

Inicialmente los ensayos no destructivos (no invasivos) fueron aplicados en el campo de la medicina a inicios de los años 40 en los cuales se utilizaban principalmente rayos X, ultrasonido y endoscopias. A partir de estos ensayos fue que se formuló la pregunta si era posible hacerlo en componentes mecánicos y es así que se creó la ASNT (American Society for non Destructive Testing).

La aplicación de los ensayos no destructivos tiene varios propósitos los cuales son:

1. Asegurar la integridad/confiabilidad de un producto

Actualmente, las empresas que compran cualquier producto que le genere beneficios esperan que este cumpla con su función y sobre todo que tenga un tiempo de vida largo pues de esta manera fundamentan mejor su inversión. Si uno de los productos falla, dependiendo el tipo de función que cumpla, puede generar gastos muy altos y sobre todo tiempos muertos que podrían generar molestias en clientes al no cumplir con los tiempos de entrega establecidos.

La confiabilidad de un producto se basa en la probabilidad que este tiene de fallar. Por ejemplo, si una parte de un producto tiene una probabilidad de falla de 1 en 1000 y el producto es ensamblado con 100 partes, entonces la confiabilidad sería:

$$R = 0.999^{100} = 0.9048 \quad [1]$$

La posibilidad de falla del ensamble es de:

$$1.00 - 0.9048 = 0.0952 \quad [1]$$

2. Prevención de accidentes

La confiabilidad simplemente para conveniencia y beneficios no es suficiente, también debe ser para la protección de vidas humanas. Las pérdidas materiales son reemplazables pero las pérdidas humanas no, por tal razón es que un producto debe garantizar la protección del hombre. Los frenos de los automóviles no deben fallar al dar las curvas, los sistemas de izaje en las minerías no deben fallar, las turbinas de un avión no deben detenerse en pleno vuelo, cualquier evento que se produzca descrito en líneas anteriores puede provocar consecuencias irreversibles. El uso de los ensayos no destructivos, siempre y cuando sean ejecutados de la manera adecuada, nos permite prevenir accidentes fatales.

3. Asegurar la satisfacción del cliente

El entregar un producto de alta calidad, que tenga una larga duración, que cumpla con su función y que de seguridad al usuario permite que exista una buena reputación. Al cumplir con todas las exigencias del cliente, se logra tener su satisfacción.

4. Soporte en diseño de productos

Los ensayos no destructivos permiten determinar ciertas características de productos terminados los cuales ayudan a la evaluación del diseño indicando si son los apropiados o si estos deben ser mejorados. Esto juega un papel muy

importante pues se pueden obtener productos más resistentes, menos costosos y más confiables.

5. Controlando los procesos de manufactura

En muchas ocasiones para obtener un producto acabado este debe pasar por muchos procesos. Si la calidad es evaluada al final y se detecta algún problema, es difícil saber con exactitud en que parte del proceso se ha dado. Si se realizan controles de calidad después de cada proceso, entonces se puede identificar en qué proceso se provocó el problema y por lo tanto ser corregido ya sea cambiando de proceso o alterando los parámetros del mismo.

6. Reducción de costos de manufactura

El uso de ensayos no destructivos puede reducir los costos de manufactura cuando detecta características indeseadas en el material o componente en una fase temprana, eliminando así costos de reprocesamiento (reparación).

7. Manteniendo uniforme la calidad

Una vez que el nivel de calidad ha sido establecido, se obtiene un criterio de aceptación y ciertas tolerancias. Mediante ensayos no destructivos pueden evaluarse los productos finales y definir si estos deben ser aceptados o rechazados, manteniendo de esta manera una uniformidad en la calidad de los productos finales.

Se pueden encontrar distintas técnicas que nos permiten la evaluación de los sistemas, las cuales poseen características particulares con ventajas y limitaciones. A continuación se detallaran las distintas técnicas existentes y se hablará sobre las que pueden ser aplicadas en la inspección de fondos de tanques.

- AET- Emisión acústica
- ET- Electromagnetismo
- LT- Fuga
- PT- Tintes penetrantes
- MT- Partículas magnéticas
- NRT- Radiografía neutrónica
- RT- Radiografía
- IRT- Térmico/Infrarrojo (PdM)
- UT- Ultrasonido
- VA- Análisis de Vibración (PdM)
- VT- Visual
- Láser
- MFL – Magnetic Flux Leakage

Los métodos pueden ser clasificados en 2 tipos, los superficiales y los volumétricos. Dentro de los superficiales encontramos a los que solo pueden detectar y evaluar discontinuidades abiertas a la superficie como los tintes penetrantes, partículas magnéticas, entre otros. Los métodos volumétricos son los que se emplean para verificar la sanidad interna de un material en todo su espesor.

1.2 Inspección Visual

El método de inspección visual (VT) es uno de los métodos más antiguos y ampliamente usados en los ensayos no destructivos. Ha sido utilizada en inspecciones que van desde componentes muy sencillos como una bujía hasta complejos como las partes de una aeronave, recipientes a presión, etc. Este método siempre debe ser considerado como la primera alternativa de inspección.

1.2.1. Fundamentos

El método de inspección visual se basa en 2 aspectos importantes:

- Las leyes fundamentales de la óptica.
 - Las propiedades de la radiación luminosa (campo de energía aplicado)
 -
- a) Agudeza Visual

La agudeza visual es la mínima distancia a la que deben estar separados dos puntos para que puedan ser distinguidos en forma individual, observados a una distancia óptima (300 mm para el ojo humano). Para el ojo humano la agudeza visual es de 0.1 mm.

b) Luz Visible

Dentro del espectro de radiación electromagnética (Fig 1.1) solo existe una franja en la cual el ojo humano es sensible, esta zona es la denominada luz visible y está comprendida entre 390 nm y 720 nm. La máxima sensibilidad del ojo humano se da para longitudes de onda cercanas a los 555 nm.

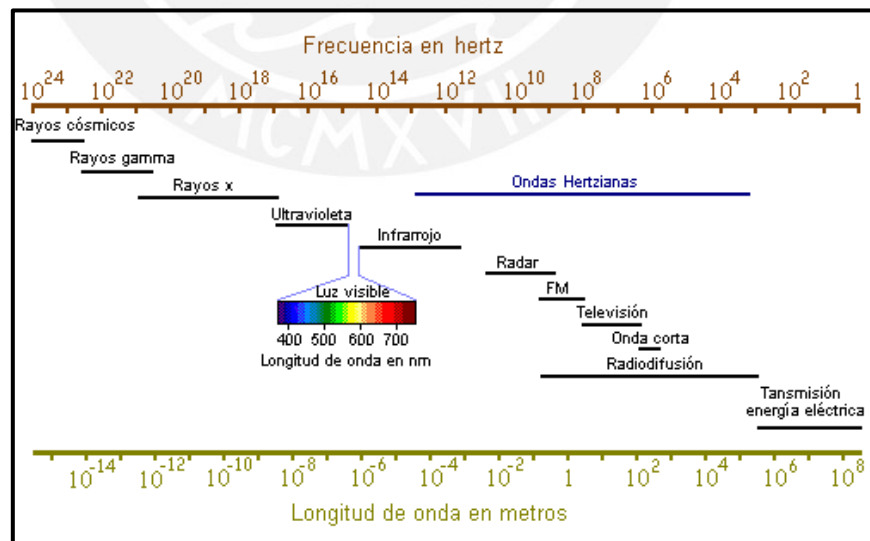


Figura 1.1 – Espectro de radiación Electromagnética (www.ces.fau.edu)

c) Nivel de Iluminación

Es la cantidad de luz que cae sobre la zona de trabajo. El nivel de iluminación varía en función de la distancia de la fuente a la superficie iluminada y el ángulo de incidencia. La percepción del color, forma, contraste, profundidad y distancia pueden realizarse de buena manera a partir de los 100 lux. Es recomendable que el nivel de iluminación en zonas de inspección este sobre los 1000 lux.

1.2.2. Procedimiento de Ensayo

La limpieza es uno de los pasos más importantes que se deben aplicar para realizar una adecuada inspección visual. La limpieza es el acto de remover suciedades, impurezas o materias extrañas que no son parte del componente.

La limpieza mecánica significa acción física para remover suciedades desde la superficie. Este tipo de limpieza está considerada más como preparación de superficie que como limpieza. Los métodos más utilizados en la limpieza mecánica son: lijado, escobillado, esmerilado, etc.

La limpieza química significa acción química para remover suciedades desde la superficie. Los químicos usados en actos de limpieza de las manchas se usan por virtud de su composición. Los limpiadores químicos pueden disolver a otros, ser dispersantes o reaccionar con las manchas o contaminantes para removerlas de la superficie. En la limpieza química se utilizan muy a menudo los solventes y detergentes.

La norma ASTM E-165 establece en su anexo A1 algunas indicaciones para la limpieza superficial de materiales.

- Factores a tomar en cuenta para escoger un método de limpieza
 - o Tipo de sustancia que será removida de la superficie, teniendo en cuenta que no existe un método que remueva todas las sustancias con la misma eficiencia.
 - o Efecto del método de limpieza sobre el elemento a evaluar.
 - o Factibilidad de aplicación del método seleccionado (tamaño del objeto, trabajo en campo, etc.)

- Especificaciones de limpieza establecidas para el material a limpiar.

Los métodos de limpieza recomendados por ASTM E-165:

- Detergente: suciedad, manchas, grasas, aceites, etc.
- Solventes (Fig. 1.3): pinturas, grasas, aceites y materia orgánica en general.
- Vapor: solo para grasa y aceites.
- Limpieza alcalina: decapado superficial para eliminar óxidos y herrumbre.
- Limpieza con ácidos: decapado de superficies con soluciones ácidas para eliminar capas de óxido.
- Limpieza ultrasónica: empleado con solventes y detergentes que se agitan ultrasónicamente. Permite mejorar la eficiencia de limpieza y disminuir el tiempo de la misma.
- Limpieza mecánica (Fig. 1.2): lijado, esmerilado, cepillado, arenado, etc.



Figura 1.2 – Limpieza mecánica



Figura 1.3 – Limpieza química

Una vez que la limpieza ha sido realizada adecuadamente, se procede a realizar una inspección utilizando luz natural o artificial con una intensidad superior a los 1000 lux. Es conveniente realizar registros fotográficos para que exista evidencia de las discontinuidades que han sido encontradas.

Con ayuda de ciertas galgas de medición se deben caracterizar las discontinuidades para luego ser comparadas con los códigos pertinentes y determinar si se trata de un defecto que debe ser reparado o no.

1.2.3 Mediciones y equipamiento

El método de inspección visual tiene como herramienta principal el ojo humano. Si la inspección es realizada utilizando directamente el ojo se denomina inspección visual directa mientras que si se utiliza alguna herramienta de apoyo debido a que no se tiene acceso directo, se denomina inspección remota.

En las inspecciones directas es apropiado utilizar galgas de medición (Fig. 1.4) que nos permitan dimensionar tanto los elementos a inspeccionar como las discontinuidades y de esta forma determinar si estas están dentro del rango aceptable o si se tratan de un defecto el cual necesite reparación.

Dentro de las galgas de medición tenemos las siguientes (más comunes):

- BrigdeCam.
- V-WAC Gage.
- Medidor de pierna.
- Pie de rey.
- Micrómetro.
- Hi-Lo.
- Medidor de refuerzo.
- Otros.



Figura 1.4 – Galgas de Medición para inspección Visual
(<http://www.soldadurasolysol.com/>)

Estas galgas de medición nos permiten tomar distintas medidas que nos ayudan a evaluar la condición del elemento. Algunas de las medidas que se pueden tomar son las siguientes:

- Espesor.
- Largo.
- Ancho.
- Socavaciones.
- Porosidades (Fig. 1.5)
- Refuerzos.
- Convexidad.
- Concavidad
- Otros.

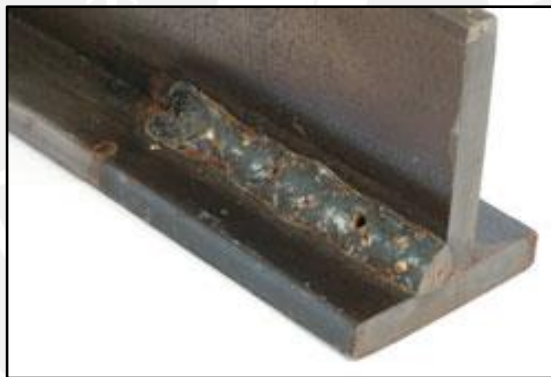


Figura 1.5 – Porosidades en Cordón de Soldadura (<http://www.thefabricator.com>)

La inspección visual remota utiliza como herramienta de apoyo aparatos ópticos simples o de control remoto. Podemos encontrar los boroscopios (rígido), fibroscópios (flexible), videoscopios (grabación de videos – Fig. 1.6), entre otros. En estos casos la forma de dimensionar es aproximada pues se realiza a partir de pantallas o espejos. Los sistemas más modernos permiten realizar mediciones de mayor precisión gracias a un sofisticado software.



Figura 1.6 – Equipo de Videoscopia (<http://www.mediprec.es>)

La iluminación es un factor muy importante en las inspecciones de este tipo por lo que es necesario que se cuente con un luxómetro (Fig. 1.7) para medir la cantidad de luz que existe en la zona de inspección. La cantidad de luz mínima necesaria para que se garantice una inspección adecuada es de 1000 lux.



Figura 1.7 – Luxómetro (<http://www.videonine.es>)

1.2.4. Discontinuidades en uniones soldadas

Las discontinuidades pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Discontinuidad superficial (A)
- Discontinuidad sub superficial (B)
- Discontinuidad sub superficial abierta a la superficie (C)
- Discontinuidad interna (D)

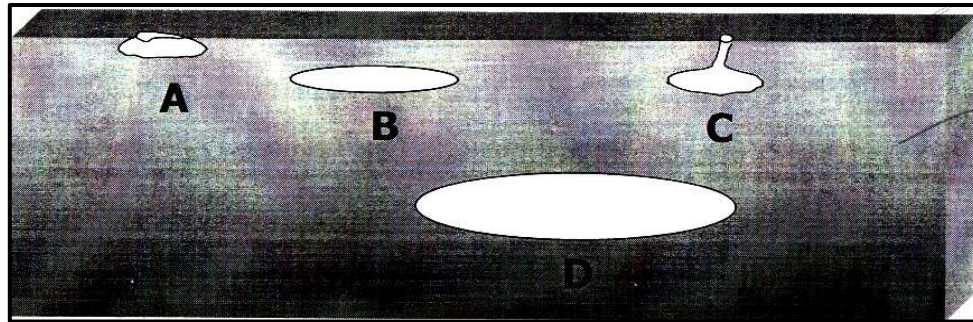


Figura 1.8 – Clasificación de Discontinuidades – [1]

- Porosidades: son debidas a gases atrapados durante la solidificación del metal de aporte y pueden ser de varios tipos:
 - o Porosidades aisladas.
 - o Porosidades aglomeradas.
 - o Porosidades alineadas.
 - o Poros en túnel o agujeros de gusano.
 - o Porosidades en la raíz.
- Fusión incompleta: es la falta de unión que existe entre dos cordones de soldadura adyacentes o entre material base y material de aporte. La causa más común de este problema es por falta de limpieza.
- Penetración Incompleta: discontinuidad caracterizada por un área no penetrada y no fundida en una unión que ocurre cuando el metal de soldadura no se extiende por el espesor de la unión. Puede resultar de un inadecuado diseño de junta.
- Exceso de penetración: discontinuidad caracterizada por un exceso de metal de soldadura en el lado posterior de la unión.
- Socavaciones: discontinuidad superficial que sucede en el metal base adyacente a la soldadura. Es una condición en la cual el metal base ha sido fundido y no hubo cantidad suficiente de material de aporte para llenar la depresión resultante.
- Golpe de arco: Son generados por la iniciación del arco sobre la superficie de metal base fuera de la junta soldada, ya se accidentalmente o intencionalmente.

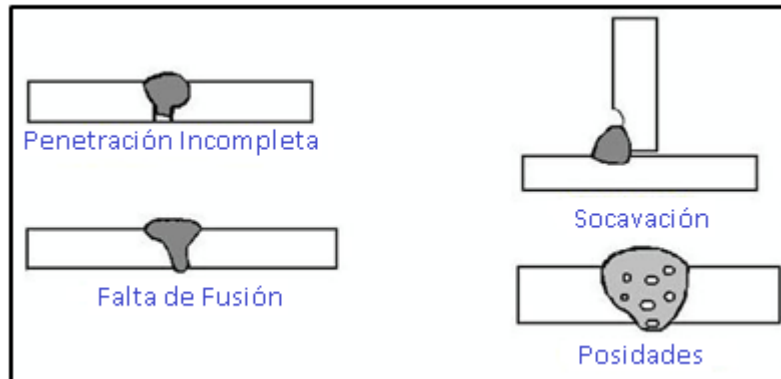


Figura 1.9 – Defectos en Soldadura (<http://www.mailxmail.com>)

Todos los métodos tienen ventajas y limitaciones y la inspección visual no es una excepción. A continuación se muestra una tabla con las ventajas y limitaciones de este método.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se utilizan para una gran variedad de materiales. - Permite detectar defectos antes de completar un trabajo. - Disminuye número de reparaciones finales. - Permite incremento de producción. - Inspección de bajo costo. - La geometría de la pieza no representa un problema. - Se obtienen resultados inmediatos. 	<ul style="list-style-type: none"> - La calidad de inspección depende de la experiencia del inspector. - Solo para discontinuidades superficiales. - Se debe tener acceso a la superficie a inspeccionar.

Tabla 1.1 – Ventajas y Limitaciones de Inspección Visual

1.3. Tintes Penetrantes

Los tintes penetrantes es un método de inspección el cual nos permite netamente detectar discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos, siempre y cuando estas se encuentren abiertas a la superficie. Es aplicado en materiales ferrosos y no ferrosos,

siendo su mayor aplicación en metales no magnéticos (aluminio, cobre, acero inoxidable austeníticos, etc.) Pueden ser aplicados en materiales no metálicos.

1.3.1. Fundamentos

Este método se basa en la capacidad que poseen ciertos líquidos para penetrar y permanecer en espacios muy reducidos como son las fisuras, porosidades y en otras que se encuentren abiertas a la superficie.

Las 3 propiedades fundamentales de las que depende el resultado del ensayo son:

1. Poder Humectante.
2. Capilaridad.
3. Viscosidad.

El poder o capacidad humectante es una de las propiedades más importantes requerida en un líquido. Es la capacidad de un líquido para mojar una superficie sólida. La capacidad para humedecer una superficie es medida por el ángulo de contacto, el mismo que se define como el ángulo entre el líquido y la superficie en el punto de contacto, cuanto más pequeño es este ángulo, mejor será su habilidad humectante.

Está determinada por las fuerzas de cohesión (tensión superficial) y por las fuerzas de adherencia.

Fuerzas de cohesión: fuerzas con la cual las moléculas semejantes son atraídas.

Fuerzas de adherencia: fuerzas con la cual las moléculas diferentes son atraídas (líquido penetrante y superficie sólida).

Un ángulo de contacto (Fig. 1.10) menor a 90° grados implica un buen poder humectante.

La capilaridad es la capacidad que tiene un líquido la cual le permite introducirse y permanecer en espacios reducidos como una fisura.

La viscosidad de un líquido determina el tiempo de penetración de este en un espacio reducido. Si la viscosidad es muy alta, el tiempo de penetración será alto. Por el contrario, si la viscosidad es muy baja, este puede ser eliminado durante la remoción.

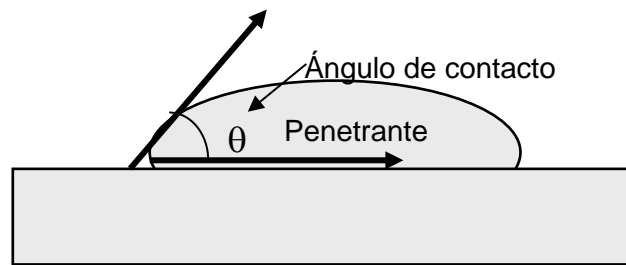


Figura 1.10 – Ángulo de Contacto (<http://www.briteguard.com>)

1.3.2. Procedimiento de ensayo

Para una adecuada inspección mediante tintes penetrantes es recomendable seguir una serie de pasos, las cuales se resumen en el siguiente gráfico.

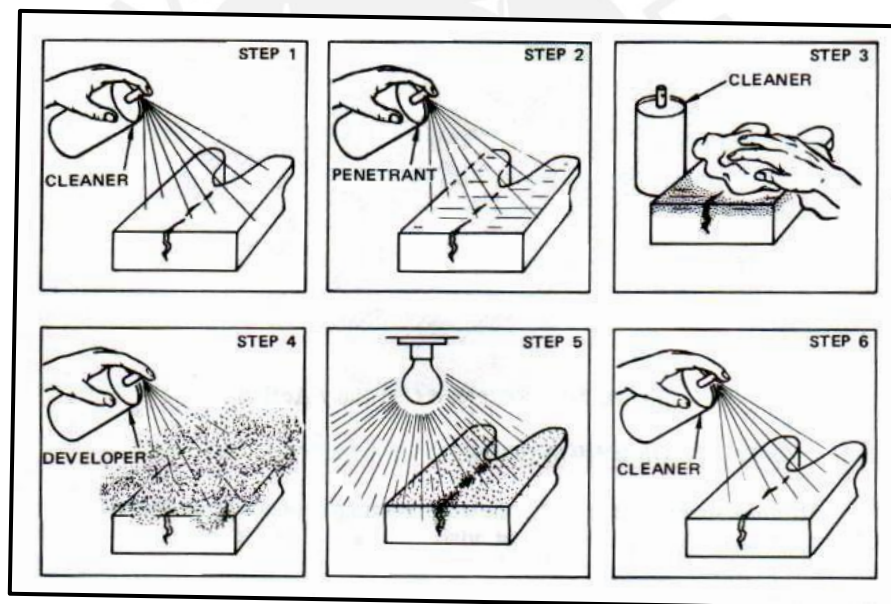


Figura 1.11 – Procedimiento de Inspección con tintes penetrantes [1]

Debe tenerse en cuenta que la limpieza es fundamental en este método de inspección por lo que antes de aplicar el penetrante se debe realizar una adecuada limpieza. Una apropiada limpieza es esencial para la evaluación con líquidos penetrantes por 2 razones:

1. Si el espécimen no está limpio y seco, el penetrante no es efectivo.

2. Si los restos del material penetrante no son removidos después de la evaluación, ellos pueden tener un efecto nocivo sobre el espécimen (el cloro y el azufre pueden afectar a algunas aleaciones).

Existen muchas formas de realizar una limpieza las cuales ya han sido mencionadas en el método de inspección visual.

Una vez que se ha realizado una limpieza adecuada, el líquido penetrante es aplicado sobre la superficie a inspeccionar, dejándola por el tiempo suficiente para que este pueda penetrar en las discontinuidades, así sean pequeñas o angostas, como es el caso de una rajadura.

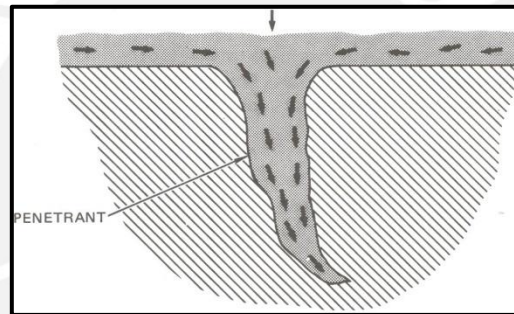


Figura 1.12 – Aplicación de penetrante [1]

Después de que ha pasado un tiempo suficiente en el que el penetrante ingrese en la discontinuidad, deberá removerse el exceso de este teniendo cuidado de no limpiar lo que se encuentra en el interior, por tal motivo es recomendable no aplicar solvente directo al espécimen cuando se quiere remover el exceso. El tiempo que permite el ingreso del penetrante a la discontinuidad, es llamado “Tiempo de Penetración”.

Luego de removerse el exceso de penetrante, se aplica un revelador el cual aplicará la acción capilar para remover el penetrante y nos permitirá observar la discontinuidad. El revelador está constituido por un polvo fino el cual tiene la capacidad de adherirse a la superficie y formar una película fina.

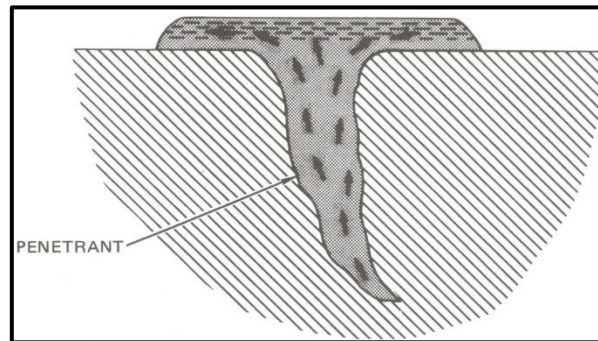


Figura 1.13 – Aplicación de Revelador [1]

Una vez que se han dimensionado las discontinuidades y se ha realizado un reporte (generalmente con apoyo de fotografías) se procede a la limpieza final del espécimen. Para la limpieza final, es posible aplicar el solvente de manera directa a la pieza inspeccionada.

1.3.3. Equipamiento

Según ASTM E-165 existen 6 tipos de tintes penetrantes, en función del tipo de visibilidad y del método de remoción. Estos son:

- Tipo I: Penetrante Fluorescentes
 - o Método A: Removible con agua.
 - o Método B: Post-Emulsificable lipofílico.
 - o Método C: Removible con Solvente.
 - o Método D: Post-Emulsificable hidrofílico.
- Tipo II: Penetrantes Visibles (Coloreados)
 - o Método A: Removible con agua.
 - o Método C: Removible con Solvente.

La diferencia que existe entre el Tipo I y Tipo II está en el penetrante pues el primero es fluorescente debido a que contienen en su composición pigmentos fluorescentes que solo pueden ser identificados mediante una luz ultravioleta.

Las lámparas o linternas de luz ultravioleta (Fig. 1.14) son sistemas que emiten radiación electromagnética ultravioleta cercana, con una componente residual muy pequeña de luz visible.



Figura 1.14 – Lámpara de luz Ultravioleta (<http://mx.magnaflux.com/>)

En el caso que se realice una inspección mediante tintes penetrantes, se debe tener en cuenta que la intensidad que genera la lámpara de luz ultravioleta debe ser superior a los 1000 uW/cm^2 (según la norma ASTM E-1417). Para medir la cantidad de luz ultravioleta es necesario utilizar un instrumento llamado radiómetro (Fig. 1.15)



Figura 1.15 – Radiómetro (<http://mx.magnaflux.com/>)

Como todos los métodos, los tintes penetrantes poseen ventajas y limitaciones las cuales se resumen en el siguiente cuadro:

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> - Ensayo rápido de realizar. - Alta sensibilidad. - Puede ser utilizado en materiales ferrosos y no ferrosos. - De bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Solo para discontinuidades superficiales. - Se necesita de una excelente limpieza. - Las inspecciones en materiales porosos no es recomendable. - El interior de las discontinuidades debe estar libre de materiales como corrosión.

Tabla 1.2 – Ventajas y Limitaciones con tintes penetrantes

1.4. Partículas magnéticas

Es un ensayo no destructivo con la capacidad de detectar discontinuidades superficiales y sub superficiales (ligeramente). Debido a que la magnetización es posible en ciertos metales (ferromagnéticos) es que podemos detectar discontinuidades con la asistencia de polvo de hierro (como medio) en presencia de una atracción magnética. En el siguiente gráfico se muestra como las partículas magnéticas detectan una discontinuidad.

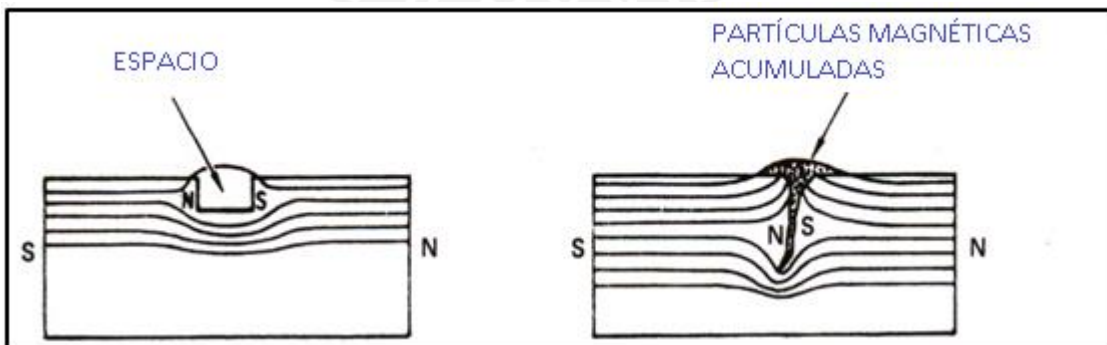


Figura 1.16 – Formación de campo de fuga (<http://www.isotec.com.co>)

La evaluación por partículas magnéticas es relativamente fácil y simple. Este método puede ser aplicado en varias etapas de fabricación y procesos de producción. El objetivo

de la examinación por partículas magnéticas es asegurar la confiabilidad del producto, bajo los siguientes alcances:

- Obtener una imagen visual de una indicación sobre la superficie del material.
- Descubrir la naturaleza de las discontinuidades que han afectado el material.
- Separar el material aceptable del inaceptable de acuerdo con estándares predeterminados.

1.4.1. Fundamentos

La fuerza que atrae otros materiales magnetizables a través de sus polos magnéticos es definida como flujo magnético. El flujo magnético implica todas las líneas de fuerza. Como ejemplo se puede presentar la clásica herradura magnética que atraerá a otros materiales magnetizables que solo se encuentran dentro de sus líneas de fuerza, que salen e ingresan al magneto.

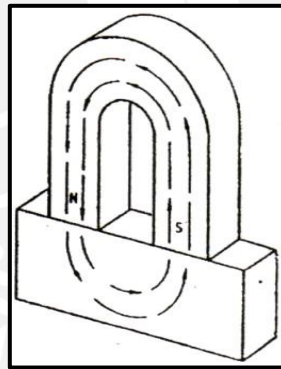


Figura 1.17 – Atracción de un imán (<http://www.manualvuelo.com>)

La fuga del flujo magnético, son líneas de fuerza magnéticas que salen de la superficie magnetizada y viajan a través del aire desde un polo a otro de polaridad opuesta. Esta fuga del flujo magnético (líneas de fuerza) que son forzadas fuera de la zona, permite que las partículas de hierro sean atraídas al entorno de la discontinuidad y se observe la indicación de la discontinuidad.

Teoría de la magnetización

Un objeto es magnetizado cuando una parte o todo su dominio magnético tienen orientado sus polos norte y sur conforme se aprecia en el gráfico de abajo.

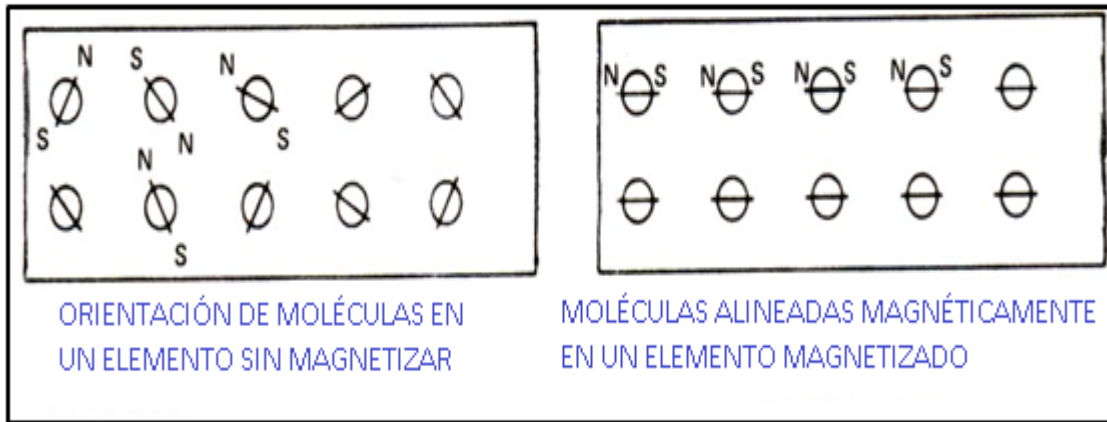


Figura 1.18 – Orientación de moléculas magnetizadas (www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx/)

Los polos norte y sur exhiben atracción y repulsión tal como se muestra en el siguiente gráfico.

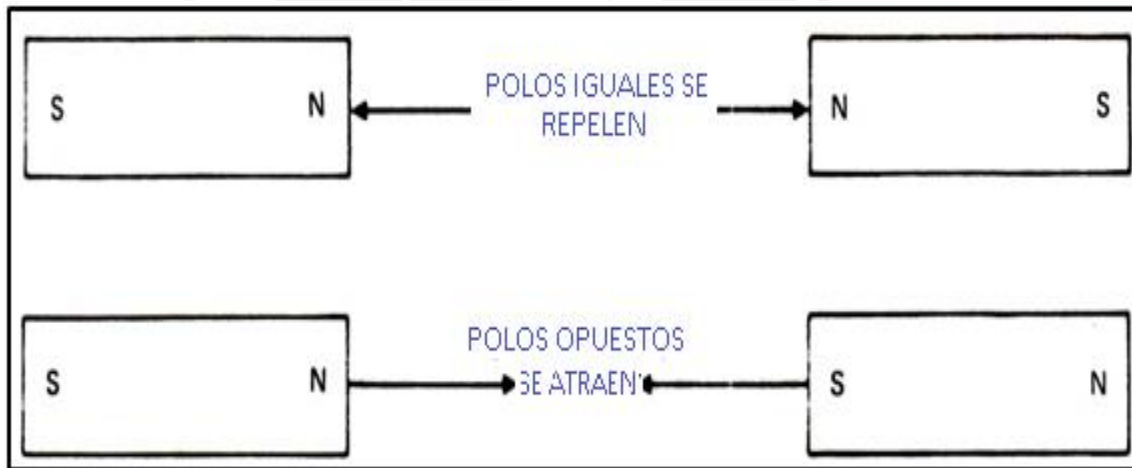


Figura 1.19 – Fuerzas de atracción/repulsión (<http://www.physicstutorials.org>)

La barra magnética desarrolla una fuerza total igual a la suma de todos los dominios magnéticos. Estas son las líneas magnéticas las cuales forman lazos o circuitos cerrados. Todas las líneas de fuerza forman el campo magnético.

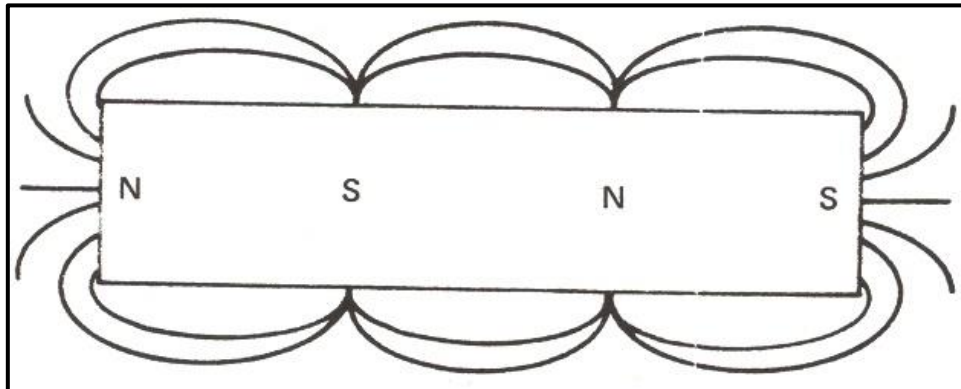


Figura 1.20 – Líneas de Campo magnético (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>)

Materiales Magnéticos

Si un objeto es ubicado en el campo magnético y una fuerza es ejercida sobre él, esto indica que se ha convertido en un objeto magnetizado. La intensidad de la magnetización depende de la susceptibilidad del material que será magnetizado.

Metales Diamagnéticos: Tiene una pequeña y negativa susceptibilidad a la magnetización (ligeramente repelidos). Cobre, plata y oro son ejemplos de materiales diamagnéticos.

Metales Paramagnéticos: Tiene una pequeña y positiva susceptibilidad a la magnetización (ligeramente atraídos).

Metales ferromagnéticos: Tiene una gran y positiva susceptibilidad a la magnetización. Ellos tienen una fuerte atracción y son capaces de retener su magnetización después que el campo magnetizado ha sido removido. Hierro, cobalto y níquel son ejemplos de metales ferromagnéticos.

Las siguientes propiedades de un metal pueden determinar cuan efectivo es el método de partículas magnéticas que será evaluado en una zona o parte.

Estas propiedades son:

1. Permeabilidad: está referido a la facilidad con la cual un flujo magnético es establecido en el artículo a ser inspeccionado.

2. Reluctancia: esta es la oposición de un material magnético al establecimiento de un flujo magnético. Un material con alta permeabilidad, tendrá baja reluctancia.
3. Magnetismo residual: está referido a la cantidad de magnetismo retenido después que la fuerza magnética es removida.
4. Retentividad: se refiere a la capacidad de un material para retener cierta cantidad de magnetismo residual.
5. Fuerza coercitiva: se refiere a la fuerza magnética inversa necesaria para eliminar el magnetismo residual de la zona.

Estas propiedades se pueden relacionar en una curva determinada “Histéresis” la cual se observa a continuación:

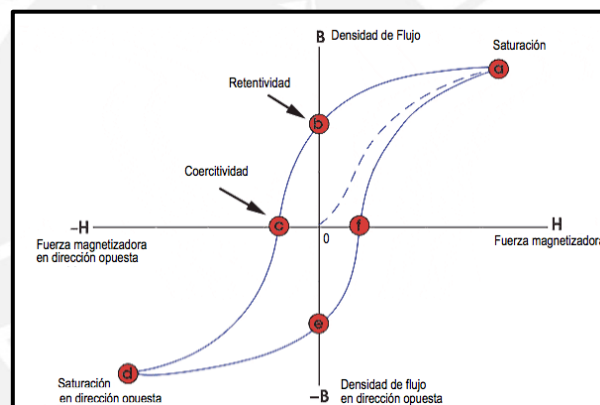


Figura 1.21 – Curva de Histéresis

(<http://tictecnologiasinformacionycomunicacion.wikispaces.com>)

1.4.2. Procedimiento de Ensayo

Se debe tener en cuenta que las discontinuidades son detectables con mayor facilidad cuando se encuentran de manera perpendicular con el campo magnético.

Existen muchos procedimientos de ensayo en este método; sin embargo, se hablará del más común.

- Se debe realizar una limpieza de la zona a inspeccionar.
- Se debe realizar la magnetización mediante un yugo electromagnético.
- Aplicación de partículas ferromagnéticas fluorescentes.
- Aplicación de luz ultravioleta sobre la zona de trabajo.

- Toma de fotografías (evidencia) y caracterización de discontinuidad si hubiese.
- Magnetización a 90° de la primera dirección de magnetización.
- Aplicación de luz ultravioleta sobre la zona de trabajo.
- Toma de fotografías (evidencia) y caracterización de discontinuidad si hubiese.
- Limpieza de la zona de trabajo.
- Desmagnetización de la pieza inspeccionada.
- Verificación de campo magnético utilizando Gaussímetro o equivalente.
- Elaboración de informe.

1.4.3. Equipamiento

Existen diversos métodos de magnetización los cuales son aplicados dependiendo del tipo de componente a inspeccionar. A continuación se hablan de estos métodos de magnetización.

- Tipos de corriente de magnetización:
 - o Corriente alterna rectificadora de onda completa (FWDC) en 1 o 3 fases.
 - o Corriente alterna rectificadora de media onda (HWDC).
 - o Corriente alterna (AC)
- Magnetos permanentes: este método de magnetización solo es utilizado cuando ha sido autorizado por una organización competente.
- Yugos: Cuando se utilice yugos para la magnetización, se debe establecer una fuerza adecuada de campo magnético.
- Aplicación de corriente de magnetización: la corriente alterna rectificadora de onda completa debe ser aplicada para una máxima penetración. La corriente alterna debe ser aplicada para máxima sensibilidad y la corriente alterna rectificadora de media onda para media penetración y media sensibilidad. Este método es adecuado para utilizar con el método seco debido a que crea pulsaciones de campo unidireccional el cual incrementa la movilidad de las partículas.
- Magnetización indirecta: son utilizadas bobinas, cables conductores que van alrededor, yugos, conductores centrales para inducir un campo magnético en una parte cuando no hay contacto eléctrico.

Se debe recalcar que existen partículas magnéticas de varios tipos:

- Partículas magnéticas secas o húmedas (en medio agua o medio kerosene).
- Partículas magnéticas visibles o fluorescentes.

En el caso de la aplicación de partículas magnéticas fluorescentes es necesario utilizar una fuente de luz ultravioleta con el fin de poder observar las discontinuidades que se forman a partir de las partículas.

Algunos equipos utilizados en este método son los siguientes:

- Yugo electromagnético.
- Imanes Permanentes.
- Bobinas magnéticas.
- Lámparas de luz ultravioleta.
- Radiómetros.
- Luxómetros.
- Peso muerto.
- Pie gage.
- Gaussímetro.

Como todos los métodos, este tiene ciertas ventajas y ciertas limitaciones las cuales se señalan a continuación:

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> - Puede revelar discontinuidades que se encuentren debajo de la superficie. - De bajo costo. - Puede inspeccionar materiales porosos. - Ensayo bastante rápido. - Existen equipos bastante compactos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se necesita de un equipo especial para la detección de discontinuidades sub-superficiales (rectificador). - Solo se aplica en materiales ferromagnéticos. - Se necesitan diferentes posiciones de magnetización. - Se tiene que desmagnetizar al finalizar si es requerido.

Tabla 1.3 – Ventajas y Limitaciones con Partículas magnéticas

1.5. Magnetic Flux Leakage (MFL)

Es un ensayo no destructivo que tiene la capacidad de detectar discontinuidades superficiales y sub superficiales. Debido a que el principio de funcionamiento es similar al método de partículas magnéticas, este método solo puede ser aplicado en materiales ferromagnéticos debido a que estos son los únicos que pueden ser magnetizados sin problemas (no se necesita aplicad DC hasta saturar – Efecto Barkhausen)

Es un ensayo no destructivo que consiste en 2 pasos: el primero es el de inducir un campo magnético en la pieza a inspeccionar y el segundo es el de usar un detector sensible de flujo magnético que permita escanear el flujo desviado por las discontinuidades.

Este ensayo se puede aplicar en distintos componentes como planchas (fondo de tanques), cables de acero, tuberías, entre otros, sin importar si es poroso, liso, rugoso, etc.

1.5.1. Fundamentos

El magnetismo es una propiedad que poseen ciertos materiales y que pueden generar una fuerza sobre otro material.

Los materiales ferromagnéticos son los materiales que tienen la característica de ser magnetizados con facilidad. La teoría de la magnetización ya fue explicada en el método de Partículas Magnéticas. Esta teoría explica gran parte del principio de este método.

Como se mencionó anteriormente, cuando un campo magnético ha sido creado y atraviesa por una discontinuidad, una disrupción es producida por el alineamiento de los dominios magnéticos en el entorno de esta. El flujo desviado que se produce es captado por ciertos sensores que permiten analizar ciertas características de la discontinuidad. Estos sensores pueden ser:

- Bobinas de inductivas.
- Sensores de efecto hall.
- Magnetómetro de compuerta de flujo.
- Magnetodiodo.
- Sistemas de cinta magnética.

- Sensores de resonancia magnética.

Estos conectores están conectados a una serie de circuitos y mediante un software avanzado permite mostrar la información captada en una pantalla de visualización.

Algunas discontinuidades encontradas por MFL:

- Solapes.
- Seams.
- Grietas.
- Inclusiones subsuperficiales.
- Poros.
- Laminaciones.
- Picaduras.

1.5.2. Procedimiento de Ensayo

Debido a la gran aplicación de este método, existen una variedad de procedimientos de inspección, por tal razón se mencionará sobre un procedimiento de inspección en planchas de acero.

- Inspección visual a la zona de trabajo.
- Determinación de obstáculos (lugares de difícil acceso para el escaneo)
- Calibración del equipo.
- Escaneo de la plancha de acero.
- Verificación de problemas en tiempo real.
- Caracterización de las discontinuidades.
- Elaboración de Informe.

1.5.3. Equipamiento

Sensores utilizados en inspección mediante MFL

1. Bobina

Es la más utilizada en MFL debido a la larga zona de inspección en los elementos. Pueden ser colocadas de forma paralela o perpendicular a la cara de inspección. Se pueden utilizar arreglos de bobinas con el fin de obtener una mayor cobertura.

2. Sensores de efecto Hall

Son cristales de material semiconductor, cuando la corriente pasa a través de ellos y estos elementos se encuentran en presencia de un campo magnético, se genera un voltaje a través de las dos caras del cristal.

3. Magnetómetro de compuerta de flujo

Estos elementos también referidos como probetas Forster, son dispositivos que miden los campos magnéticos, utilizando las características magnéticas no lineales de los materiales ferromagnéticos que se usan para la medición. Las características de la barra y de la corriente son tales que, los cambios de magnetización inducidos por la fuga del campo afectan a la bobina receptora.

4. Magnetodiodo

Es un dispositivo de estado líquido, cuya resistencia varía con la intensidad del campo magnético. La fuga de flujo magnético es excitada por electromagnetos de corriente alterna, de tal forma que el arreglo, permite detectar discontinuidades internas o externas abiertas en la superficie.

5. Sensores de resonancia magnética

Los magnetómetros de resonancia magnética nuclear, están basados en el principio, que las frecuencias atómicas también son dependientes de la capacidad del campo magnético. Cuando un núcleo atómico es ubicado en un campo magnético constante y sometido a un campo magnético alternante de alta frecuencia, la absorción de energía resonante del campo magnético toma lugar. La absorción siempre toma lugar a una relación fija entre el campo constante y la frecuencia del campo alternante. Entonces midiendo la frecuencia resonante, se podrá medir el campo magnético constante.

A continuación se presentan las ventajas y limitaciones del método MFL:

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none">- Las inspecciones se realizan con gran rapidez.- Verificación de problemas en tiempo real.- Evidencia de buena calidad gracias al software avanzado.	<ul style="list-style-type: none">- Equipo de alto costo.- Se necesita personal calificado.- Se requiere de una calibración.

Tabla 1.4 – Ventajas y Limitaciones con MFL



Capítulo 2

MÉTODO NO DESTRUCTIVO - EMISIÓN ACÚSTICA

La evaluación por medio de emisión acústica es un rápido ensayo no destructivo con capacidades demostradas para monitorear la integridad estructural, detectar fugas, fallas incipientes en equipos mecánicos y caracterizar el comportamiento de materiales.

2.1. Conceptos básicos

2.1.1. El fenómeno de la Emisión Acústica

La definición de Emisión Acústica (EA) es la clase de fenómeno que produce ondas elásticas transitorias generadas por un cambio de energía que se da en un material al tener una deformación. La primera investigación bien documentada de emisión acústica en los metales fue hecha en Alemania por Joseph Kaiser en 1950. Él informó que todos los metales examinados (zinc, acero, aluminio, cobre y plomo) exhiben el fenómeno de Emisión Acústica. El uso de la emisión acústica como técnica de inspección no destructiva ha estado en desarrollo durante mucho tiempo y también en la actualidad la actividad de desarrollo está todavía en progreso. Debido a que la emisión acústica es un método cualitativo, es fundamental utilizar una segunda prueba no destructiva complementaria con la finalidad de caracterizar problemas potenciales.

2.1.2. Características de la Emisión Acústica

El objetivo principal de una evaluación de este método alternativo, es realizar un control volumétrico al 100% para localizar y controlar las fuentes de emisión acústica causados por el crecimiento o evolución de defectos y/o discontinuidad en el material generado por un esfuerzo aplicado. Las propiedades y la condición estructural del material, el tipo y la amplitud de esfuerzo aplicado, y la velocidad de la aplicación de esfuerzo son factores significativos que afectan la evaluación.

Las ondas acústicas son captadas por sensores adecuados, colocados en la superficie del componente bajo examen, que convierten el movimiento en la superficie del material en una señal eléctrica.

Estas señales se procesan y se analizan mediante una instrumentación adecuada para localizar las fuentes de emisión acústica.

Puede detectar lo siguiente:

- Movimiento de dislocaciones (deformaciones plásticas)
- Las grietas por fatiga.
- Grietas por carga.
- Corrosión bajo carga cíclica.
- Corrosión.
- Fragilización por hidrógeno.
- La fricción.
- Impacto mecánico.
- Ebullición.
- Cavitaciones.
- Fugas.
- Monitorización del crecimiento de grieta.
- Evaluación de integridad estructural.
- Seguimiento de la evolución.

La emisión acústica se trata de un método pasivo y se aplica solo cuando el material es sometido a un esfuerzo o durante funcionamiento. Generalmente se trata de un proceso irreversible y es sensible al efecto Kaiser, principio bajo el cual se evalúan materiales metálicos.

La emisión acústica se detecta a partir de un bajo nivel de carga hasta la ruptura, pero solo si el material no ha sido esforzado o cargado previamente a niveles de carga superiores al de la evaluación. Por lo tanto, no hay actividad de emisión acústica hasta la carga máxima aplicada previamente.

Durante la examinación, no se tiene control sobre el mecanismo de generación de sonido; sin embargo, es posible someter un material a las condiciones que harán la producción de emisión acústica. Estas pueden ser un alto nivel de esfuerzo o una alta temperatura que producen una inestabilidad en el material.

Las señales de emisión acústica son de dos tipos:

- Señales continuas: este tipo de señal está presente en todo momento, se analiza la amplitud y frecuencia. (Fig. 2.1)
- Señales transitorias: constan de puntos iniciales y puntos finales. (Fig. 2.2)

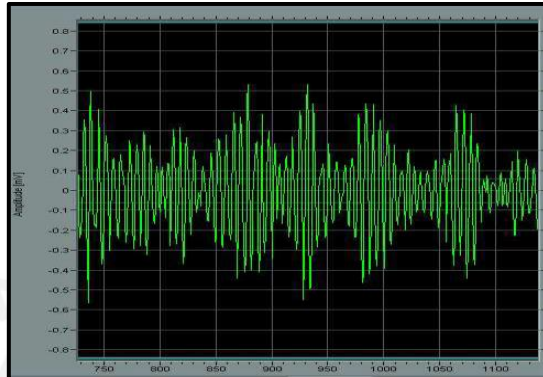


Figura 2.1 Señal Continua [2]

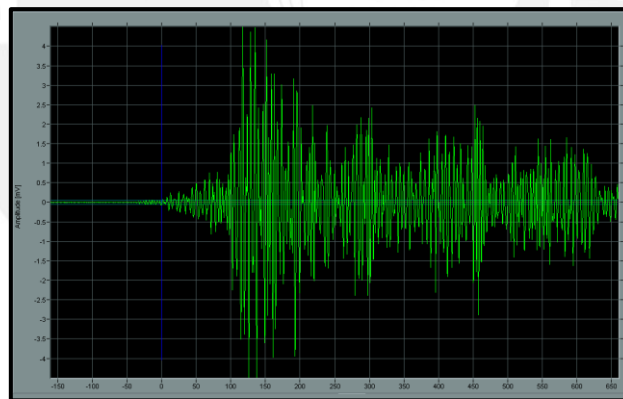


Figura 2.2 Señal transitoria [2]

Cada tipo de daño es característico de cierto nivel de amplitud (decibelios), razón por la cual es conveniente saber qué tipo de falla se espera encontrar en el componente que está siendo evaluado. A continuación se muestra un cuadro en el que se observa qué amplitud se genera para cada tipo de daño:

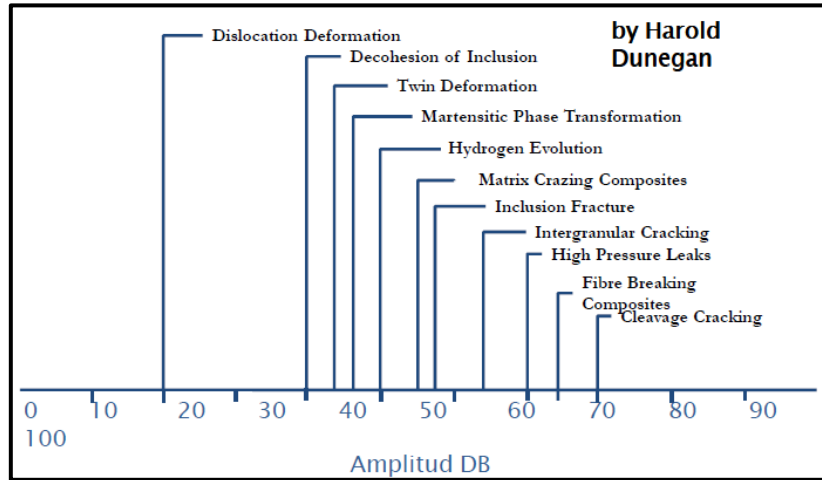


Figura 2.3 Discontinuidades vs Amplitud [2]

Por otro lado, se ha estudiado qué tipos de falla pueden ser encontradas según el rango de frecuencias de los sensores seleccionados en la evaluación por emisión acústica. A continuación se muestra el rango de frecuencia de varios tipos de estudios de emisión acústica.

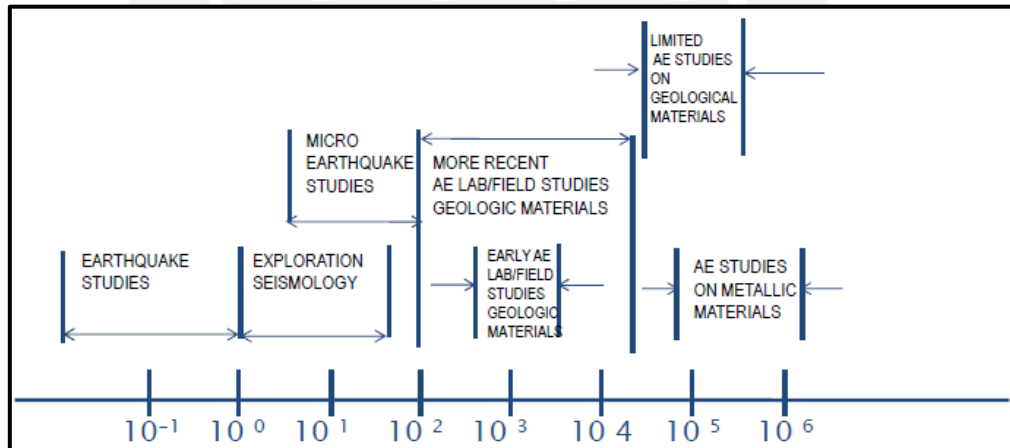


Figura 2.4 Tipos de Falla vs Frecuencia [2]

Aplicación	20 – 100 kHz	100 – 400 kHz	>400 kHz
Detección de corrosión en fondo de tanque	X		
Detección de fugas en tuberías (agua/combustible)	X		
Detección de fisura		X	
Pruebas de integridad de recipientes a presión		X	
Detección de descargas parciales	X (cuando el ruido es bajo)	X	
Pruebas de integridad de estructuras metálicas		X	
Pruebas de integridad de materiales compuestos		X	
Pruebas de integridad de estructuras de concreto	X		
Monitorio en procesos de secado de madera		X	
Pruebas en pequeños especímenes			X

Tabla 2.1 Falla vs Frecuencia [2]

2.1.3. Mediciones de Emisión Acústica

Tipos de mecanismo que pueden producir señal transitoria:

- Crecimiento de los defectos.
- Antelación de grieta.
- Inclusiones y fractura.
- Degradación de la superficie debida a la corrosión, la rotura de óxido, la desunión de los revestimientos.
- Degradación en material compuesto de fibras o rotura de la matriz, delaminación, deslizamiento fibra-matriz, etc.

Parámetros de medición en una señal transitoria:

- Hora de llegada.
- Amplitud.
- Duración.
- Energía.
- Tiempo de subida de forma de onda.
- Delta t.
- Orden de llegada a los sensores.
- Función de distribución.

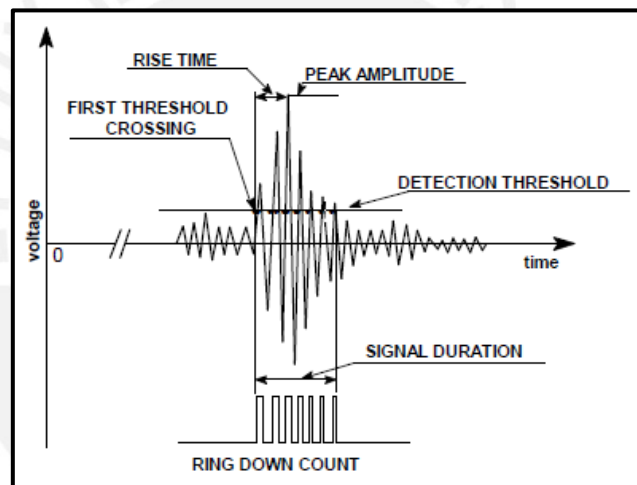


Figura 2.5 Elementos de una onda [2]

Tipos de mecanismos que producen señales continuas:

- Procesos de fabricación.
- Ruido acústico asociado a un proceso de soldadura.
- Ruido asociado al trabajo mecánico: torneado, fresado, fabricación superficial.
- Fugas y ruidos de flujo.
- Pérdidas desde los accesorios de los componentes presurizados.
- Fugas en la válvula.

Parámetros de medición en una señal continua:

- RMS
- Espectros de energía, intercambio de espectros.
- Tiempo correlación, correlación cruzada.
- Coherencia.
- Función que describe la actividad acústica.
- Parámetros externos.

Atenuación

El término atenuación se utiliza generalmente para describir la disminución de la amplitud de una onda que se produce al viajar a través de un medio.

La causa de la atenuación puede ser identificada como:

- Geométrica.
- Estructural.
- Debida a los medios de comunicación adyacentes.

La atenuación será función de:

- Frecuencia de onda.
- Tipo de material.
- Distancia recorrida por la onda.

Atenuación Geométrica

La atenuación geométrica consiste en la pérdida de energía que se da principalmente debido a la distancia que recorre la onda. Una fuente de energía esférica irradia en todas las direcciones, por tal motivo a medida que un cuerpo se aleja de esta fuente de energía, la energía recibida por el cuerpo disminuye.

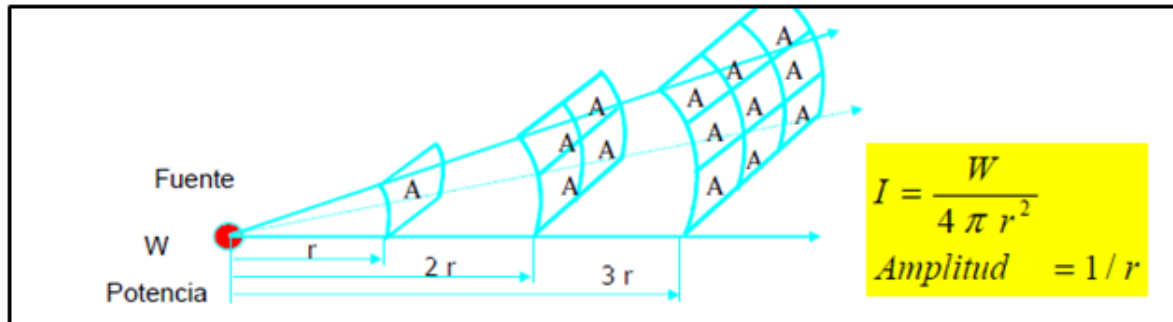


Figura 2.6 Atenuación geométrica – Esférica [2]

I= Intensidad

W= Potencia

r= radio

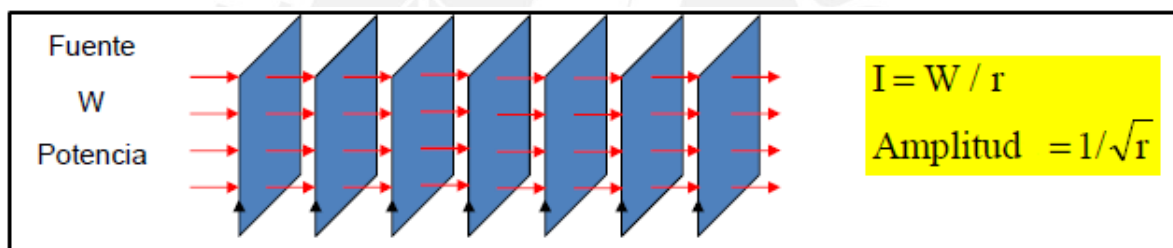


Figura 2.7 Atenuación geométrica – Lineal [2]

Atenuación Estructural

La atenuación estructural está compuesta por varios mecanismos:

- Absorción de la energía por los medios de comunicación, la cual se transforma en calor.
- Dispersión debida a la refracción, reflexión y difracción de la onda que se propaga en todas las direcciones encontrándose con discontinuidades como inclusiones, poros, grietas, hendiduras, etc.
- Diferencias de dispersión de la velocidad para los distintos modos de onda.

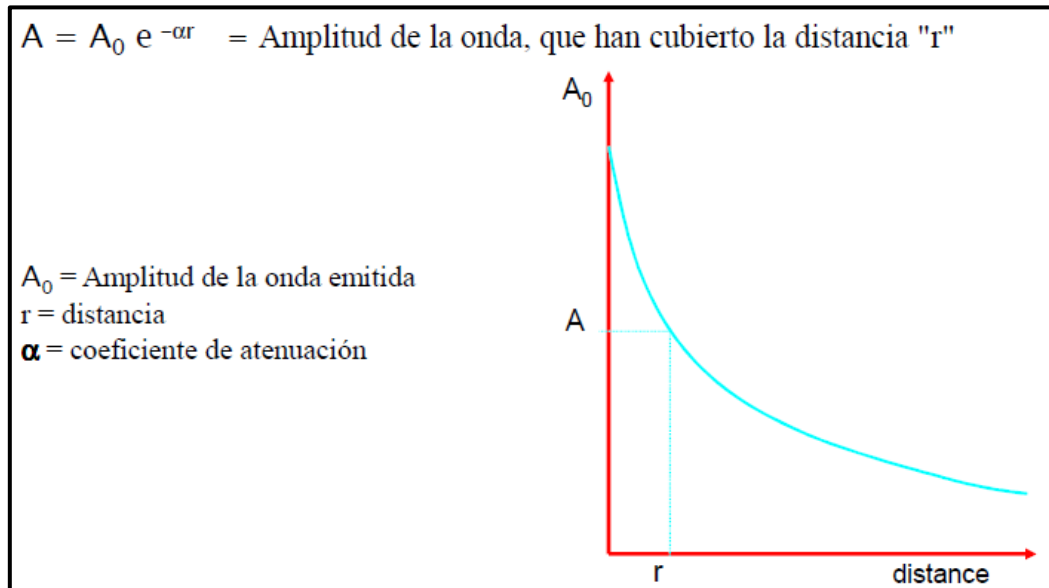


Figura 2.8 Atenuación estructural [2]

Atenuación en medio adyacente

Durante la prueba de emisión acústica se encuentran distintos elementos de atenuación, los cuales se deben de agregar como factores de atenuación a lo antes ya mencionado (estructurales, geométricos). Algunos de estos elementos son:

- Fluidos.
- Pinturas.
- Revestimientos.
- Aislamiento.
- Tierra.

En condiciones normales, es posible predecir analíticamente el factor de atenuación de ciertas estructuras; sin embargo, podría medirse también experimentalmente en la estructura. Debido a la atenuación, el monitoreo de una gran estructura requiere el uso de un gran número de sensores colocados adecuadamente para asegurar la capacidad de detección de los eventos de emisión acústica generados en cualquier parte de la estructura.

Impedancia acústica

Cada material se caracteriza en relación a la propagación de ondas acústicas, la cual depende de su impedancia acústica.

$$Z = \rho * V$$

ρ = densidad ó masa específica del material (kg/m^3)

V = Velocidad de la onda (m/sec)

El valor dimensional de la impedancia es $Z = \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

En conclusión, la impedancia acústica para un material dado es la resistencia del material al paso del sonido.

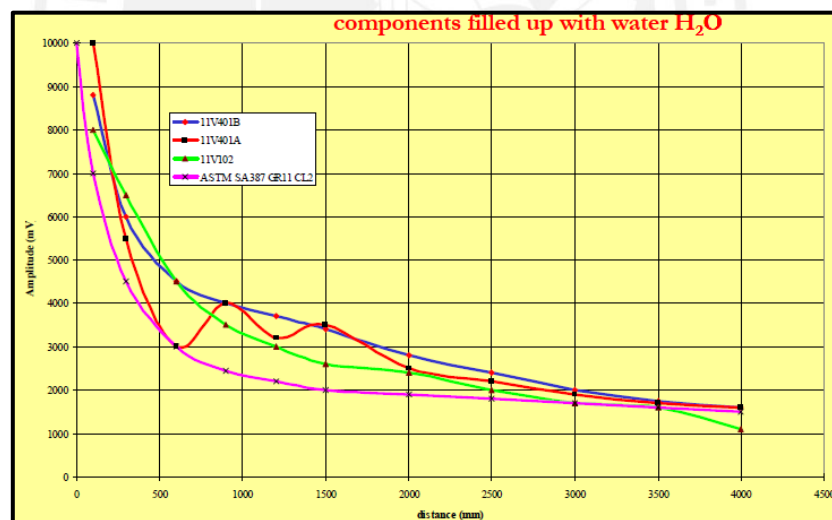


Figura 2.9 Curvas de atenuación [2]

Propagación de las ondas

Las señales de emisión acústica son las respuestas de un sensor a una onda de sonido producida en un medio sólido.

Estas ondas son similares a las que se propagan en el aire o en un fluido, pero más complejas debido a que el medio sólido ofrece una resistencia a las fuerzas de cizallamiento generadas. Los tipos de ondas pueden variar en función de la dimensión del medio en que se generan y se propagan. Con precisión se consideran los siguientes casos:

- Medio infinito.
- Medio semi-infinito (con una superficie)
- Placa infinita (con dos superficies)

El enlace entre la fuente y la señal de la emisión acústica producida por el sensor es la onda acústica. Todos los materiales están compuestos de átomos. Para muy bajas frecuencias de los movimientos atómicos, el acoplamiento puede extenderse sobre un gran número de átomos (gran penetración). Este movimiento correlacionado de una gama larga de átomos es una onda acústica la cual corresponde a muchos átomos desplazados en la misma dirección desde su equilibrio. Este movimiento es una deformación local en la estructura cristalina. Esta deformación es dinámica y el movimiento atómico es casi oscilatorio.

En un medio, una onda tiene una componente espacial y otra temporal. La frecuencia, longitud de onda y la velocidad están estrechamente relacionadas de la siguiente manera:

$$V = \lambda * f$$

V = Velocidad

λ = Longitud de onda

f = frecuencia

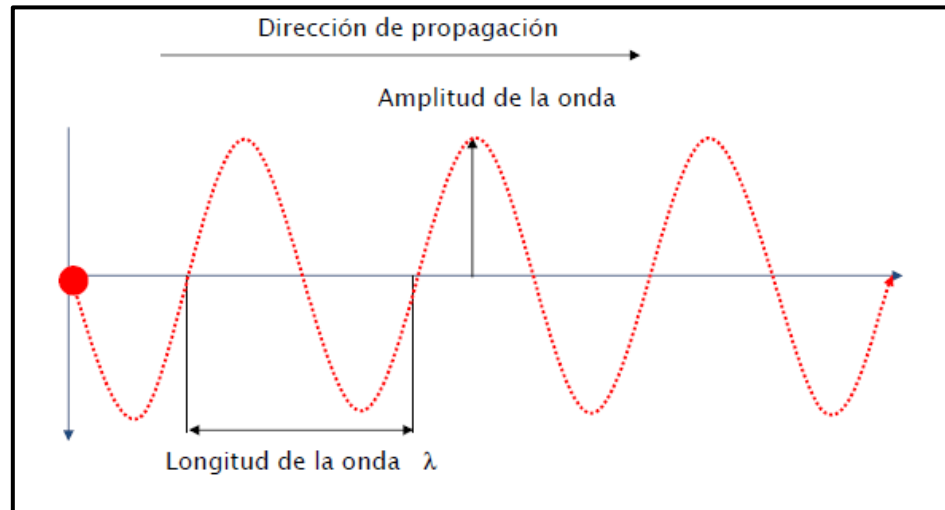


Figura 2.10 Onda Sinusoidal [2]

Definiciones:

Velocidad (V): Velocidad de Desplazamiento (cm/s)

Frecuencia (f): Ciclos o vibraciones por segundo (1/s)

Longitud de la onda (λ): Distancia que el sonido recorre en un ciclo (cm)

Una onda acústica puede existir en cualquier material: un sólido, un líquido o un gas. Su velocidad se determina por la característica del material.

$$V_i = \sqrt{C_i * \rho}$$

V_i = Velocidad de tipos de ondas.

C_i = constante elástica.

ρ = densidad del material

La constante elástica es una medida de la fuerza de acoplamiento entre los átomos para ese tipo particular de movimiento. Con fuerza de acoplamiento, nos referimos a la fuerza

que existe en el enlace atómico. Diferentes movimientos relativos de los átomos tendrán diferentes valores de la constante elástica. La velocidad de la onda debe ser directamente proporcional a la fuerza atómica (constante elástica) e inversamente proporcional a la densidad.

La siguiente tabla reduce algunos modos de onda en forma sólida.

Tipos de onda en sólidos	Vibración de partículas
Longitudinal	Paralela a la dirección de onda
Transversal	Perpendicular a la dirección de onda
Superficiales	Orbital elíptica – simétrica
De plato – Lamb	Componente perpendicular a la superficie
De plato – Love	Paralelo a la capa de plano – perpendicular a la dirección de onda
De Rayleigh	Onda guiada a lo largo de la interface

Tabla 2.5 Tipo de onda vs Vibración de partículas [2]

2.1.4. Tipos de onda acústica

El tipo de onda está determinado por la correlación entre el movimiento de las partículas y la dirección de propagación de las ondas.

- Onda longitudinal o de compresión (Fig. 2.11):
 - o La molécula vibra en la dirección de la propagación del sonido.
 - o La forma de onda es producida por una serie alternativa de compresión y expansión.
 - o Existe en todos los estados de la materia.
 - o Es el modo más rápido de todos los que se originan.
 - o Casi todos los otros modos se originan como ondas longitudinales y luego son convertidos.

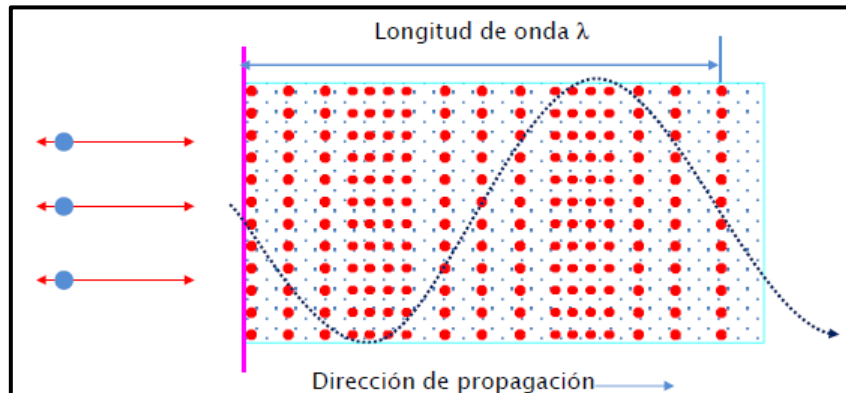


Figura 2.11 Onda Longitudinal [2]

- Onda transversal o de corte (Fig. 2.12):
 - La molécula vibra a 90° respecto a la dirección de propagación del sonido.
 - La forma de onda producida tiene un movimiento similar al de una serpiente.
 - Existe solo en materia sólida.
 - Aproximadamente tiene la mitad de velocidad de las ondas longitudinales.



Figura 2.12 Onda Transversal [2]

- Ondas de Rayleigh (Fig. 2.13):
 - Junto a las ondas transversales y longitudinales se generan las ondas de superficie o Rayleigh que viajan sobre la superficie e ingresan a una profundidad de una longitud de onda.
 - El movimiento de las partículas tienen una órbita elíptica.

- La propagación es a lo largo de la superficie y su velocidad es de aproximadamente 0.9 veces la velocidad transversal.
- Este tipo de onda es la más favorable para la localización de fuentes de emisión acústica debido a que es no dispersiva.
- Son como ondas de agua, excepto que el movimiento de las partículas son elípticas y no circulares.
- Existe solo en la interfaz entre sólido y gas.
- El espesor del material debe ser mayor de aproximadamente una longitud de onda.
- La mayor parte de la energía del sonido se concentra en la superficie.

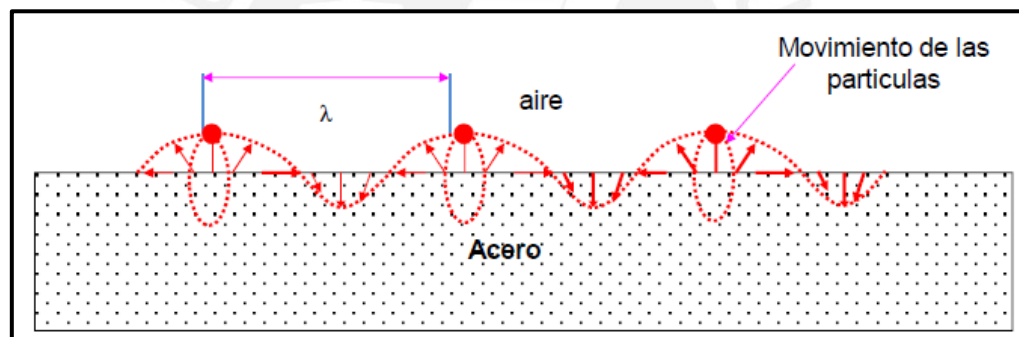


Figura 2.13 Onda Rayleigh [2]

- Onda de Lamb (Fig. 2.14):
 - Se generan cuando la longitud de onda es comparable con el espesor del material debido a la reflexión de las ondas longitudinales y transversales en las dos placas de la superficie.
 - Se trata de una onda dispersiva pues la velocidad de propagación varía con la frecuencia.
 - La amplitud relativa de movimiento paralelos y perpendiculares a la placa depende en gran medida del modo y la frecuencia.
 - Se tienen dos tipos de ondas Lamb: simétricas y asimétricas.
 - La señal de salida del sensor de emisión acústica es la resultante de la suma de las ondas directas y reflejadas.

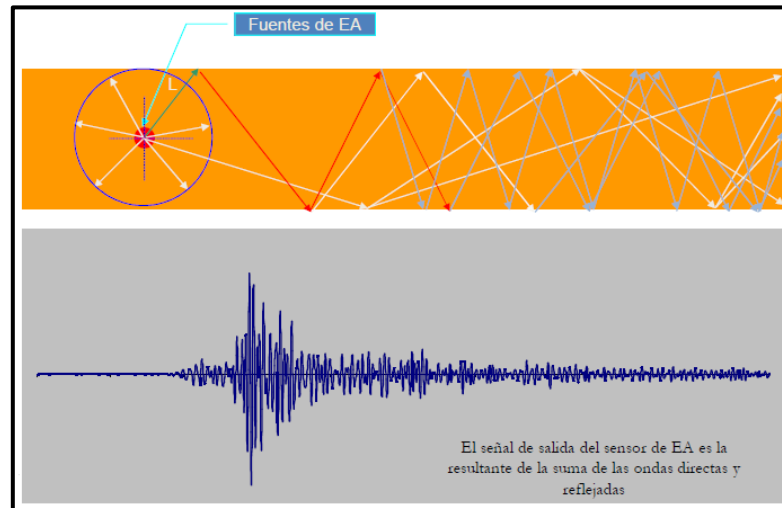


Figura 2.14 Propagación de Onda Lamb [2]

Las ondas de Lamb simétricas (Fig. 2.15) pueden existir en un número complejo de movimiento de las partículas.

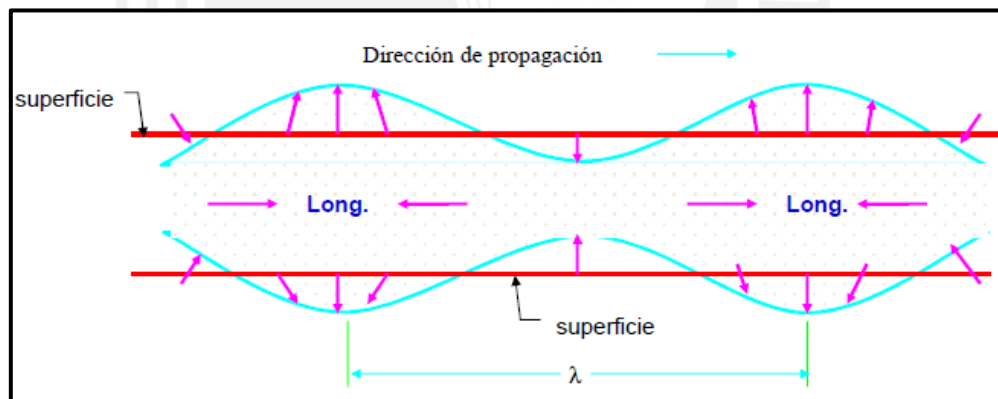


Figura 2.15 Onda Lamb simétrica [2]

Para la generación de ondas de Lamb asimétricas (Fig. 2.16), el espesor del material debe ser una longitud de onda o menos. Posee una velocidad menor que la onda transversal pero es variable.

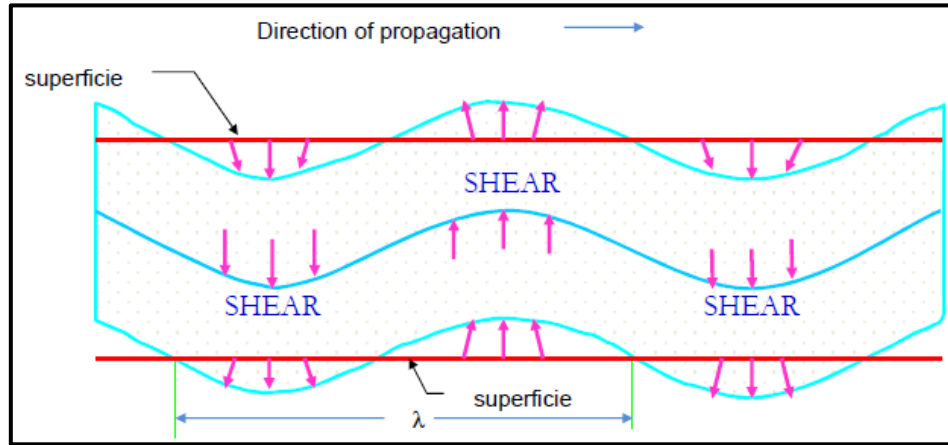


Figura 2.16 Onda Lamb Asimétrica [2]

Reflexión – Transmisión

La reflexión y transmisión de las ondas acústicas en una interface dependen de la impedancia acústica característica de los dos materiales.

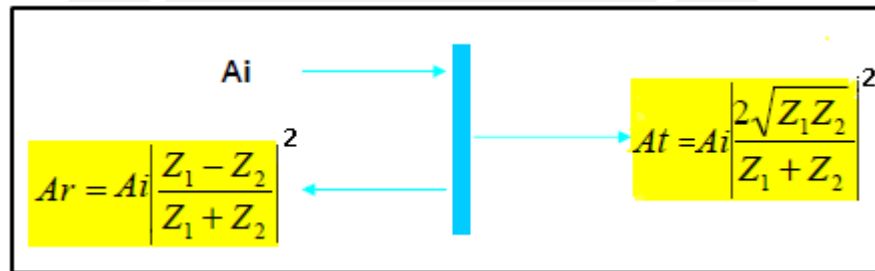


Figura 2.17 Transmisión – Reflexión [2]

Ai = Amplitud de la onda incidente.

Ar = Amplitud de la onda reflejada.

At = Amplitud de la onda transmitida.

*Asumiendo que una onda longitudinal llega de manera oblicua a la interfaz con un ángulo de incidencia “i”:

Esta onda se refleja y se divide en dos tipos de ondas:

1. Longitudinal con un ángulo de reflexión R_L tales como $R_L = i$
2. Transversal con un ángulo de R_T , tal que $R_T > R_L$

El proceso de división se conoce como: MODO DE CONVERSIÓN.

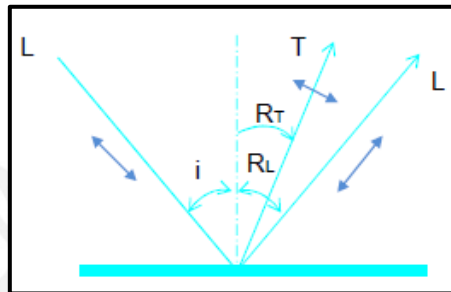


Figura 2.18 Reflexión – Conversión [2]

Refracción

Tal como los fenómenos de reflexión, también hay un fenómeno de refracción con una división de la onda incidente en dos tipos de onda: Longitudinal y Transversal. Como en el caso anterior, el ángulo de refracción r_L para la onda L será siempre mayor que el ángulo r_T de la onda de refracción.

Cuando una onda plana golpea un interface, los ángulos de reflexión y transmisión se rigen por la “Ley de Snell”.

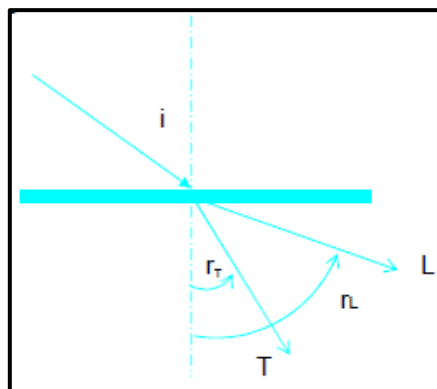


Figura 2.19 Refracción [2]

Una onda acústica con un ángulo incidente que no sea perpendicular, se convertirá en otros modos de onda. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Comparación con otros métodos de ensayos no destructivos

- La energía que se detecta se libera desde el interior del material en lugar de ser suministrado por el método no destructivo tal como en radiografía o ultrasonido.
- Se trata de una inspección volumétrica la cual permite la evaluación de la integridad del componente.
- Permite el control de las zonas sin acceso a las pruebas no destructivas convencionales.
- Se puede aplicar con el sistema en operación.
- Permite un control en tiempo real de los componentes sometidos a carga severa evitando la posibilidad de una falla catastrófica.
- La emisión acústica es capaz de detectar procesos dinámicos asociados con la degradación de la integridad estructural.

2.1.5. Principio de Emisión Acústica

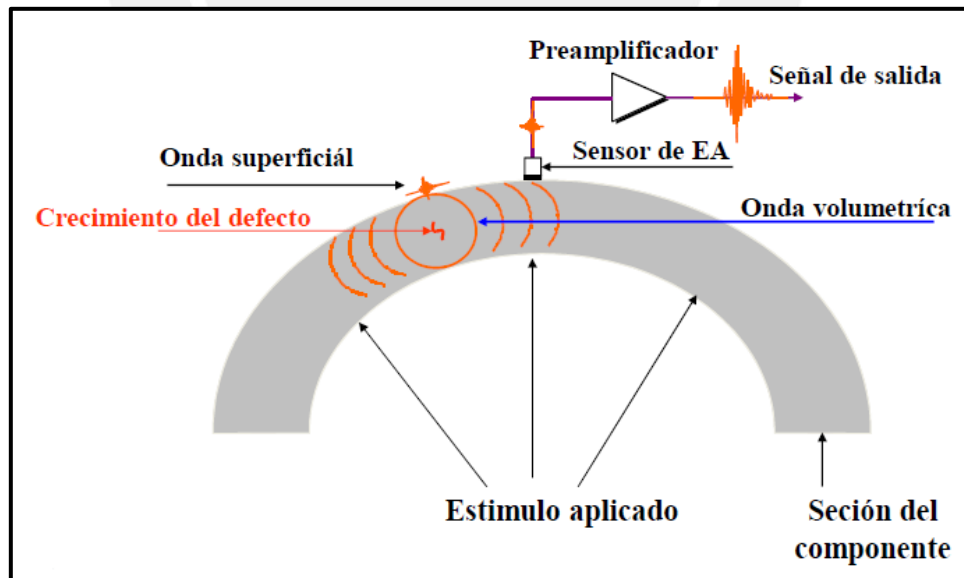


Figura 2.20 Principio de EA [2]

El principio de esta técnica está basado en el efecto Kaiser el cual indica que si a un material se le aplica una carga mayor a la de trabajo, entonces este va a liberar energía en forma de ondas. La energía que es liberada en este proceso, puede ser captada por algunos sofisticados sensores y mediante un proceso (software) se analizan y se puede identificar si existe algún problema con el sistema que altere su funcionalidad.

El concepto básico de la emisión acústica consiste en aplicar un estímulo al material o estructura hasta localizar un punto de cedencia del material. Este punto de cedencia produce una onda de esfuerzo que se propaga elásticamente por la estructura. En algún punto llega a la superficie y estimula un sensor piezoeléctrico. Este sensor convierte la energía mecánica en una señal eléctrica que se amplifica para el proceso de los análisis.

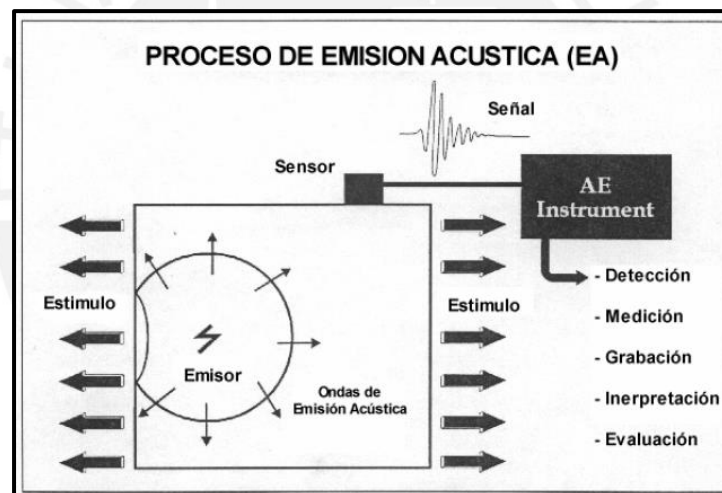


Figura 2.21 – Proceso de emisión acústica [5]

Efecto Kaiser

Una característica importante de emisión acústica es su respuesta irreversible en muchos metales. Esta característica de los metales se ha evidenciado en 1950 por Josef Kaiser de la que tomó el nombre y se define como la ausencia de detectar emisión acústica hasta que no se haya alcanzado previamente el nivel de esfuerzo.

La emisión acústica se crea por la formación o propagación, bajo una carga aplicada, de un “defecto” como una grieta, una avalancha de dislocaciones, descohesión de una interface, etc.

Si se desea producir nuevamente una emisión acústica a partir del mismo defecto, se deberá esforzar el sistema a un esfuerzo mayor al que se esforzó anteriormente para producir la emisión acústica. El nivel de la presencia del efecto Kaiser varía con los metales y puede desaparecer por completo para la aleación con características de recocido a temperatura ambiente.

Se ha demostrado que este efecto no es permanente y que el efecto Kaiser podría disminuir en función de la duración del intervalo entre la aplicación sucesiva de esfuerzo y a la temperatura a la que los materiales han sido sometidos, entre uno y el otro esfuerzo. Esta condición se cumplirá siempre que los defectos no se alteren de forma irreversible durante la descarga, recarga o entre la descarga y recarga.

Es esencial que no haya nuevas fuente de emisión acústica generadas durante el ciclo de descarga – recarga. Estas condiciones son a menudo cumplidas y el efecto Kaiser se observa para muchos materiales. Los más graves errores de las condiciones requeridas para el efecto Kaiser surgen de procesos activados térmicamente.

Los efectos de los procesos activados térmicamente pueden ser acelerados por una temperatura elevada entre la descarga y ciclos de recarga.

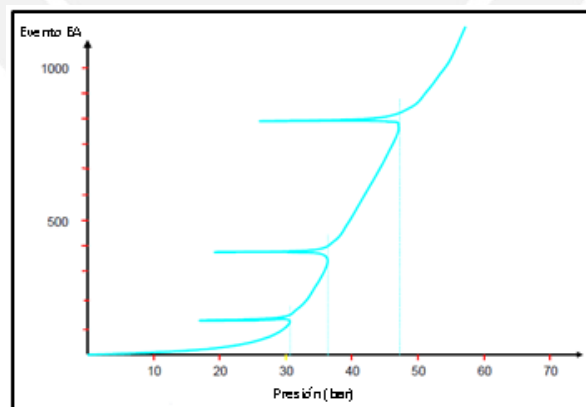


Figura 2.22 Efecto Kaiser [2]

Equipamiento

Instrumentación de prueba de emisión acústica:

- Instrumentación.
- Acondicionamiento de señal.
- El ruido del sistema de emisión acústica.
- Los lazos de tierra.
- Acoplamiento electrostático.
- Acoplamiento magnético.
- Acondicionamiento de señal – Filtros.
- Acondicionamiento de señal – Amplificador de potencia.
- Convertidor de audio – Elementos.
- El digitalizador de señal de emisión acústica – Elementos.
- Las unidades de medida de amplificación.
- Procesamiento de señales.

La aplicación de la técnica de emisión acústica requiere un sistema capaz de adquirir, procesar, visualizar y almacenar los datos en tiempo real. El equipo de emisión acústica será elegido para garantizar la correcta aplicación del método, llevar a cabo una prueba completa de emisión acústica, incluso si se trata de una aplicación particular.

Dependiendo del tipo de aplicación y el tipo de información requerida, la instrumentación de emisión acústica puede ser de un solo canal y aumentar hasta un sistema multicanal con un sofisticado software de elaboración y presentación de los datos de emisión acústica. A medida que sea más complicada la instrumentación elegida, mayor será la necesidad de que el operador entienda mejor la funcionalidad del sistema de emisión acústica.

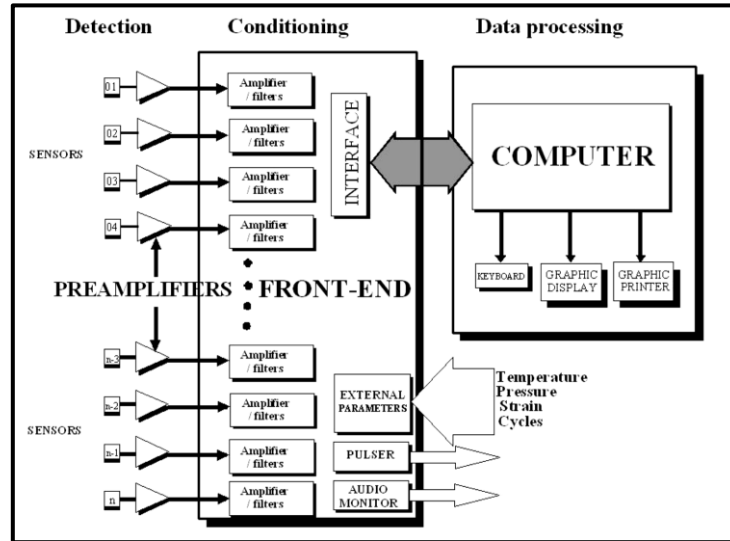


Figura 2.24 Sistema completo de EA [5]

En la siguiente imagen podemos observar sistemas de emisión acústica y solo se diferencian en la cantidad de canales.



Figura 2.25 Equipos de EA – Multicanales (www.xcelinspection.com)

El operador de emisión acústica quien está utilizando un sofisticado sistema, debe tener conocimiento de la electrónica y del software para gestionar correctamente todas las características del equipo con la finalidad de configurar correctamente el equipo y producir una adecuada adquisición de los datos de emisión acústica durante la evaluación. En particular, deberán ser capaces de:

- Seleccionar la frecuencia adecuada para los sensores.
- Hacer la configuración de filtros y de ganancia.
- Hacer una correcta calibración.
- Hacer la configuración del registro de transitorios para la captura de forma de onda.
- Hacer la configuración de la adquisición de parámetros externos como por ejemplo, para adquirir presión, temperatura, ciclos o cualquier otra cantidad física significativa.
- Seleccionar la presentación de la pantalla adecuado para el análisis en tiempo real y otra característica importante en relación con la prueba.

La instrumentación para medir la emisión acústica es especializada y compleja. Los principales elementos son los siguientes:

- Sensor: un elemento piezoeléctrico en contacto con la estructura que convierte la onda elástica con un bajo nivel a una señal eléctrica de alta impedancia (Fig. 2.26).
- Preamplificador: un elemento para amplificar y filtrar la señal del sensor y convertirlo en una señal de baja impedancia para la transmisión de larga distancia mediante cables coaxiales.
- Amplificador: con una amplificación variable para permitir una amplificación total de hasta 100 dB.
- Procesamiento de señales, para caracterizar una señal de emisión acústica y obtener información sobre el pico de amplitud, duración, tiempo, energía, tiempo de retardo, parámetros externos, forma de onda de la señal de emisión acústica.
- Sistema multicanal: usado para adquirir señales de varios sensores para localizar las fuentes de emisión acústica durante un control en tiempo real.

- Convertidor de audio: las señales de emisión acústica se convierten a una de baja frecuencia para permitir al operador escuchar estas señales.
- Registrador de transitorios: este instrumento digitaliza en tiempo real la señal de emisión acústica y almacena los datos digitalizados en la memoria. La señal se reconstruye sucesivamente por medio de la memoria a una baja velocidad y se reproduce en un osciloscopio o un analizador de espectro. Este instrumento es particularmente útil para el análisis de forma de onda de las señales de emisión acústica.
- Circuitos de coincidencia o sensores maestros y de guardia: la discriminación espacial es una técnica para la aceptación de las señales de emisión acústica generadas dentro de un área específica. Otras técnicas utilizadas para la discriminación espacial son sensores de guardia.



Figura 2.26 Sensores de EA (www.ndtingenieros.es)

Las señales son recibidas por un conector BNC y son enviados a través de un filtro para reducir la señal de baja frecuencia y eliminar cualquier posible fuente de interferencia o ruido. Después de la filtración, la señal se amplifica y el estado final regula la impedancia de salida a 50 ohmios para coincidir con la condición del cable coaxial hasta la sección de amplificación posterior.



Figura 2.27 Cable Coaxial (www.muellerelectric.com)

Acoplamiento electrostático

Acercando el sensor y el preamplificador mediante una carcasa de metal y utilizando una conexión con conectores y cables blindados, no habrá contribución de ruido a partir del acoplamiento electrostático.

Acoplamiento magnético

Este tipo de acoplamiento no es fácilmente eliminable. Puede ser posible que se elimine este tipo de problemas mediante el posicionamiento de los cables de señal perpendicular al conductor que lleva el ruido para minimizar el acoplamiento.

Filtros

Hay cuatro tipos de filtros básicos:

- Paso bajo: rechaza las señales de alta frecuencia, y hacer pasar las señales de baja frecuencia.
- Paso alto: rechaza las señales de baja frecuencia, y hace pasar las señales de alta frecuencia.
- Ancho de banda: rechaza las señales sobre y por debajo de dos frecuencias establecidas, y hace pasar las señales de frecuencia dentro de ellas.

- Inverso de ancho de banda: rechaza las señales entre dos frecuencias establecidas y hace pasar las señales de arriba y las señales por debajo de esos límites.

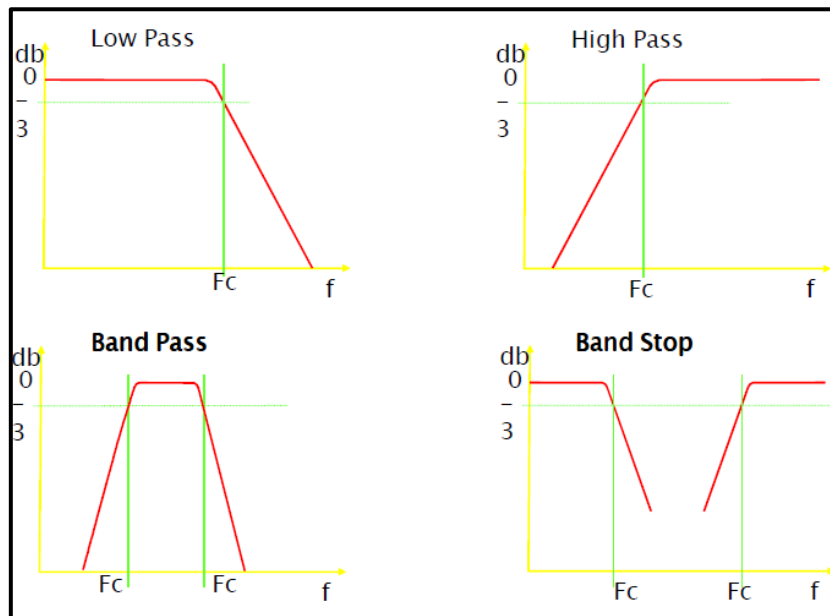


Figura 2.28 Filtros [2]

Técnicas de Inspección y consideraciones

Técnicas de localización

La capacidad de localizar las fuentes de emisión acústica es una de las funciones más importantes del método. En algunos casos, el proceso puede ser muy simple, como el caso del primer hit detectado por el sensor, pero en otros casos más complejos, tales como la definición de las coordenadas espaciales de una fuente en una estructura grande.

Los métodos de localización pueden resumirse en el siguiente modo:

- Linear $P(x)$
- Planar $P(x,y)$
- Volumétrico $P(x,y,z)$

El algoritmo más utilizado para la localización de emisión acústica es el algoritmo de localización planar. La localización lineal es típica para el control de procesos donde la emisión acústica puede tener origen en una línea y no hay otras causas importantes de señales de emisión acústica que pueda existir fuera de esta línea. La ubicación volumétrica se utiliza solo en los casos que también la profundidad de la fuente de emisión acústica debe ser considerada.

Para todos los tipos de localización, lineal, plana y volumétrica, es necesario conocer los tiempos de retraso de llegada de la señal de emisión acústica en diferentes sensores.

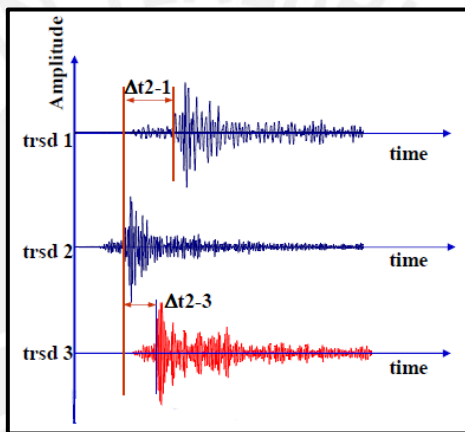


Figura 2.29 Métodos de Localización [5]

Consideraciones

Para realizar la emisión acústica, se requiere las siguientes facilidades:

- Alimentación eléctrica 110/220v (estable).
- Protección catódica desconectada.
- Válvulas cerradas.
- Instrumentación desconectada.
- En caso de ser un tanque de almacenamiento, tener un nivel superior al 75% de altura máxima.
- Iluminación del área externa.
- Disponibilidad de deshabilitar plantas eléctricas, máquinas de soldar, equipos rotativos, etc. Que puedan interferir con la inspección.

- Historial de reparaciones, inspecciones y planos.
- Protección contra corrientes de viento con partículas (toldos, mantas, etc).

Calibración del equipo

Calibración de los sensores

En la instrumentación de emisión acústica, el sensor es el elemento más susceptible de cambios en el tiempo debido a efectos ambientales, temperatura, etc.

La caracterización de la respuesta del sensor, la sensibilidad y la respuesta en frecuencia, se hacen por primera vez por el fabricante y debe ser calibrado sucesivamente durante la vida operativa.

El objetivo específico de la verificación de sensores incluye:

- Verificar la respuesta de la estabilidad en el tiempo.
- Verificar el sensor después de caídas accidentales.
- Comparación de los sensores de un sistema multicanal para asegurar que las respuestas son adecuadamente comparables.
- Verificar la respuesta después de la exposición a los ciclos térmicos o ambiente hostil.

Procedimiento especificado en la norma EN- 1330-9

Una onda acústica repetible se puede generar rompiendo con cuidado, una mina de lápiz de dureza 2H y diámetro 0.3 mm, contra un bloque de prueba. La mina del lápiz se rompe por medio de una guía especial de teflón que se monta para ayudar a romper la punta siempre con el mismo ángulo y una longitud de entre 2 y 3 mm.



Figura 2.30 Punta de Lápiz con teflón [2]

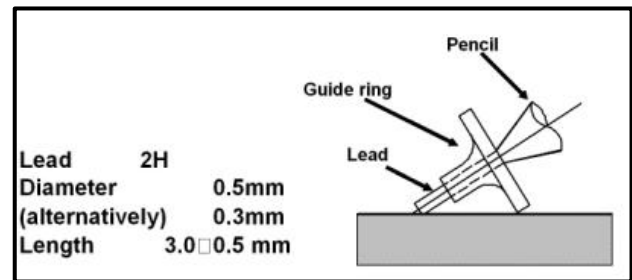


Figura 2.31 Esquema de ruptura [5]

La rotura frágil de una mina de lápiz libera una tensión repentina en la superficie del bloque de calibración y genera ondas acústicas que se propaga hasta el sensor. La señal de salida del sensor es capturada, digitalizada y analizada con un analizador de espectros de FFT y presentada gráficamente.

Para cada sensor es importante hacer una tabla de control que incluye los siguientes elementos:

- Identificación del sensor.
- Identificación del operario.
- Fecha de la verificación.
- Método usado.
- Características de la fuente y su posición referida al sensor.
- Los medios de transmisión.
- Tipo de acoplante.
- Identificación de cada equipo utilizado.

Un material acoplante es un material que ayuda a la transmisión de la onda acústica entre dos superficies. Este establece una interface acústica entre el sensor de emisión acústica y el material durante la prueba. Por tal razón es necesario aplicar un material acoplante en

los sensores, esta capa debe ser la más delgada posible. Una vez que el acoplante ha sido colocado, se procede a la fijación del sensor.

Los sistemas más utilizados para la fijación de los sensores son los siguientes:

- Resortes de fuerza constante.
- Magnético – para temperaturas bajas y altas.
- Guía de ondas.



Figura 2.32 Sensor con soporte magnético

2.1.6. Procedimiento de Inspección

El procedimiento de inspección dependerá del tipo de componente que está siendo evaluado (tube trailers, tanques de almacenamiento, estructuras, transformadores, etc). En este caso solo se presentará el procedimiento de inspección de un tanque de almacenamiento.

Nivel del tanque: se prepara el tanque para que cumpla las siguientes condiciones mínimas, que son las siguientes:

1. Nivel de llenado: Mínimo 60% de la máxima altura del tanque o nivel mínimo de operación nominal. Con esto se logra tener suficiente energía, proveniente de la presión de la columna de hidrocarburo, que permita estímulos de respuesta donde se encuentren las discontinuidades.
2. Aislamiento del tanque: El tanque estará sin movimiento de producto por 24 horas previo al inicio de la prueba. La protección catódica desconectada, válvulas cerradas totalmente, equipo de bombeo, recirculadores y calefactores apagados. Esto permite que cualquier ruido externo, al cual la prueba es muy sensible, sea minimizado y se obtengan resultados veraces.
3. Inspección previa: Empleando la técnica de ultrasonido aerotransportado e inspección visual se descarta la existencia de fuentes de ruido, los cuales introducen indicaciones falsas en los resultados.
4. De acuerdo a los estándares: se procede a la colocación de la primera fila de sensores mediante un sujetador magnético y grasa siliconada (Fig. 2.32) a una cierta altura, la cual puede ser a 1 metro desde el nivel del suelo o el primer cordón de soldadura, lo que sea primero. La cantidad de sensores a utilizar, dependerá del diámetro del tanque de almacenamiento (Ver Tabla 2.6)

Diámetro (m)	Cantidad de Sensores
Hasta 10	4
10 - 20	6
20 – 30	8
30 – 40	10
40 a más	12

Tabla 2.6 Diámetro vs # Sensores

5. Se verifica el acoplamiento de los sensores mediante la técnica PLB con al menos tres roturas a distancia no mayor a 100 mm del centro del transductor, empleando grafito de 0.3 mm con dureza 2H. Se repite para todos los sensores. Con esto se verifica que el tiempo de llegada del estímulo desde la zona de ruptura hasta el sensor sea el mismo, garantizando que los sensores tengan un buen acople.

6. De acuerdo a los estándares, se procede a la colocación de la segunda fila de sensores (sensores guardianes), los cuales se posicionan 1 metro por encima de los sensores de la primera fila. Para esto se emplea grasa siliconada con sujetadores magnéticos.
7. Se verifica el acoplamiento de los sensores guardianes mediante la técnica PLB con al menos tres roturas a distancia no mayor a 100 mm del centro del transductor, empleando grafito 0.3 mm de dureza 2H. Se repite para todos los sensores.
8. Se elabora curva de atenuación con roturas de grafito de 0.3 mm con 2H de dureza (al menos 4 roturas), tres repeticiones a distancias de 1 pie entre cada zona de rotura. La curva de atenuación es realizada por el software del sistema, el cual capta la intensidad con la cual está llegando los impulsos dados por la rotura. A medida que vamos alejando la rotura, la intensidad del estímulo disminuye lo cual permite al software calcular la atenuación del sonido en el material.
9. Se calcula la velocidad de la onda mediante roturas de grafito de 0.3 mm con 2H de dureza en diversas posiciones. Teniendo en cuenta que la velocidad del sonido es constante (V), conociendo el tiempo de llegada, dato que ofrece el software, desde la zona de rotura hacia el sensor (T) y conociendo la distancia (D) entre la zona de rotura y el sensor, se puede calcular la velocidad del sonido ($D = V * T$)
10. Ajuste de los parámetros del procesador. HDT, EDT, ELT, HLT, Threshold (40 dB). Esto permite tener la mejor relación señal:ruido por lo que nuestra probabilidad de detección aumenta significativamente.
11. Registro de actividad, se iniciarán los registros al alcanzarse la hora de mediciones y se procede a una corrida subsecuente.
12. Estimación de Severidad de la emisión acústica, de acuerdo a las prácticas desarrolladas en los procedimientos de inspección, se emplean los siguientes criterios para la estimación de la severidad de la emisión acústica y su relación con la condición.

Hits (H): Número de Hits por canal, análisis de la distribución de Amplitud vs Duración.

Eventos (Ev): Escala de crecimiento de eventos, análisis y parámetro de presión.

Energía (En): Escala de crecimiento de energía absoluta y parámetro de presión.

Capítulo 3

ENSAYOS CON TANQUES EN OPERACIÓN

En el presente capítulo se realizará la inspección de tanques de almacenamiento en condiciones distintas, con el fin de comprobar la capacidad de detectar problemas (discontinuidades) mediante la emisión acústica.

El primer caso de estudio es un tanque de 100 cm de diámetro y 35 cm de altura con la particularidad de presentar un defecto que consiste en un agujero que provoca una fuga en el fondo del tanque. Este caso permitirá determinar la capacidad del equipo en detectar la fuga y la aplicación del proceso interpretado.

El segundo caso consiste en la inspección del fondo de un tanque real en operación que contiene hidrocarburo.

3.1. Primer caso de estudio

El primer caso fue realizado en el Laboratorio de la Sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, el cual consiste en realizar la inspección de un recipiente (Fig. 3.1) con agua sin presurizar con el fin de simular el funcionamiento de un tanque atmosférico API – 650.

3.1.1. Descripción del tanque

- Dimensiones: 100 cm de diámetro, 35 cm de altura y 5 mm de espesor.
- Contenido: Agua pura sin tratar.
- Material: Acero al carbono.
- Estado: Sin problemas de corrosión.



Figura 3.1 Recipiente

3.1.2. Procedimiento de inspección por emisión acústica

La simulación fue realizada con agua al interior del tanque. Primero se procedió a realizar la calibración tal como se indicó en el capítulo anterior en los cuales se siguieron los siguientes pasos:

1. Se hizo el llenado del recipiente hasta alcanzar un 90% de la altura total, logrando de esta manera una mayor presión en el fondo del tanque.
2. Debido a que esta prueba fue realizada en un laboratorio no es necesario el aislamiento del tanque pues no existe una protección catódica, no existen válvulas de entrada o salida, no existen sistemas de bombeo o recirculación.
3. No es necesaria la aplicación de inspecciones previas para determinar fuentes de ruido debido a que nos encontramos en un laboratorio (condiciones casi ideales).
4. Se procede al montaje de la primera línea de sensores ubicados a 10 cm del fondo del tanque. Estos se encuentran posicionados de manera equidistante. Para el correcto acople entre los sensores y el recipiente se utilizan “holders” o sujetadores magnéticos con el fin de que exista un adecuado contacto. Para que haya una adecuada transmisión de señal entre el recipiente y los sensores utilizamos una grasa siliconada. Se siguen las recomendaciones en la norma ASTM E-650.

5. Se verifica el acoplamiento de los sensores mediante la técnica PLB con al menos tres roturas a distancia no mayor de 100 mm del centro del sensor, empleando grafito de 0.3mm y dureza 2H. Esto se repite para todos los ensayos.
6. Se elabora la curva de atenuación con roturas de grafito de 0.3mm y 2H de dureza con al menos 4 distancias distintas.
7. Se calcula la velocidad de la onda mediante roturas de grafito de 0.3mm y 2H de dureza en diversas posiciones.
8. Se realiza un ajuste de los parámetros del procesador, los cuales son: HDT, EDT, ELT, HLT, Threshold (40 dB).

Se inicia con el registro de actividad y tras un tiempo determinado (15 minutos) se procede con una corrida de información captada.



Figura 3.2 Configuración de Sensores

Una vez que la información se está recibiendo, se procede a confirmar que la fuga se encuentra activa realizando una inspección visual simple. En la siguiente figura se puede observar la posición de esta fuga en el fondo del tanque.



Figura 3.3 Fuga en fondo de Tanque

Después de un tiempo de recolección de información se procede a hacer revisión de esta. Con esta información se puede realizar la evaluación e interpretación del problema (defecto) con el fin de determinar el tipo de falla así como su ubicación.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

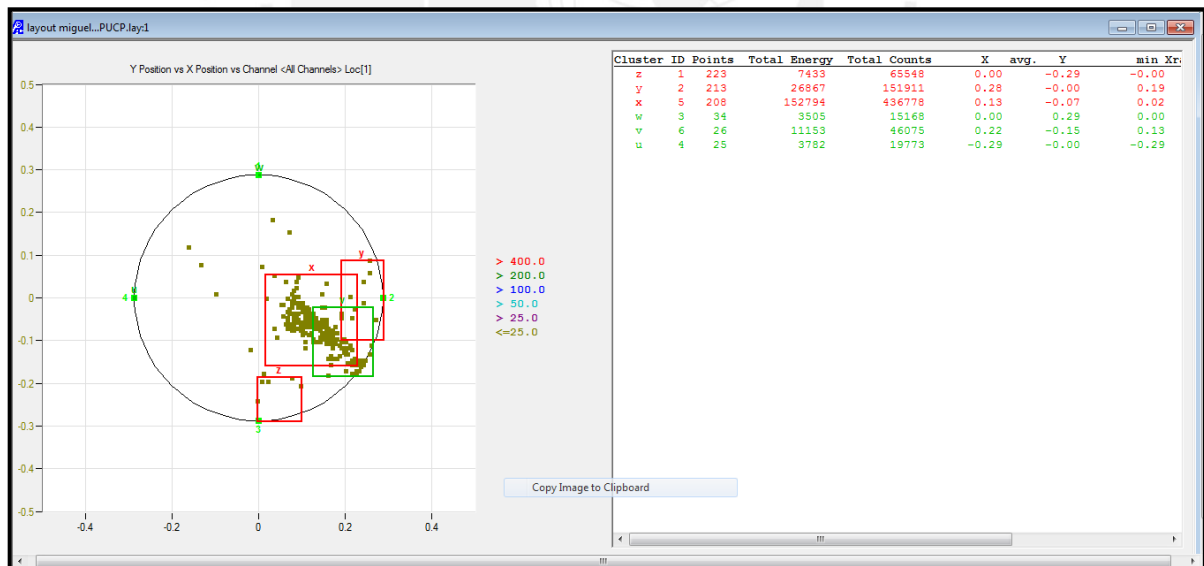


Tabla 3.1 Cluster en Fondo de Tanque

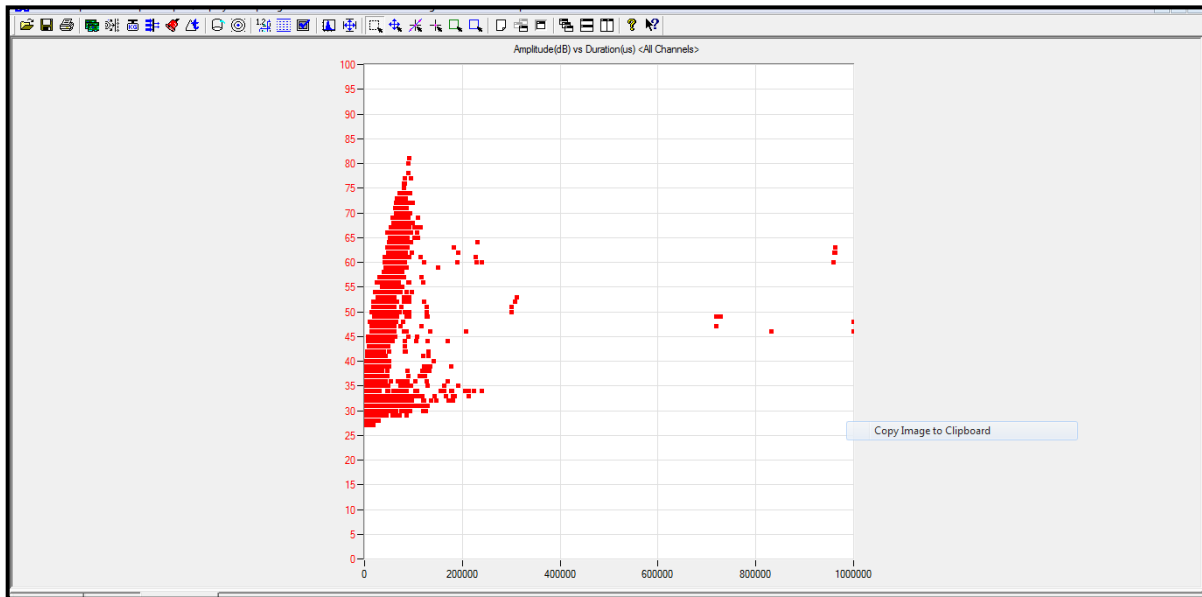


Tabla 3.2 Amplitud vs Duración

Se registraron seis (06) clúster de emisión acústica con más de 700 eventos. La actividad acústica se concentra principalmente en la región del fondo, entre los transductores 2 y 3. Con características de duración constante (hasta 200.000 microsegundos) y amplitudes en rangos de 30 a 75dB, se puede definir que se trata de una fuga localizada. El algoritmo de localización se encuentra con actividad acústica en las paredes causado por el experimento, de la dimensión del recipiente y el espesor del material empleado. Este fenómeno proviene de pequeños movimientos de la pared y el espesor del material empleado. A pesar de estas condiciones se evidencia muy buena localización de la zona que genera más emisión acústica (segundo cuadrante de área de piso del tanque).

3.2. Segundo caso de estudio

El segundo ensayo fue realizado a un tanque real en operación con contenido de hidrocarburos (súper octanos). Este ensayo tiene la finalidad de estimar el estado e integridad del piso de tanque. En este ensayo se observarán todas las condiciones reales que se deben tener en consideración para lograr una adecuada inspección mediante emisión acústica.

3.2.1. Descripción del tanque

- Dimensiones: 48.7 metros de altura, 17.5 metros de altura y 25 mm de espesor.
- Contenido: Hidrocarburo – Super Octanos.
- Material: Acero al carbono.
- Estado: protección catódica con corriente impresa, ánodos de sacrificio y sin corrosión.

3.2.2. Procedimiento de inspección por emisión acústica

3.2.2.1. Consideraciones

- El tanque se encontró con un nivel de llenado superior al 60%.
- Fue aislado 24 horas antes de la intervención.
- Los sistemas de protección catódica por corriente impresa se desconectaron.
- Las condiciones ambientales fueron adecuadas, sin lluvia, solo con presencia de ráfagas de viento aisladas que no afectaron significativamente la toma de datos.
- Se realizó una toma de datos por alrededor de 20 horas debido al tamaño del tanque (grande).

3.2.2.2. Procedimiento

1. Comprobación del nivel de tanque mínimo del 60%.
2. Aislamiento del tanque con al menos 24 horas previo a la inspección en la cual se cierran válvulas de entrada y salida, se anula el sistema de protección catódica con corriente impresa, equipos de bombeo, recirculación, calefactores apagados.
3. Se utiliza una técnica complementaria de ultrasonido, la cual se denomina ultrasonido aerotransportado para descartar la existencia de las fuentes de ruido.
4. Se procede con la colocación de la primera fila de sensores a altura entre 0.4m y 1.0m, para ellos se emplea grasa siliconada y sujetadores magnéticos. Se procede tal como se recomienda en el estándar ASTM E-650.

5. Se verifica el acoplamiento de los sensores mediante la técnica PLB con al menos tres roturas a distancias no mayor de 100 mm del centro del transductor, empleando grafito 0.3mm dureza 2H. Se repite para todos los sensores.
6. Se procede con la segunda colocación de fila de sensores (sensores guardianes) a altura de 2m, para ello se emplea grasa siliconada y sujetadores magnéticos tal como se recomienda en la ASTM E-650.
7. Se verifica el acoplamiento de los sensores guardianes mediante la técnica PLB con al menos tres roturas a distancia no mayor de 100mm del centro del transductor, empleando grafito 0.3mm dureza 2H. Se repite para todos los sensores.
8. Se elabora la curva de atenuación con roturas de grafito 0.3mm y dureza 2H en diversas posiciones.
9. Se calcula la velocidad de la onda mediante roturas de grafito 0.3mm y dureza 2H en diversas posiciones.
10. Ajuste de los parámetros del procesador. HDT, EDT, ELT, HLT, Threshold (filtro) de 40 dB.
11. Registro de actividad: se inician los registros al alcanzarse la hora de mediciones y se procede a una corrida subsecuente.
12. Estimación de severidad de la emisión acústica de acuerdo a las prácticas desarrolladas en procedimientos internos de inspección.

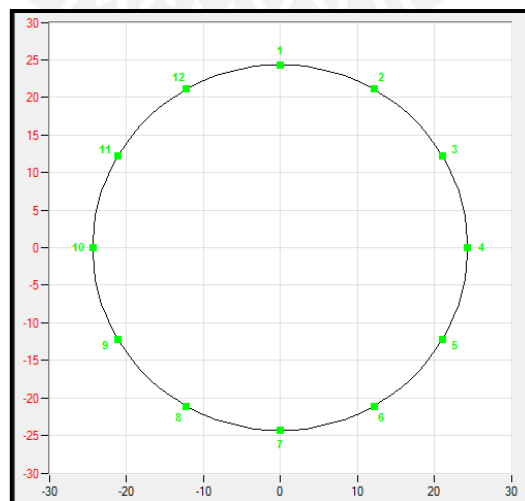


Tabla 3.3: Esquema de colocación de Sensores (Vista Planta – Histograma)

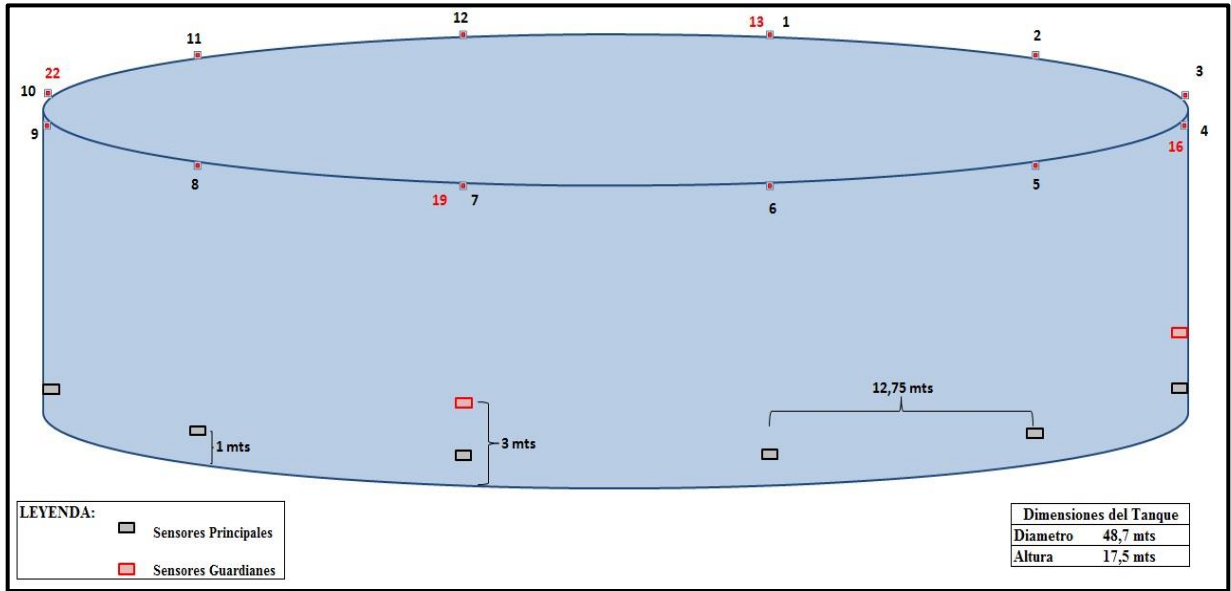


Figura 3.4: Esquema de colocación de sensores (vista lateral)

Después de realizada la prueba, finalmente se obtienen los resultados de la prueba. En los siguientes histogramas se pueden observar estos resultados:

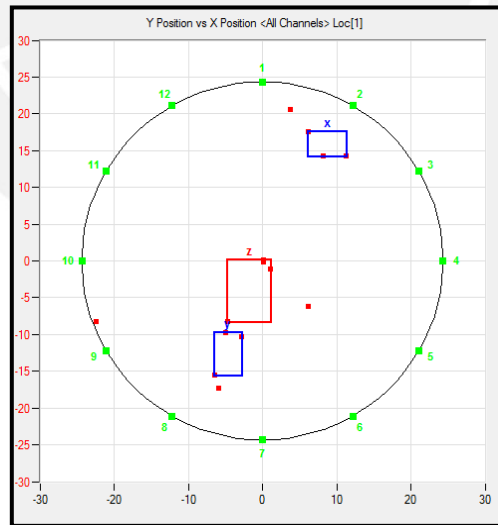


Figura 3.5: Gráfica 2-D

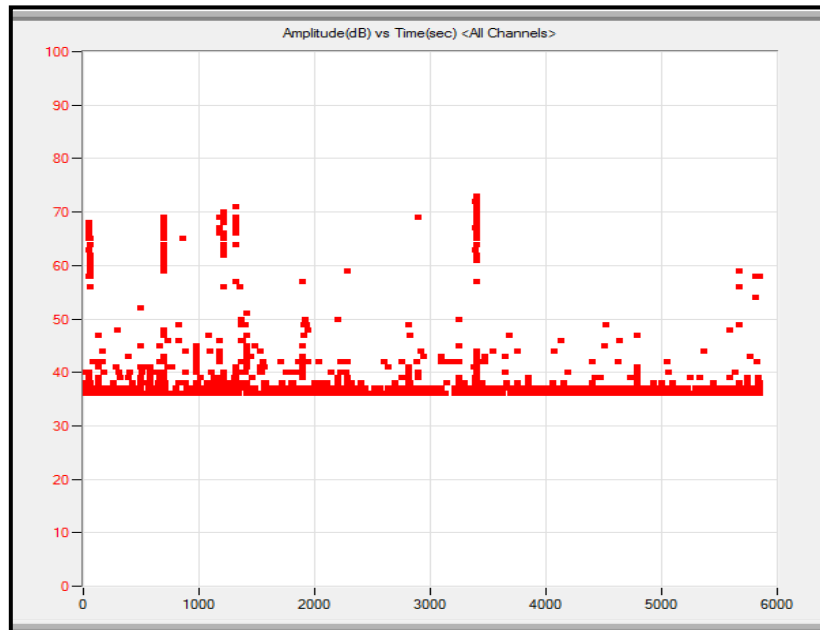


Figura 3.6: Gráfica de Amplitud vs Tiempo

Con los datos obtenidos de las gráficas, se puede concluir que el piso de tanque se encuentra en buenas condiciones a pesar de encontrarse actividad acústica localizada (Clúster) en la zona central del tanque, la tendencia de este comportamiento debe evaluarse en las futuras inspecciones con Emisiones Acústicas.

Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la finalidad de realizar un adecuado análisis de resultados, es necesario conocer ciertos parámetros que se encuentran muy relacionados con este. Uno de los principales parámetros que se relacionan con los resultados obtenidos en una inspección es la probabilidad de detección. Para cada método de inspección se tiene una probabilidad de detección la cual depende de ciertos factores que en muchos casos pueden ser controlados por el usuario encargado de realizar la inspección.

4.1. Estudio de la Probabilidad de detección (PoD)

La probabilidad de detección es una disciplina cuantitativa dentro del campo de los ensayos no destructivos que da una referencia sobre la confiabilidad de la inspección y tiene un gran valor al momento de seleccionar, validar y calificar personal en ensayos no destructivos e incluso establecer la aceptabilidad de diseños.

Cuando se realiza el estudio de probabilidad de detección es necesario que el enfoque se realice para un caso dado. Estudios realizados han sido hechos en base al crecimiento de fallas por fatiga en cilindros a presión tal como es el caso de los “Tube Trailers” o cilindros, los cuales son muy utilizados en nuestro país para el transporte de gas natural.

La probabilidad de detección nos permite identificar que hay métodos de inspección aplicados en cierto componente que poseen mayor confiabilidad que otros. La probabilidad de detección o PoD es la probabilidad de poder encontrar un defecto, que se asume que será encontrado utilizando ensayos no destructivos, utilizando un método dado. Tiene una significancia muy alta en la integridad y seguridad de estructuras.

El PoD para una discontinuidad dada depende de varios factores tales como son:

- Características de discontinuidades (tipo, tamaño, forma, orientación)
- Ensayo aplicado (VT, PT, MT, etc.)
- Procedimientos utilizados.

- Competencia del personal.

La forma de determinar el PoD se realiza utilizando una gran variedad de probetas con discontinuidades que son inspeccionados por una gran variedad de inspectores (incluso a veces en equipo) con el fin de evaluar cuantas discontinuidades fueron detectadas. A partir de estos datos obtenidos, se puede realizar un diagrama en el que se muestra el PoD en porcentaje (%) vs el tamaño de discontinuidad. A partir de este diagrama, el cual toma tiempos largos para determinarlos, nos permiten retirar o agregar nuevas herramientas que nos permitan mejorar la confiabilidad.

El campo que abarca la probabilidad de detección es bastante extenso, por tal razón solo se realizará en torno al ensayo de emisión acústica el cual es de nuestro interés para la presente tesis.

Para el estudio de la probabilidad de detección en el ensayo de emisión acústica, se debe tener en cuenta todos los procesos que intervienen en este. Podemos decir por lo tanto que se debe señalar lo siguiente:

- Estímulo (esfuerzo)
- Crecimiento de discontinuidad.
- Liberación de energía de onda.
- Propagación de onda.
- Censado.
- Detección.

En la actualidad, existen algunos modelos desarrollados para el estudio de la probabilidad de detección los cuales han sido realizados en periodos bastante extensos (años). Para lograr un estudio de probabilidad de detección, es necesario realizar un monitoreo permanente durante varios años.

A continuación se muestra de manera consecutiva, los pasos que se podrían utilizar para realizar un estudio de la probabilidad de detección (de manera resumida):

- Determinar el crecimiento de una fisura asociado con un defecto dado y con un programa de cargas (presiones – estímulo).

- Asignar una fracción específica de este crecimiento de fisura a la hendidura. Se debe asumir el menor tamaño para la hendidura. Utilizar la ley de distribución de amplitud de potencias para caracterizar la distribución de hendiduras por tamaño (área).
- Especificar las características de la instrumentación y calcular el menor movimiento detectable al sensor.
- Tener las medidas de la fuente – sensor. Aplicar la teoría de la distancia fuente – sensor con el fin de determinar la menor hendidura que se debe tener para que sea detectado por el sensor a esta distancia.
- Combinar los pasos dichos anteriormente y aplicar la estadística de Poisson para calcular el PoD (probabilidad de detección) para esta distancia fuente – sensor.
- Se debe realizar una iteración con el paso 4 para determinar un rango de distancias fuente – sensor.
- El PoD (probabilidad de detección) puede ser calculado como una función de la posición de la fuente, y mostrada adecuadamente para una disposición de sensores dados.

A continuación se mostrará resultados ilustrativos cuando se utilizan sistemas de computación (software) muy avanzados.

En la figura 4.1 se muestran todas las entradas de información que se debe tener en cuenta para realizar el estudio de la probabilidad de detección. La estructura que fue evaluada fue un recipiente cilíndrico a presión llevado a 2000 ciclos de presión. El defecto que está siendo estudiado corresponde a una fisura de 1 mm de profundidad inicialmente. Se está utilizando un filtro pasa altos de 50 dB.

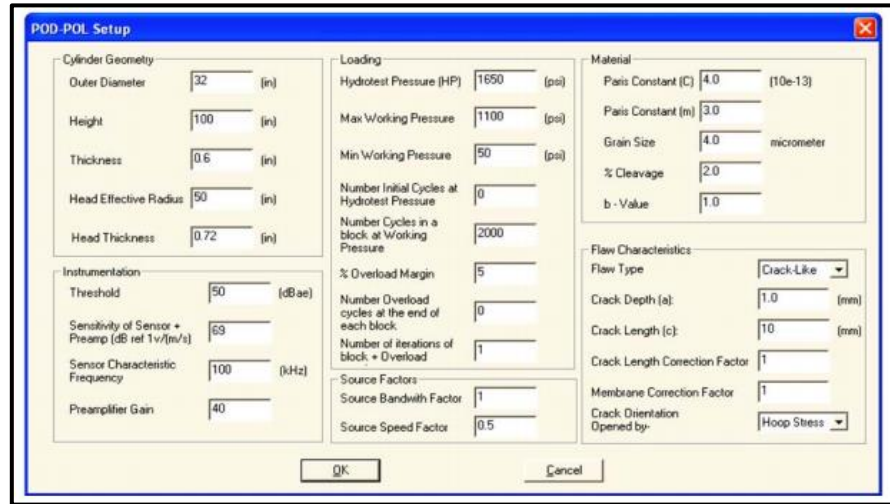


Figura 4.1: Disposición para distintas corridas – PoD [13]

La figura 4.2 nos muestra un mapa con las variaciones del PoD (probabilidad de detección) cuando la información de entrada es mostrada en la figura 4.1. En este estudio se utilizaron 6 sensores con una disposición de 2 anillos con 3 sensores cada una.

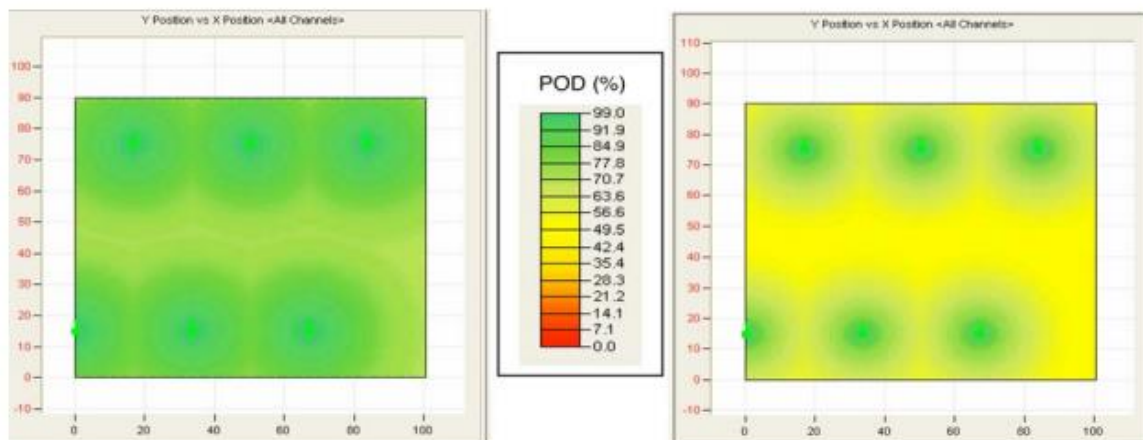


Figura 4.2: 2000 ciclos vs 1000 ciclos [13]

Se puede apreciar que a medida que el tiempo de evaluación se incrementa, los resultados obtenidos serán más confiables pues poseen un PoD (probabilidad de detección) más elevado. Tal como se observa, a medida que las fuentes son alejadas de los sensores, el PoD disminuye y esto se debe a la atenuación que hay por el medio en el que se transporta la onda.

Se puede observar que este método alcanza valores de 90 – 95 % cuando las fuentes se encuentran cerca a los sensores y para periodos de evaluación prolongados. En el caso de que las fuentes se encuentren un poco alejadas de los sensores, los valores de PoD están alrededor de 75-85% lo cual indica que se trata de un método bastante confiable. Por lo tanto, para elementos a inspeccionar de mayor tamaño, es necesario que el tiempo de inspección sea más prolongado, los estímulos sean de mayor consideración o se utilice una mayor cantidad de sensores.

En la figura 3 se puede apreciar que una manera de mejorar la probabilidad de detección (PoD) es utilizando distintos filtros pasa banda con la finalidad de que las amplitudes generadas por los defectos sean más observables. Por lo tanto, esto nos indica que cuando el defecto esperado es muy pequeño (según mecanismos de falla) se debe utilizar filtros pasa altos de menor dB.

Cuando se utiliza un filtro inadecuado, la probabilidad de detección puede ser muy baja teniendo como consecuencia el no encontrar defectos que pueden ser de gran impacto en un futuro.

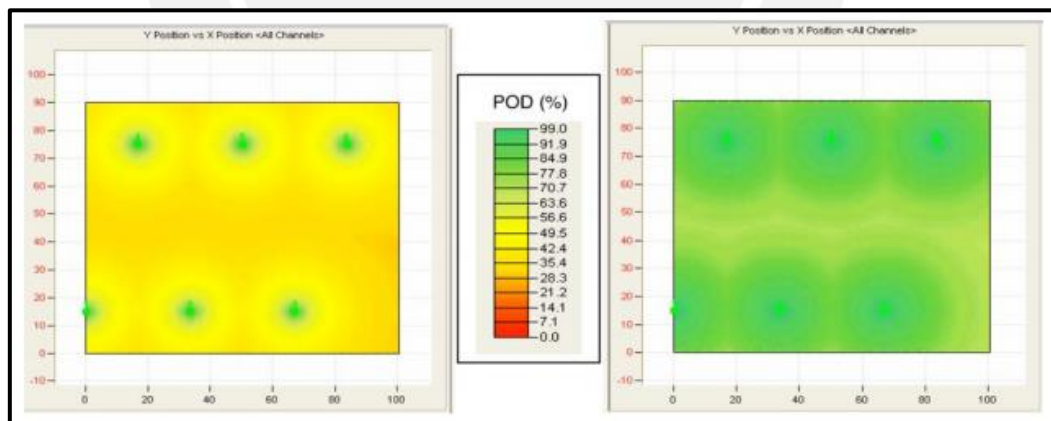


Figura 4.3 Filtro pasa alto 50dB vs Filtro pasa alto 40 dB [13]

Los resultados mostrados anteriormente muestran que la probabilidad de detección (PoD) dependen de muchas variables y por lo tanto se debe tener mucho cuidado al momento de selección de la instrumentación así como las condiciones a la cual serán sometidas los componentes a inspeccionar. Si se utiliza una adecuada combinación de estos, la

probabilidad de detección que se obtiene es bastante alta (encima del 95%) dando una buena confiabilidad de la inspección.

4.1.1. Presentación de resultados en 2D/3D

Una gran ventaja de los modernos sistemas de inspección de emisión acústica es la capacidad con la que cuentan para la presentación de resultados.

Cuando se realiza una inspección, los resultados pueden ser mostrados en partes o de manera global. Dependiendo como se desee mostrar es conveniente utilizar distintas presentaciones de resultados como es el caso de los diagramas 2D o 3D.

Gracias a los modernos equipos, actualmente existen una variedad de posibles tipos de pantallas que se pueden mostrar para poder realizar el análisis de lo encontrado. La selección de la pantalla a utilizar dependerá del componente que se esté inspeccionando. De esta manera algunas pantallas de visualización de resultados son:

- Histogramas:
 - o Barras llenas, barras sin llenar o líneas.
 - o No acumulativo, acumulativo Mín – Máx, acumulativo Máx – Mín.
 - o Sumas, ratios, promedios, máximo, mínimo.
- Ploteos de dispersión:
 - o Ordinario.
 - o Coloreado.
 - o Agrupado.
- Formas de onda, espectros.
- Ploteos felicidad o Kaiser.

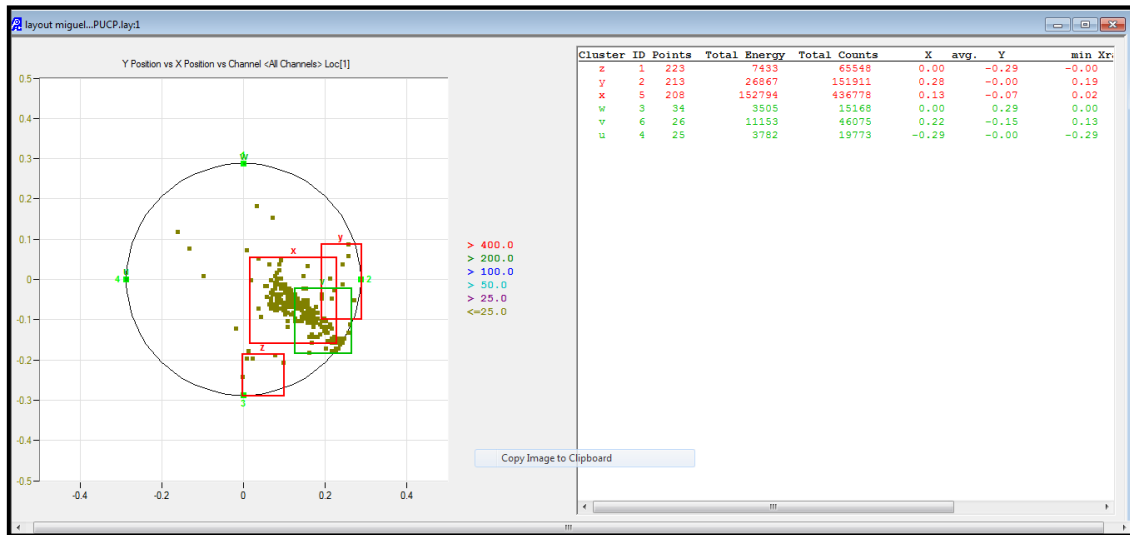


Figura 4.4: Resultado en 2D – Número de Eventos (Dispersión)

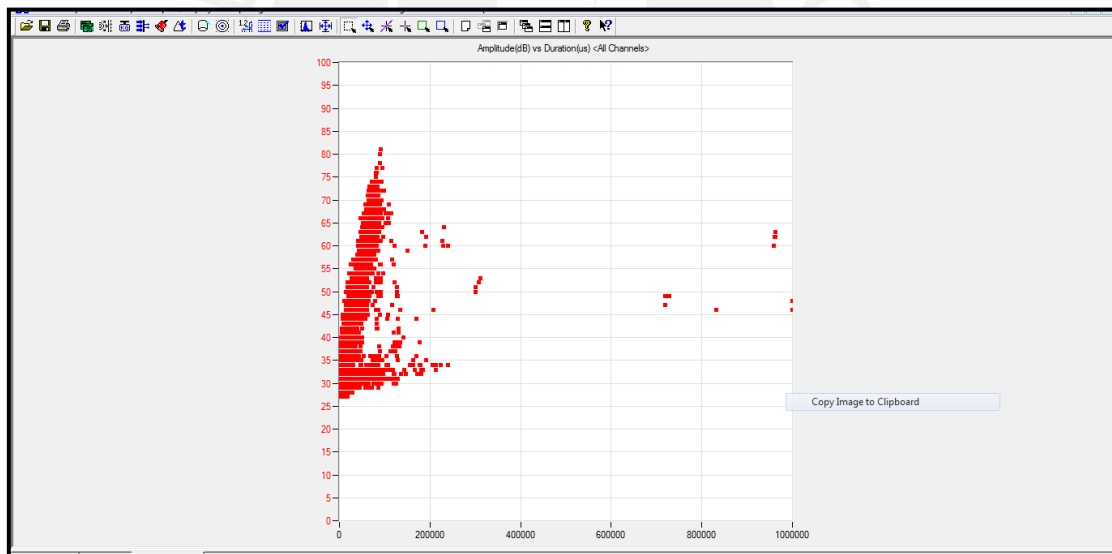


Figura 4.5: Resultado en 2D – Amplitud vs Duración (Dispersión)

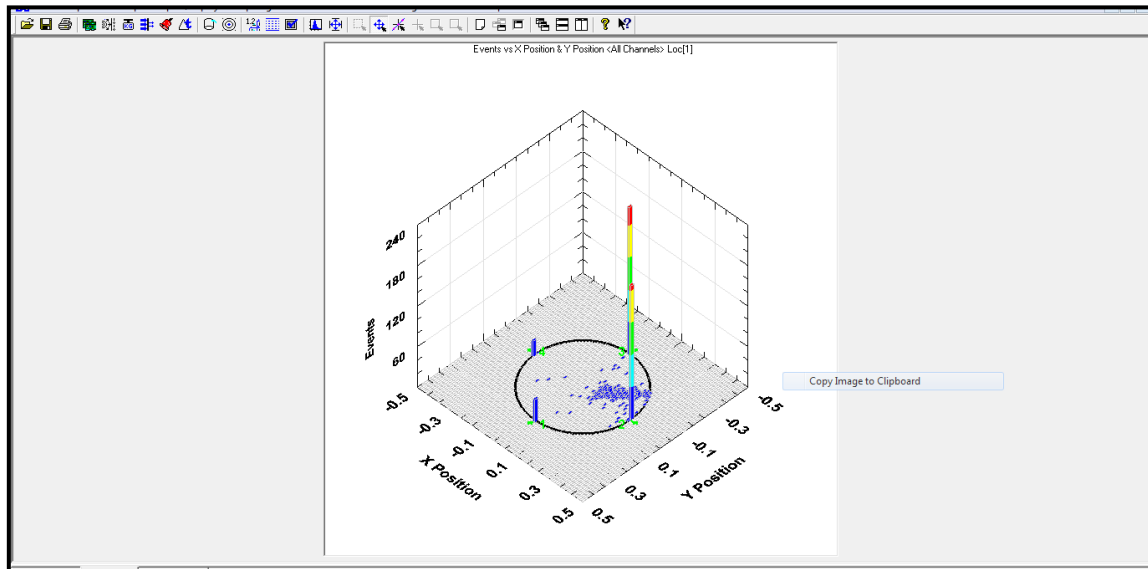


Figura 4.6: Resultado en 3D – Eventos (Histograma de barras)

Debido a la gran variedad de pantallas de visualización de resultados es conveniente definir que pantallas son útiles de utilizar según los resultados que se deseen mostrar. De esta manera tenemos lo siguiente:

- Resultados de actividad:
 - Histograma 2-D.
 - Energía vs Tiempo.
 - Acumulativo, Mínimo – Máximo.
 - Lineal en el eje Y.
 - No acumulativo.
 - Logarítmica en el eje Y.
 - Barras.
- Resultados de actividad con intensidad:
 - Tipo de gráfico: dispersión.
 - Amplitud y paramétrico vs Tiempo. Incluye tiempo de manejo.

Para la localización planar es necesario únicamente histogramas 2-D mientras que si se desea realizar una localización global o se desea mostrar resultados que muestren mayor información como tiempo, eventos y amplitud, es necesario utilizar un histograma 3-D que

nos dé mayor información. La ventaja de los histogramas 3-D está en la mayor capacidad para observar en tiempo real cuando se realizan las rotaciones de la gráfica para revelar información relevante.

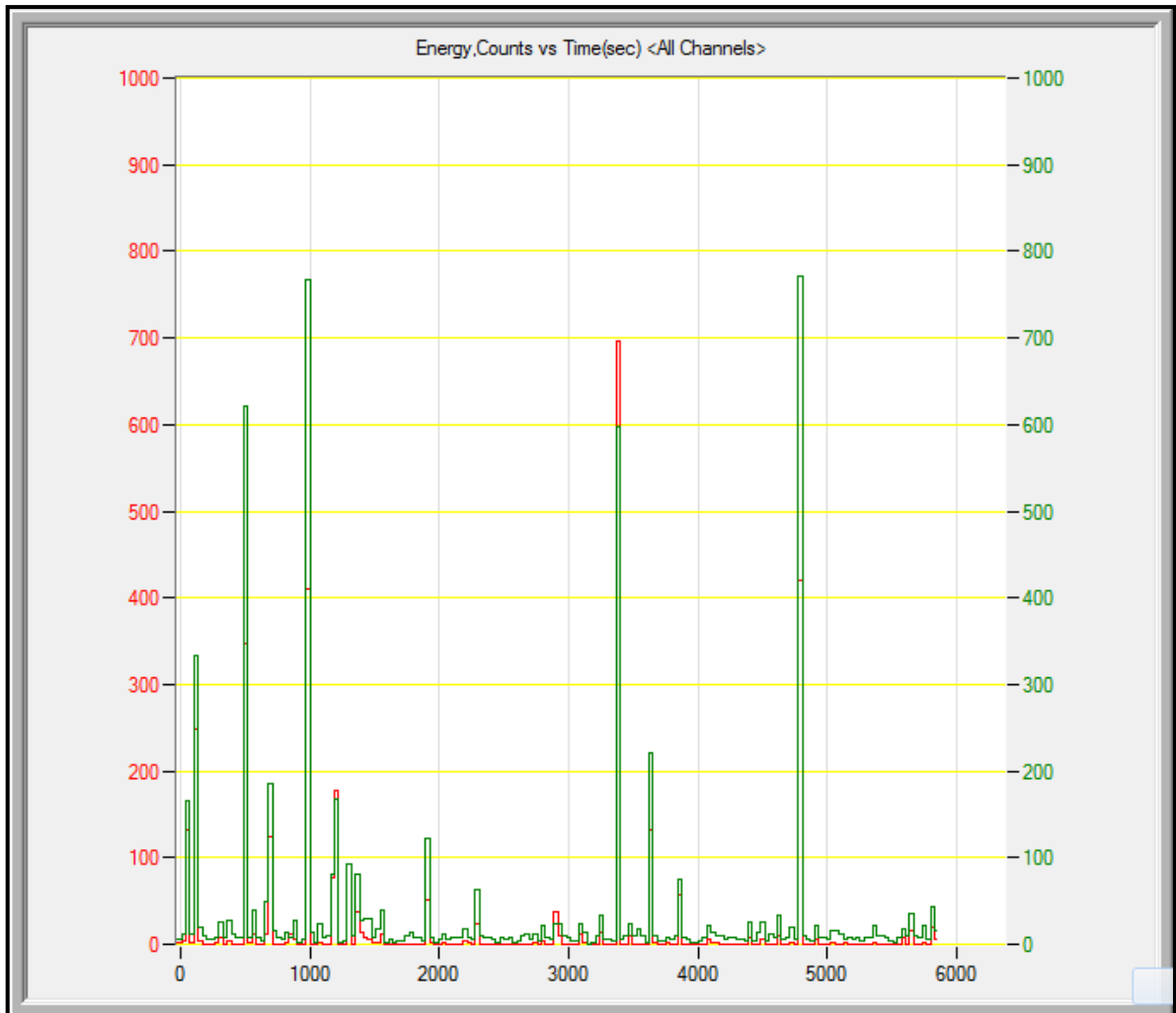


Figura 4.7: Gráfica 2D, Energía y Conteo vs Tiempo

Capítulo 5

PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN

Después de haber definido todos los conceptos, con el apoyo de los ensayos realizados y ciertas normas que nos dan recomendaciones, es posible realizar un procedimiento de inspección adecuado y completo, el cual podrá ser ejecutado por personal que tenga conocimientos y práctica en el tema.

Debido a que un procedimiento de inspección solo cubre un rango de dimensiones de tanques es necesario plantear si se realizará todos los procedimientos necesarios para cubrir todos los tipos de dimensiones en tanques API-650 o si se realizará para uno específico.

Para la presente tesis, solo se tomará en cuenta las dimensiones de los tanques API – 650 que se encuentran en el Perú. De estos tanques se seleccionará el que tenga mayor frecuencia de aplicación. Con esta decisión podremos realizar tan solo un procedimiento de inspección el cual tendría un amplio uso en el área de control de calidad de las industrias petroleras.

Inicialmente, es conveniente definir cuál es la cantidad de tanques con que el Perú cuenta para el almacenamiento de hidrocarburos. Para esto nos guiamos de la siguiente tabla:

	Cantidad de Tanques	Capacidad de Tanques (MB)
Refinerías	379	10716
Plantas de Gas	58	68
Plantas Lubricantes	78	225
Estaciones – ONP	27	1437
Terminales	167	3454
Total	709	15900

Tabla 5.1: Capacidad de Tancaje – Perú

Según la tabla anterior, podemos indicar que la mayor concentración de tanques se encuentra en las refinerías.

En la actualidad se cuentan con 6 refinerías en todo el Perú. Estas refinerías son:

- Refinería La Pampilla, la cual tiene una producción de 100MB.
- Refinería Talara, la cual tiene una producción de 65MB.
- Refinería Conchan, la cual tiene una producción de 15MB.
- Refinería Iquitos, la cual tiene una producción de 10MB.
- Refinería Pucallpa, la cual tiene una producción de 2.0MB.
- Refinería el Milagro, la cual tiene una producción de 1.8MB.

Los diámetros de los tanques de almacenamiento se encuentran en gran variedad de dimensiones, desde 5 metros hasta los 60 metros. Las alturas de los tanques se encuentran desde 5 metros hasta 12.6 metros.

Para la presente tesis, se tomará en cuenta los tanques de almacenamiento de la refinería La Pampilla. A continuación se muestra una lista mostrando los tanques con la que esta refinería cuenta así como también dando indicación de las dimensiones (diámetro y altura).

TAG	Diámetro (mm)	Altura (mm)
31-T101	9,610	10,840
31-T102A	36,600	15,110
31-T102B	36,600	14,605
31-T103A	27,076	13,190
31-T103B	27,076	12,776
31-T10A	22,555	12,801
31-T10B	22,555	12,801
31-T11A	9,448	9,145
31-T11B	9,448	9,145
31-T12A	9,448	9,145
31-T12B	9,448	9,145

31-T13A	24,384	12,801
31-T13B	24,384	12,801
31-T14A	14,325	12,801
31-T14B	14,325	12,801
31-T15A	14,935	12,851
31-T15B	14,935	12,851
31-T16A	24,384	12,801
31-T16B	24,384	12,801
31-T18	4,572	5,486
31-T1A	44,805	12,801
31-T1B	44,805	12,801
31-T1C	44,805	12,801
31-T1D	48,800	17,080
31-T1E	48,800	17,080
31-T1F	39,900	17,900
31-T1G	39,900	17,900
31-T1H	39,900	17,900
31-T1J	39,900	17,900
31-T1K	39,900	17,900
31-T1L	45,860	14,442
31-T1M	39,900	17,900
31-T1N	39,900	17,900
31-T1P	45,860	14,442
31-T1Q	47,750	18,112
31-T1R	52,728	18,288
31-T1S	52,728	18,288
31-T1T	52,728	18,288
31-T202A	39,900	17,900
31-T202B	39,900	17,900
31-T202C	39,900	17,900
31-T202D	39,900	17,900

31-T202E	39,900	17,900
31-T202F	45,860	14,442
31-T203	22,800	17,880
31-T209A	39,900	17,900
31-T209B	39,900	18,040
31-T209C	39,900	17,900
31-T21	13,800	12,780
31-T210A	22,800	17,900
31-T210B	22,800	17,900
31-T210C	22,800	17,900
31-T210D	46,226	14,400
31-T213A	39,900	17,900
31-T213B	39,900	17,900
31-T23	16,154	10,790
31-T27	12,497	10,973
31-T28	13,106	12,802
31-T29	9,754	9,144
31-T30	9,754	9,144
31-T303	40,704	12,192
31-T304A	42,230	14,783
31-T304B	42,230	14,783
31-T304C	42,230	14,783
31-T304D	42,230	14,783
31-T307A	42,410	16,904
31-T307B	42,410	16,904
31-T307C	42,400	16,900
31-T31	11,887	10,973
31-T33	10,668	9,144
31-T331A	13,800	12,800
31-T331B	13,800	12,800
31-T332A	11,100	11,000

31-T332B	11,100	11,000
31-T333A	15,500	12,800
31-T333B	15,500	12,800
31-T8A	29,870	12,801
31-T8B	29,870	12,801
31-T9A	17,983	11,125
31-T9B	17,983	11,125
32-T2	11,582	10,973
32-T3	11,582	10,973
32-T4	11,887	10,973
32-T5	10,058	9,145
32-T6	11,887	10,973
32-T7	11,887	10,973
41-T20A	4,572	5,400
41-T20B	4,572	5,400
44-T1	18,593	12,800
44-T50	21,000	12,600
44-T51	21,000	12,600
44-T52	22,920	9,150
45-T19A	4,572	5,486
45-T19B	4,572	5,486
45-T201	4,495	6,108
45-T202A	1,150	1,825
45-T202B	1,150	1,825
45-T203	1,340	1,825
45-T204	7,740	7,685
45-T205	6,600	9,000
45-T206	800	1,000
45-T207	6,000	5,000

Tabla 5.2.- Tanques de Almacenamiento (Perú)

Según los datos expuestos en la tabla anterior, se puede observar que los tanques de mayor frecuencia son aquellos que están entre 10 a 20 metros de diámetro y entre 10 a 12 metros de altura.

El procedimiento de inspección a realizar será en base a un tanque con las siguientes dimensiones:

- Diámetro: 20 metros.
- Altura: 12 metros.

El procedimiento de inspección es el siguiente:

1. Verificación de las condiciones ambientales

Se debe aislar el tanque de posibles vientos con transporte de partículas de polvo y lluvias de gran intensidad. En caso la inspección se realice con alguna condición antes mencionada, se debe tener en cuenta el uso de toldos o protectores que permitan proteger el tanque de las condiciones ambientales (ruido).

2. Verificación de las condiciones del tanque

Nivel del tanque: Se prepara el tanque para que cumpla las siguientes condiciones mínimas. Nivel de llenado mínimo 80%.

Aislamiento del tanque: El tanque se encontrará sin movimiento de producto por 24 horas previo al inicio de la prueba. La protección catódica será desconectada (si aplica), las válvulas de entrada y salida se encontrarán cerradas totalmente. Equipos de bombeo, recirculación, calefactores y demás deberán estar apagados.

Inspección previa: Se emplea la técnica de ultrasonido aerotransportado e Inspección Visual para descartar la existencia de fuentes de ruido relacionadas al tanque.

3. Posicionamiento y acoplamiento de sensores

De acuerdo a los estándares, se procede a la colocación de la primera fila de sensores a una altura entre 0.4 y 1.0 metros, para ello se emplea grasa siliconada y sujetadores magnéticos. Se procede tal como está recomendado en el estándar ASTM E-650.

Se verifica el acoplamiento de los sensores mediante la técnica PLB con al menos tres roturas a distancia no mayor de 100 mm del centro del transductor, empleando grafito de 0.3mm de diámetro y dureza 2H. Se repite para cada sensor.

De acuerdo a los estándares, se procede a la colocación de la segunda fila de sensores (sensores guardianes) a una altura de 2.0 metros, para ello se emplea grasa siliconada y sujetadores magnéticos.

Se verifica el acoplamiento de los sensores guardianes mediante la técnica PLB con al menos tres roturas a distancia no mayor de 100 mm del centro del transductor, empleando grafito de 0.3mm de diámetro y dureza 2H. Se repite para todos los sensores.

4. Cálculo de velocidad

Se calcula la velocidad de la onda mediante roturas de grafito de 0.3mm de diámetro y dureza 2H en diversas posiciones.

5. Ajuste de parámetros en el software

Ajuste de los parámetros del procesador. HDT, EDT, ELT, HLT, Threshold (40 dB).

6. Recolección de información

Registro de actividad: Se inician los registros de las actividades acústicas y al alcanzarse la hora de medición, se procede a una corrida subsecuente para observar en tiempo real el estado del fondo del tanque.

7. Análisis de datos

Estimación de Severidad de la Emisión Acústica: De acuerdo a las prácticas desarrolladas en los procedimientos de inspección se emplean algunos criterios para la estimación de la severidad de la emisión acústica y su relación con la condición.

HITS (H): Número de Hits por canal, Análisis de la distribución de Amplitud vs Duración.

EVENTOS (EV): Escala de crecimiento de eventos, análisis y parámetros de presión.

ENERGÍA (EN): Escala de crecimiento de energía absoluta y parámetros de presión.

Severidad de daño: Se tienen las siguientes categorías:

- Categoría I y II: bajo riesgo de fugas o deterioro por corrosión del piso del tanque. Prioridad baja. Se recomienda Monitoreo de condición por emisión acústica en 24 o 26 meses.
- Categoría III y IV: riesgo moderado de fugas por corrosión en el piso del tanque.
- Categoría V y VI: riesgo alto de fugas por corrosión severa.



CONCLUSIONES

- El ensayo de emisión acústica permite reemplazar los ensayos convencionales en la inspección de fondo de tanques.
- El ensayo de emisión acústica permite realizar la inspección de un fondo de tanque en menor tiempo comparado con los ensayos convencionales.
- El ensayo de emisión acústica da solución a los problemas de inspección de los tanques de almacenamiento de la industria petrolera.
- Teóricamente el ensayo de emisión acústica tienen una gran probabilidad de detección, la cual es respaldada por los ensayos realizados y en los cuales se puede observar que es posible encontrar discontinuidades de pequeñas dimensiones.
- Es necesario conocer bien los fundamentos del ensayo de emisión acústica para una adecuada inspección.
- Los ensayos de emisión acústica necesitan de equipos de alta tecnología y confiabilidad para que los resultados obtenidos sean los adecuados.
- Las herramientas de software que se pueden encontrar en los equipos de emisión acústica pueden ser de gran utilidad para el análisis de resultados.

RECOMENDACIONES

- Los ensayos de emisión acústica deben ser ejecutados por personal calificado y certificado.
- Los sensores de emisión acústica deben estar lo más cerca posible a la discontinuidad para conseguir una alta probabilidad de detección. Esto se logra posicionando una mayor cantidad de sensores alrededor del tanque de almacenamiento, por lo que es recomendable utilizar equipos multicanales.
- Cuando se realicen ensayos de emisión acústica en tanques en operación se debe aislar la zona de trabajo lo mayor posible.
- El equipo de emisión acústica debe ser capaz de mostrar resultados en distintas presentaciones pues esto ayuda a un mejor análisis de resultados.
- Las inspecciones de los fondos de tanques deben ser realizados teniendo en cuenta el mecanismo de falla.
- Cuando se encuentre indicios de una posible falla en los fondos de tanque, es conveniente que se verifique el problema mediante un ensayo convencional que sea del tipo cuantitativo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Nondestructive Testing Handbook, segunda edición. American society for nondestructive testing, USA.
2. “An introduction to acoustic emission”, C.B. Scruby, J. Phys. Instrum. Vol. 20, p. 946-953, 1987.
3. Ronnie K. Miller. Acoustic Emission Testing. Physical Acoustics Corporation, Princeton, New Jersey
4. ASME Sección V, artículo 12, Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing.
5. Ternowcheck S.J., Gandy T.J., Calva M.V. y Patterson T.S. American Society for Testing and Materials, ASTM STP1353, 1998.
6. Long, R.S., Vine, K., Lowe, M.J.S. and Cawley, P. “Monitoring of acoustic wave propagation in buried water pipes”, Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 20, D.O. Thompson and D.E Chimenti (eds), 2001, American Institute of Physics, pp. 1202-1209.
7. Nippon Physical Acoustic, Ltd., Okamoto LK Bldg. 8F, Higashi 2-17-10, Shibuya, Tokyo 150-0011 Japan, *Petroleum Refining Engineering Center, Japan Energy Corporation, Ushio 2-1, Kurashiki, Okayama, 712-8588 Japan.
8. Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guideline Version 3, International Iron & Steel Institute. Committee on Automotive Applications, (2006)
9. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. API Standard 653, Fourth edition, April 2009.
10. Guidelines and Methods for Inspection of Existing Atmospheric and Low – Pressure Storage Tanks, API Recommended Practice 575, Second Edition, May 2005.
11. W.D. Rummel, Probability of Detection as a Quantitative Measure of Nondestructive Testing End-to-End Process Capabilities, Materials Evaluation, 56, 1, 1998, 29-35.

12. D.O. Harris and H.L. Dunegan, Continuous Monitoring of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Techniques, *Experimental Mechanics*, EXMCA, 14, 2, 1974, 71-81.
13. Probability of Detection for Acoustic Emission, Adrian Pollock, Physical Acoustic Corporation, 195 Clarksville Road, Princeton Junction, NJ 08550.

