

## **Tema 21: Técnicas de inspección de componentes mecánicos:**

### **Ensayos no destructivos.**

#### **ÍNDICE**

##### **1.- INTRODUCCIÓN**

2.- EXÁMENES VISUALES (VT): - Principios de óptica. Definiciones. - Técnicas de inspección visual.  
- Medios auxiliares de inspección. - Tipos de exámenes visuales.

3.- LÍQUIDOS PENETRANTES (LP): - Principios básicos. Ventajas y Limitaciones. - Líquido Penetrante y Revelador. - Secuencia del ensayo.

4.- PARTÍCULAS MAGNÉTICAS (PM): -Principios Físicos. Fundamento y Alcance del Método.  
- Procedimientos de inducción. - Secuencia del ensayo. - Tipo de defecto.

5.- RADIOGRAFÍAS (RT): - Fundamento del Método. Ventajas y Limitaciones. - Equipos de Generación de Radiación. - Película Radiográfica. - Proceso Radiográfico.

6.- ULTRASONIDOS (UT): - Fundamentos físicos. Definiciones. - Generación de ondas ultrasónicas.  
- Técnicas.

7.- CORRIENTES INDUCIDAS (CI): - Fundamentos físicos. Parámetros. - Campo de aplicación. Ventajas y limitaciones.  
- Equipos de inspección. - Modos de trabajo en CI: Diferencial y Absoluto.

8.- EMISIÓN ACÚSTICA (EA): - Fundamento del método. - Aplicaciones

##### **9.- PROCEDIMIENTOS**

##### **10.- BIBLIOGRAFIA**

#### **Resumen Ejecutivo:**

Los métodos de ensayos no destructivos son usados para detectar las imperfecciones superficiales e internas en los materiales, soldaduras, elementos o piezas fabricadas y componentes, con el fin de asegurar un nivel de calidad aceptable del estado estructural y funcional de los equipos, sistemas y componentes (ESC), tanto durante la fase de fabricación o construcción como durante la vida en servicio de los mismos.

Los métodos aplicados son diversos, empleándose técnicas diferentes en base a los requisitos de calidad exigidos, así como a parámetros basados en el tipo de material inspeccionado, su geometría, tipo de defecto postulado, accesibilidad, etc.

A lo largo del presente tema se aporta una visión general de los diferentes métodos de ensayos no destructivos más utilizados en centrales nucleares (CC.NN.), incluyéndose también algún otro menos usado, caso de la emisión acústica, sobre los que se comentan aspectos relacionados con los principios o fundamentos físicos, aplicaciones, ventajas o inconvenientes.

#### **Temas relacionados**

**1er. Ejercicio. Grupo B - Tema 14:** Componentes de centrales nucleares de agua ligera. Diseño mecánico. Análisis de tensiones. Análisis de fatiga. La vasija a presión del reactor, seguimiento de propiedades mecánicas. Formación y crecimiento de grietas. Mecánica de la fractura.

**3er. Ejercicio. Grupo A - Tema 19:** Códigos y normas aplicables a la fabricación e inspección de estructuras, sistemas y componentes de centrales nucleares.



## **1.- INTRODUCCION**

Como se ha señalado en el resumen ejecutivo, los métodos de ensayos no destructivos (Ends) se utilizan para vigilar el estado estructural y funcional de los ESC, para ello se establecen unos programas de inspecciones y pruebas. Uno de los programas más conocidos para controlar el estado de los ESC durante su vida en operación es el denominado “Inspección en Servicio”. Este programa se basa en los requisitos de inspección establecidos en la sección XI del código ASME.

Estos métodos se pueden establecer, en una primera clasificación general, atendiendo al fenómeno físico que aplican:

- Ondas electromagnéticas: Rayos gamma, Rayos X, Técnicas visuales, Rayos infrarrojos (termografía), métodos eléctricos y basados en fenómenos magnéticos.
- Ondas acústicas: Ultrasonidos y métodos sónicos.
- Emisión de partículas sub-atómicas: Neutrones, activación de neutrones, protones y partículas beta.
- Otros : Líquidos penetrantes, partículas filtradas, ensayo de fugas

Esta clasificación incluye muchas técnicas que no son susceptibles de ser empleados en la inspección de componentes de CCNN, bien por el tamaño de los equipos a emplear o, bien, por la dificultad técnica que implican.

La clasificación más correcta se basa en los métodos de inspección por END que se asignan en cada caso, atendiendo a las características del componente a examinar (materiales, geometría, etc.), y a los objetivos que se pretenda cumplir, bien por los requisitos de calidad exigidos o, bien, por el tipo de defecto que se pretenda detectar (defecto postulado). Se agrupan en:

- **VISUALES:** El examen visual es la observación directa o indirecta de las superficies accesibles de soldaduras, materiales base, componentes o sistemas. Sólo se examina la porción más externa en busca de anomalías, condiciones superficiales, cambios en las características físicas u otras indicaciones que revelen el estado de la superficie de la parte examinada. Por tanto, no se pueden sacar conclusiones de lo que ocurre internamente. Sin embargo esta técnica, junto con la experiencia adquirida y el conocimiento general de materiales, puede llevar a requerir inspecciones adicionales que proporcionen más información sobre el estado real del componente.
- **SUPERFICIALES:** Los exámenes superficiales son aquellos métodos que pueden proporcionar información no solo del estado de la superficie inspeccionada, sino en algunos casos alcanza una cierta profundidad por debajo de ella. Los métodos superficiales más extendidos son los líquidos penetrantes y las partículas magnéticas.
- **VOLUMÉTRICOS:** Los exámenes volumétricos son los que pueden proporcionar

información sobre el espesor completo de la pieza que se examina. Los métodos utilizados como tales son el examen radiográfico y el examen ultrasónico. Dentro de este grupo también se podría incluir el método de examen por corrientes inducidas, al menos en algunas aplicaciones, como es el caso de la inspección de los tubos de los generadores de vapor, calderas y cambiadores de calor, que debido a su pequeño espesor permite examinar el volumen completo. Sin embargo, si se utiliza en el examen de otro tipo de piezas de mayor espesor, caso de las penetraciones de barras de control en la tapa de la vasija (PWR) o en el “plenun” inferior (BWR), de la superficie interior de la vasija o de la envoltura del núcleo en BWR, se puede considerar como un examen superficial o subsuperficial.

La descripción y requisitos aplicables a los diferentes métodos de ensayos no destructivos se encuentran descritos en la sección V del código ASME.

## **2.-EXÁMENES VISUALES**

### **PRINCIPIOS DE ÓPTICA. DEFINICIONES**

La óptica es la parte de la física que estudia la luz y los fenómenos relacionados con ella. Dentro de ella, la fotometría se ocupa del estudio de las características de los focos luminosos así como de la iluminación que producen. Por la relación evidente con los exámenes visuales y con los medios auxiliares de inspección que se describirán más tarde, se definen algunas magnitudes fotométricas:

- **Intensidad luminosa.** Se define como el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido. Se mide en Candela o bujía nueva.
- **Iluminación.** Representa el flujo luminoso por unidad de superficie. Se mide en Lux o lumen por metro cuadrado.

El ojo humano detecta radiaciones de longitud de onda comprendidas entre 380 y 760  $\mu$ . Éste necesita un nivel mínimo de intensidad de luz, contraste y ángulo de visión que limita su capacidad.

El **umbral de intensidad** es el nivel de brillo más bajo que el ojo puede ver. El **contraste** es la diferencia en el nivel de brillo. El **ángulo de visión** es el ángulo formado por los extremos del objeto visionado y el ojo del observador.

### **TECNICAS DE INSPECCIÓN VISUAL**

Existen dos formas para efectuar una inspección visual de un componente: visión directa y visión remota.

- **Inspección visual directa:** Es aquella que se realiza sobre un objeto o superficie a una distancia accesible a los ojos del inspector sin necesidad de medios de aproximación.

Existen dos parámetros importantes a considerar, la distancia máxima a la que debe colocarse el observador y el ángulo de visión.

El uso de medios auxiliares en el examen visual directo es permitido por ASME cuando se realizan inspecciones del tipo VT-1 y VT-3. Dichos medios pueden ser lupas, espejos, lámparas, calibres, etc.

- **Inspección visual remota:** Es la técnica que se utiliza cuando, por razones de inaccesibilidad de diversa índole (encontrarse sumergida, radiación, inaccesibilidad física, etc.), no es posible la observación directa del objeto o la superficie a examen. En este caso se utilizan medios auxiliares más complejos, dispositivos electrónicos u ópticos, que hacen más difícil la evaluación de las indicaciones.

Los medios auxiliares que se suelen utilizar en esta técnica son telescopios, prismáticos, endoscopios, fibroscopios, cámaras de TV. La norma para esta modalidad exige que la resolución del examen mediante medios remotos sea, al menos, equivalente a la que se obtendría por un examen visual directo. En este caso, para garantizar la correcta resolución, el código ASME requiere la verificación de los equipos mediante el uso de la carta de ajuste (carta "Gray").

## **MEDIOS AUXILIARES DE INSPECCIÓN**

A continuación se presentan los medios auxiliares más utilizados en las inspecciones visuales:

**ESPEJOS.** Normalmente constan de una parte que actúa como tal que va unida a un mango el cual puede ser rígido o flexible, para adoptar diferentes configuraciones según sea requerido en la inspección.

**LENTES DE AUMENTO.** Son lentes convergentes que permiten observar un objeto con más detalle que a simple vista. El efecto conseguido es poder colocar el objeto de observación a una distancia menor que el "punto próximo" (definido como la mínima distancia a la que se puede colocar el dicho objeto para poderlo apreciar con el máximo detalle). De esa forma se consigue ver con un ángulo mayor, y por tanto con más detalle.

**CÁMARAS DE TELEVISIÓN.** Son el principal medio auxiliar para inspección visual remota en áreas de difícil acceso. Los tipos de cámara de TV más utilizados son la de tubo o "vidicon", que normalmente proporciona imágenes en blanco y negro, y la de captador de imagen, o CCD, que proporciona imágenes en color. Entre ambos tipos de cámaras existen diferencias, las cuales en algún caso ofrece a una técnica más ventajas, caso de la de tipo CCD, en el que su menor tamaño permite el examen visual en configuraciones y accesos muy pequeños. Además, existen otras ventajas de esta técnica, como que el CCD tiene más resistencia a las quemaduras producidas en la imagen y, también, a los golpes y a las vibraciones, más alta sensibilidad a los niveles bajos de luz y una mayor vida operativa.

Por otro lado, en ambos casos existen unos parámetros a tener en cuenta para la resolución de los sistemas, es el caso del ennegrecimiento de las lentes convencionales en ambientes radiactivos, que se solventa usando lentes de cuarzo no oscurecientes. Otro parámetro que afecta a la capacidad de visión del sistema es la iluminación. Por último, es muy importante tener en cuenta la resolución del equipo de TV o de grabación utilizado. Hoy en día, se están utilizando medios digitales que permiten su visualización en pantallas de ordenador cuya resolución es más elevada que las TV convencionales.

**FIBROSCOPIOS.** Son los medios auxiliares idóneos para exámenes remotos en áreas de difícil acceso. Su uso se da en tubos de pequeño diámetro, válvulas, turbinas,

internos de GGVV's, cambiadores de calor, etc.

Se suelen componer de un tubo, rígido o flexible, que aloja un cable de fibra óptica (material compuesto de filamentos de vidrio de alta calidad obtenidos por procesos de trefilado, con un diámetro entre 0.1 y 0.01 mm, con una gran resistencia a la tracción y flexibilidad, y cuya principal propiedad es conducir la luz independientemente de la forma que tome la fibra). En el extremo del tubo se fija un portalámparas con una bombilla halógena, que ilumina el área de inspección. La inspección con fibroscopios puede hacerse bien mirando directamente a la zona a inspeccionar, o bien acoplado al dispositivo una cámara fotográfica o de vídeo. Independientemente del procedimiento, se suele incorporar un sistema de enfoque regulable a base de lentes.

**EQUIPOS DE REGISTRO.** Los datos de los VT se pueden registrar con cámaras fotográficas o mediante el uso de equipos de grabación analógicos o digitales.

### **TIPOS DE EXÁMENES VISUALES**

Los cuatro tipos de examen visual que determina el código ASME XI son: Tipo VT-1.

Se realizarán para determinar el estado general del componente.

Tipo VT-2. Se realizarán para determinar y localizar la evidencia de fugas en los componentes que retienen presión.

Tipo VT-3. Se realizarán para determinar el estado mecánico y estructural de los componentes y sus soportes.

Tipo VT-4. Se realizará para determinar el estado de operabilidad de los componentes o dispositivos (actualmente se acepta que este grupo quede englobado dentro del VT-3).

A continuación se describen los procesos de examen visual nombrados anteriormente, según se recoge en ASME XI subartículo IWA 2210.

#### **EXAMEN VISUAL VT-1**

Se realizará este tipo de inspección para determinar el estado del componente, parte o superficie incluyendo la detección de grietas, desgaste, corrosión, erosión o cualquier daño físico de las superficies objeto del examen.

Para esta categoría de examen se pueden usar espejos que mejoren el ángulo de visión. También se pueden sustituirlos exámenes directos por medios auxiliares como telescopios, fibras ópticas, cámaras, lupas, etc. siempre que los mismos tengan una resolución equivalente a la obtenida por examen directo.

#### **EXAMEN VISUAL VT-2**

Este procedimiento se aplicará durante la ejecución de pruebas de presión funcionales o de sistemas, para localizar indicaciones de fugas en los componentes que retienen presión, o fugas anormales en los componentes con sistemas recolectores de fugas.

#### **EXAMEN VISUAL VT-3**

Se realizará un examen VT-3 para determinar el estado general mecánico y estructural

de los componentes y sus soportes, incluyendo detección de partes sueltas, productos de corrosión anormal, desgastes, erosión, corrosión y pérdida de integridad de las conexiones soldadas y atornilladas. En esta inspección se aplicará, si es pertinente, la medición de huelgos, detección de desplazamientos y asentamientos, conexiones entre miembros estructurales portantes de carga, etc. En soportes e interiores de componentes, se puede realizar una inspección visual remota, al objeto de determinar la integridad estructural, siempre que la resolución alcanzada por la técnica sea, al menos, equivalente a la de una inspección visual directa.

#### **EXAMEN VISUAL VT-4**

Este examen se realizará para la determinación del estado de operabilidad de componentes o dispositivos como amortiguadores hidráulicos o mecánicos, soportes de bombas, bombas, válvulas y soportes colgantes de carga constante o variable. El objeto del análisis es confirmar la adecuación funcional, verificación del montaje o libertad de marcha. Este examen puede requerir, eventualmente, desmontaje de componentes y/o pruebas de operabilidad.

### **3.- LÍQUIDOS PENETRANTES**

#### **PRINCIPIOS BÁSICOS. VENTAJAS Y LIMITACIONES**

El fundamento del examen es poner en contacto un líquido penetrante con la superficie a inspeccionar, para que éste se introduzca por capilaridad en los defectos abiertos en la misma. Posteriormente se limpia el sobrante de penetrante y lo que está alojado en las discontinuidades o grietas se hace salir a la superficie por medio de un medio revelador, que actúa como un papel secante. El penetrante que impregna al revelador, al ser de color o fluorescencia, destacará claramente sobre éste, observándose de esa manera el defecto.

La finalidad del ensayo por líquidos penetrantes (LP) es la detección de defectos que afloran a la superficie como grietas, porosidad, labios abiertos, pliegues, solapes, defectos laminares, etc. El ensayo se puede realizar sobre cualquier material no poroso, si bien en materiales ferromagnéticos es más conveniente realizar ensayo por partículas magnéticas (PM), ya que de ese modo se pueden obtener datos sobre grietas rellenas de óxido o defectos no abiertos a la superficie, pero cercana a ella (subsuperficiales). En el caso de materiales porosos la aplicación de LP no es apropiada, ya que los poros pueden enmascarar verdaderas indicaciones.

En líneas generales, se pueden establecer algunas ventajas y limitaciones de este medio de inspección:

Como ventajas:

- Es un procedimiento sencillo de aplicar, de modo totalmente manual. Esto es importante para la inspección de zonas de difícil acceso o de áreas locales de grandes componentes “in situ”.
- El tiempo que dura la inspección es muy corto, minimizando así la permanencia en zona controlada.

Las limitaciones son:

- Tiene un rango de aplicación reducido a defectos abiertos a la superficie, en materiales no rugosos.
- Es relativamente sensible al acabado superficial y a los tratamientos superficiales (cromado, anodizado, etc.).
- Los resultados obtenidos solo son útiles como indicación de defectos ya que no es posible un dimensionamiento exacto de los mismos.

## **LÍQUIDO PENETRANTE**

Las características que debe reunir un buen LP son: poder penetrar en grietas muy finas; no evaporarse; ser fácilmente eliminable de la superficie pero no de las grietas; no ser tóxico, inflamable o agresivo para las superficies de inspección; ser estable durante largos períodos de almacenamiento y económicamente rentable.

Estos requisitos expuestos dependen de algunas propiedades físicas:

**Poder Humectante:** Depende del líquido y de la superficie en contacto. Una forma de cuantificarla es medir el ángulo formado en el contacto entre la superficie del sólido y una gota líquida en contacto. Ángulos pequeños implican líquidos con buena penetrabilidad. Intuitivamente es la capacidad de un líquido para extenderse o mojar una superficie.

**Viscosidad:** Es una propiedad que se opone a la anterior pero es una medida de la capacidad que el líquido tiene de permanecer sin escurrir sobre la superficie. Es un factor básico para conocer el tiempo que se necesitará para que el penetrante se introduzca en los defectos.

**Volatilidad:** Se requiere que los penetrantes no sean excesivamente volátiles. Si los disolventes empleados lo son, su evaporación desequilibra la composición de las fórmulas con separación de fases, lo que baja el poder humectante.

**Inercia Química:** El penetrante no debe ser corrosivo para el material a inspeccionar. Un ligero poder corrosivo no es crítico ya que el tiempo de exposición del metal al penetrante no es excesivo y está controlado. En esos casos hay que tomar precauciones durante el proceso de lavado.

Se puede establecer una clasificación de los penetrantes existentes en el mercado, atendiendo al medio empleado para su eliminación, después del tiempo de exposición:

- Penetrantes lavables con agua.
- Penetrantes que requieren un emulsificador para su posterior lavado con agua.
- Penetrantes eliminables con disolventes especiales.

Dentro de cada uno de los grupos anteriores, se puede establecer una segunda clasificación en función del tipo de luz empleada para localizar las indicaciones una vez aplicado el revelador: existen productos visibles a la luz ordinaria; otros son visibles solo a la luz negra o UV; por último, otros penetrantes son visibles en ambos medios.



## **REVELADOR**

Los medios reveladores empleados cumplen, en general, las siguientes características:

- Debe ser absorbentes, para cumplir la función de “secante”.
- Debe poder distribuirse de manera fina y lo más uniforme posible. Así se consigue una buena definición del contorno de las discontinuidades.
- Debe cubrir suficientemente los colores de fondo de la muestra, que pueden llegar a enmascarar el ensayo.
- Tiene que ser fácilmente eliminable después de la inspección.
- No debe contener productos tóxicos o nocivos para el operador.

Los reveladores existentes, se clasifican en cuatro tipos: polvo seco, suspensiones de polvo en agua, disoluciones acuosas y suspensiones de polvo en disolventes.

## **SECUENCIA DEL ENSAYO**

La realización del ensayo por LP consiste en los siguientes pasos:

### **Preparación y Limpieza**

Se debe realizar una limpieza previa de la superficie a inspeccionar, porque podrían existir impurezas que impidieran la entrada del líquido en la grieta. Además, la propia suciedad puede absorber penetrante provocando la aparición de manchas e indicaciones falsas.

Las impurezas más frecuentes son grasas, aceites, pinturas, óxidos y cascarillas. Los procedimientos de limpieza usuales son vapor desengrasante, disolventes industriales, frotis con cepillos de alambre, etc. En algunos casos extremos pueden emplearse procesos como esmerilados, bruñidos, granallados y chorreados con arena. Se debe tener especial cuidado con los dos últimos métodos que pueden tapar defectos.

Después del lavado se debe secar la superficie con aire caliente o por evaporación normal.

### **Aplicación del Penetrante**

Los métodos de aplicación más comunes son: por inmersión, en el caso de piezas pequeñas o medias y con ayuda de equipos semi o automáticos; por pulverización con aerosol y equipos electrostáticos, en el caso de piezas de grandes piezas o zonas localizadas en grandes componentes; por chorreado a baja presión con equipos especiales; o por brocha en aplicación manual.

En cualquier caso la superficie debe quedar cubierta por una capa uniforme de líquido, sin formarse zonas sin líquido o burbujas.

El tiempo que se deja el penetrante en contacto con la pieza se llama tiempo de penetración. Éste es un factor crítico que será función del tipo de penetrante empleado (cada fabricante recomendará un rango) así como del material inspeccionado y del tipo de defecto que se quiera detectar. También es función de la temperatura a la que

se realice el ensayo, llegando a variar ese tiempo entre 5 y 60 minutos.

#### Eliminación de Exceso de Penetrante

El exceso que debe ser eliminado es el líquido que no se ha introducido en los defectos y permanece sobre la superficie, una vez transcurrido del tiempo de penetración. La elección del tipo de penetrante condiciona el proceso de lavado.

Para los penetrantes solubles en agua, bastará un lavado por inmersión, chorro de agua a presión o spray.

Otro tipo de penetrantes requieren un agente emulsificador. Una vez aplicado éste, la mezcla penetrante-emulsificador es soluble en agua y se elimina del mismo modo que se ha expuesto antes. En este caso el tiempo de emulsificado debe ser un dato suministrado por el fabricante, y variarán en función del estado de la superficie y del tipo de discontinuidad a localizar (indicaciones poco profundas y anchas requieren tiempos muy cortos).

Por último hay penetrantes que se suministran con disolventes específicos. En esos casos el proceso completo viene marcado por el fabricante y el exceso se suele eliminar con un trapo o papel absorbente impregnado en el disolvente.

#### Aplicación del revelador y Secado

En el caso de que el vehículo usado para la aplicación del revelador no sea agua, después de la eliminación del exceso de penetrante la superficie debe secarse totalmente antes de la aplicación del revelador (así el único líquido que puede entrar en contacto con el revelador es el penetrante introducido en las grietas). Si el revelador está en solución acuosa puede prescindirse del secado.

Otra vez el procedimiento de aplicación del revelador va a depender de la naturaleza del mismo. Los reveladores secos se aplican por inmersión directa (ya que suelen ser polvos ligeros y esponjosos) o, como mucho, con ayuda de una brocha o espolvoreando a mano o con pistolas aerográficas. Los reveladores en disolución o suspensión se aplican por inmersión, proyección con pistola, aerosoles o pintado a mano. Es conveniente incorporar sistemas de agitación o bombeo del revelador que aseguran la homogeneidad de la mezcla.

En cualquier caso, se pretende la deposición sobre la superficie a inspeccionar de una película homogénea de revelador, cuyo espesor influirá en los resultados del ensayo, enmascarando grietas si es muy gruesa o no dando suficiente contraste si es muy fina.

Después de la aplicación, se necesita un tiempo de revelado durante el cual el revelador se seca al aire, si se ha aplicado por vía húmeda o adquiere poder secante si es de tipo pulverulento.

#### Inspección y Evaluación

Una vez transcurrido el tiempo de revelado, puede observarse la pieza (si bien es aconsejable observar la superficie desde el momento en que se aplica el revelador). La forma en que empieza a exudar una indicación puede ser aclaratoria de su forma, antes de que se forme una mancha demasiado grande de revelado.

Para los penetrantes fluorescentes la inspección se hace con luz negra y en un medio lo más oscuro posible. En el caso de penetrantes revelables a la luz ordinaria, la observación se hace a simple vista o con ayuda de iluminación artificial. En esos casos la indicación es de color rojo sobre el fondo blanco del revelador.

La forma y profundidad de los defectos es proporcional a la indicación. En general el defecto suele ser de un tamaño un poco menor que la indicación y la profundidad se puede deducir por la cantidad de penetrante exudado.

La naturaleza del ensayo por LP no permite dar, por sí mismo, una información cuantitativa de los defectos, ni la posibilidad de un seguimiento fiable a lo largo de la vida del componente.

El tipo de defecto que es posible detectar con este método corresponden a:

- Grietas de solidificación. Ocurren durante la solidificación por la contracción del metal. Son, en general, rechazables ya que reducen la resistencia mecánica y pueden propagarse a fatiga.
- Grietas de proceso. Producidas durante un proceso de conformado. Las aparecidas por forja, extrusión y estirado o tratamientos superficiales suelen darse en cambios de sección y concentradores de tensiones, suelen ser rechazables. Las marcas de mecanizado no suelen ser rechazables.
- Indicaciones de discontinuidades laminares. Producidas en fundiciones con alta sollicitación o en pliegues de forja. Sólo son aceptables si se va a dar un mecanizado posterior.
- Indicaciones de porosidad. Son de forma redonda y son rechazables si son grandes. Las cavidades de contracción en fundición (rechupes) pueden producir indicaciones parecidas a grietas y son rechazables en fundición de alta resistencia.
- Indicaciones no relevantes. Son debidas a un lavado escaso o mala preparación superficial. A veces piezas caladas en otras o con marcas de montaje dan indicaciones no relevantes.

#### **4.- PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

##### **PRINCIPIOS FÍSICOS. FUNDAMENTO Y ALCANCE DEL MÉTODO**

Los fenómenos magnéticos tienen su origen en el movimiento de cargas eléctricas, entre las cuales se originan fuerzas magnéticas. Dichas fuerzas dependen del origen, configuración y naturaleza del material que las produce. Al igual que se indica en el apartado sobre CI, un conductor eléctrico (cable recto, espira o solenoide) produce un campo magnético, cuando a través de dicho conductor pasa la corriente eléctrica.

A nivel subatómico, los electrones tienen un giro alrededor de sí mismos, portando un momento magnético (o spin). Las sustancias que tienen compensados sus spines son las llamadas paramagnéticas y las que no los tienen son sustancias ferromagnéticas. A simple vista las primeras no reaccionan cuando son afectadas por un campo magnético exterior y las segundas se magnetizan (se

comporta como un imán natural), temporal o permanentemente en función de la intensidad del campo.

Supongamos que se tiene una barra de una sustancia ferromagnética dentro de un campo magnético  $H$ . Si el material es homogéneo las líneas de campo se distribuyen de manera uniforme. Pero si existe una discontinuidad en su interior, una grieta, las líneas se deformarían dependiendo de las propiedades de los distintos materiales involucrados. El fenómeno ocurre porque el aire, que llena la grieta, tiene una reluctancia mayor que la del material ferromagnético y, por tanto, las líneas de inducción la rodearán siguiendo una trayectoria de mínima reluctancia con menor distancia (la densidad de las líneas alrededor del defecto será mayor).

Cuanto mayor sea la densidad del material, mayor será la atracción magnética. Si se deposita un polvo de hierro de tamaño muy pequeño (poco peso y muy ferromagnético => fácilmente atraíble magnéticamente), se producirá una mayor concentración del polvo donde haya mayor densidad de flujo, o sea alrededor de las discontinuidades.

La tecnología asociada al examen requiere poder inducir un campo magnético, cuya distribución de líneas de campo sea conocida y pertinente al ensayo a realizar.

En cuanto al alcance del método, ya se ha explicado que las indicaciones superficiales afectarán fuertemente a la distribución de líneas en la superficie, provocando orientaciones definidas de las partículas aplicadas. Lo dicho incluye no sólo a defectos sino también a otras propiedades geométricas como cambios en la superficie, chaveteros, ranuras, taladros, interfases de metales, etc. En el caso de discontinuidades subsuperficiales, se darán los mismos fenómenos de desviación de las líneas de campo, pero su efecto sobre la superficie será menor. Por ello se puede afirmar que no se detectará ninguna discontinuidad que esté a más de 7 mm de la superficie.

Otro factor básico, que condiciona la capacidad de detección del método, es la posición angular relativa entre grietas y líneas de campo, entendiendo por grieta cualquier quebradura en la continuidad del material que no se deba a la geometría de la pieza. Es claro que si su orientación es paralela, la perturbación de las líneas será mínima y difícil de detectar. En las inspecciones reales, al no conocer la orientación de los defectos a priori, se deberá producir un campo de suficiente intensidad y con al menos dos orientaciones perpendiculares entre sí. Entendiéndose que la detección será óptima cuando el defecto sea perpendicular a las líneas del campo inducido.

## **PROCEDIMIENTOS DE INDUCCIÓN**

Se explican en este punto los diferentes procedimientos para inducir un campo magnético que afecte a la pieza objeto de la inspección. Por la posterior aplicación de partículas se ponen de manifiesto las alteraciones en las líneas de campo y por tanto las indicaciones de defecto. Como los componentes que se inspeccionan normalmente por PM son de simetría axial y de revolución (ejes, árboles, rotores de turbina, etc.) los métodos de inducción de campo se dividen en: los que producen líneas circulares en planos perpendiculares al eje de revolución y los

que generan campos cuyas líneas son paralelas al eje y recorren longitudinalmente la pieza.

**Campo Circular.** Todos los métodos se basan en la generación de un campo magnético cuando una corriente eléctrica circula a lo largo de un hilo conductor. Las líneas son circulares y cerradas, en planos normales al eje del hilo y concéntricas a él. Dicho campo se puede inducir de dos maneras:

- por magnetización directa, o cuando el flujo de corriente eléctrica se hace a través de la propia pieza (por aplicación de dos bornes cargados en ambos extremos de la pieza).
- por magnetización indirecta, si no hay paso de corriente o si la circulación de corriente se da en un conductor próximo a la pieza a magnetizar, quedando la pieza dentro de una zona de influencia magnética suficiente. Se usan imanes permanentes (sin corriente) o conductores coaxiales con la pieza (bores de turbina) o bobinas laterales según sea la geometría de la pieza a inspeccionar.

**Campo Longitudinal.** Es el campo cuyas líneas de flujo no se cierran dentro de la pieza, sino que lo hacen a través del aire u otro material. Hay dos métodos para inducir este tipo de campo, que son:

- Mediante un electroimán. Cuando el tamaño de la pieza lo permite, se ponen en contacto los extremos de la misma con los bornes de un electroimán con forma de yugo. Así se da una configuración de líneas cerradas que en el interior de la pieza examinada circula entre los puntos de contacto con los bornes del electroimán.
- Mediante una bobina coaxial. Se arrolla un bobinado alrededor del componente a inspeccionar. Al circular una corriente por las espiras, se induce un campo resultante cuyas líneas circulan por el interior del solenoide y se cierran por el exterior. El tramo que circula por el interior es el que afecta a la pieza objeto de la inspección. Este procedimiento se usa en inspección de grandes ejes con simetría axial.

## **SECUENCIA DEL ENSAYO**

La secuencia general en una inspección por PM es: limpieza de la pieza; magnetización longitudinal; aplicación de partículas; inspección de posibles indicaciones; magnetización circular; inspección de posibles indicaciones; desmagnetización. Se dan algunos datos más sobre cada proceso.

**Limpieza de la pieza:** La pieza deberá estar limpia de grasa, suciedad u otra sustancia que impida la movilidad de las partículas. Para ello se usarán disolventes, desengrasantes o vapor si fuera necesario.

**Magnetización:** Aplicar la corriente alterna o continua para magnetizar la pieza a ensayar. Se usan placas de contacto o electrodos en función de la geometría de las caras que actuarán como polos en la pieza, aunque el equipo más sencillo y utilizado es el llamado yugo magnético.

**Aplicación de partículas:** El campo magnético es mayor cuando hay paso de corriente, disminuyendo al valor remanente del campo al cesar la magnetización. Dicho valor remanente será alto en materiales con alto contenido en carbono, pero puede no ser suficiente para aceros aleados. Se deducen pues, dos modos de aplicación de partículas: continua (aplicación durante la magnetización) y residual (aplicación posterior a la magnetización). En cuanto a la vía de aplicación de las partículas hay dos variantes: vía húmeda, en la que se aplica una pasta o suspensión de las partículas en un medio de agua, aceite mineral o petróleo; o vía seca, en la que se usa polvo de tamaño entre 0.1 y 0.4 mm. Estas dan buen resultado en la detección de defectos subsuperficiales.

**Observación de indicaciones:** La observación de las acumulaciones de partículas (magnetograma) se puede realizar con luz ordinaria (uso de partículas coloreadas) o con luz UV (partículas fluorescentes).

El examen a la luz ordinaria se hace mirando, directamente o con lupa, las agrupaciones significativas alrededor de zonas de riesgo de aparición de defectos. El examen con luz UV se hace iluminando con lámparas de vapor o mercurio.

En los casos en que interesa conservar una réplica de un magnetograma concreto, se usan técnicas fotográficas u otras que reproducen las agrupaciones de partículas generadas, como son la copia en papel secante o en láminas adhesivas.

**Desmagnetización:** Es la operación inversa a la magnetización inicial y consiste en la aplicación de un campo magnético de signo opuesto al inicial, que elimine la magnetización remanente de la pieza inspeccionada. Este proceso es necesario, en primer lugar para facilitar la limpieza de las partículas magnéticas una vez terminado el ensayo, pero hay otras razones que exigen el carácter no magnético de la pieza en funcionamiento, como son: evitar de interferencias con instrumentos electrónicos; de interferencias en procesos de mecanizado con arranque de viruta, soldadura; de dificultades de aplicación de tratamientos superficiales como anodizado o pintura.

## **TIPO DE DEFECTO**

Una ventaja de este ensayo con respecto al de LP es que es capaz de detectar defectos que no afloran a la superficie, o sea subsuperficiales.

Una primera clasificación de los defectos detectables por PM divide a los defectos en: producidos durante la fabricación y producidos durante el servicio.

En el grupo de los primeros están las grietas de forja, fundición, mecanizado, tratamiento térmico, defectos de laminación, inclusiones, etc. Dentro de las uniones soldadas pueden darse faltas de penetración en soldadura, mordeduras en los bordes de la preparación y grietas superficiales de contracción del cordón.

Dentro de los defectos producidos durante el servicio, cabe destacar las grietas producidas por fatiga y las localizadas en zonas roscadas. Este método de inspección es utilizado para la inspección de los pernos de elementos embridados (válvulas, bocas de hombre, tapa de vasijas a presión, etc.).

## **5.-RADIOGRAFÍA**

### **FUNDAMENTO DEL MÉTODO. VENTAJAS Y LIMITACIONES**

La radiografía es uno de los procedimientos de END basados en la absorción diferencial de la radiación penetrante (electromagnética o partículas) por parte del componente inspeccionado. El concepto significa que diferencias de espesor o densidad en el objeto de inspección producen distinto grado de absorción de la radiación penetrante.

Se entiende por radiografía el proceso por el cual se bombardea un objeto con un haz de radiación ionizante (rayos X o  $\gamma$ ). La parte de radiación que no es absorbida por el objeto, incide sobre una placa impregnada de una sustancia radio-impresionable, generando una imagen latente. Al revelarse por un procedimiento fotográfico convencional se visualiza una imagen bidimensional.

Las diferencias de densidad, espesor y composición en el objeto implican variaciones en la absorción de la radiación, lo que se traduce en diferencias de densidad fotográfica (intensidad de sombra) de la película obtenida.

La evaluación de la radiografía se realiza por inspección directa o por comparación con otras placas obtenidas de bloques que contienen defectos implantados de manera controlada.

Así los tres elementos básicos del método son: fuente de radiación, objeto a examinar y medio de registro (usualmente película).

En cuanto al tipo de defectos detectables, la capacidad de detección será mayor cuanto mayor sea la diferencia de espesor provocada por el defecto. Por RT se ven los defectos que tienen un espesor apreciable en la dirección paralela al haz radiante, por lo que las indicaciones planas como grietas, etc. serán registradas o no en función de la orientación de la pieza durante el examen. Otro tipo de discontinuidades, como microfisuras, defectos de laminación, etc., son difíciles de detectar independientemente de su orientación.

Para comprender mejor el campo de aplicación del RT se enumeran ventajas y limitaciones del método:

#### **Ventajas:**

- Puede emplearse con la mayoría de materiales.
- Proporciona una imagen de la “naturaleza interna” del objeto ensayado, en un soporte permanente (película).
- Descubre errores de fabricación y a menudo indica acciones correctoras.
- Revela discontinuidades estructurales.
- Es relativamente rápido y automatizable.

#### **Limitaciones:**

- Es caro, comparado con otras técnicas.
- Necesita un espacio para laboratorio.
- En inspección de grandes piezas, el examen es lento y precisa fuentes muy potentes (lo que dispara el precio de los equipos y obliga a precauciones

especiales de Protección Radiológica).

- Ciertos tipos de defectos son difíciles de detectar, por la orientación de la pieza (grietas) o independientemente de ésta (microfisuras, defectos de laminación, etc.).
- Dificultad de posicionamiento en geometrías complejas y zonas poco accesibles.
- Falta de definición sobre profundidad de defectos detectados. Necesidad de varias exposiciones con diferentes ángulos de incidencia, sobre la misma zona.

Los dos tipos de radiaciones empleados en las técnicas de RT son los rayos X y  $\gamma$ , emitidos siempre en procesos de desintegración radiactiva. El fenómeno de emisión es diferente y por tanto también lo son los equipos generadores de radiación. A partir de esto, se establece una primera clasificación en: Radiografías (obtenidas a partir de radiaciones X) y Gammagrafías (obtenidas por emisión de  $\gamma$ ).

### **EQUIPOS DE GENERACIÓN DE RADIACIÓN X y $\gamma$**

El origen de la emisión de cada tipo de radiación es distinto por lo que también lo son las fuentes empleadas en la inspección por RT.

Los rayos X se generan acelerando los electrones emitidos por efecto termiónico en el cátodo, hacia un ánodo o anticátodo constituido por un elemento de peso atómico elevado.

El tubo de rayos X está formado por una ampolla de vidrio sometida al vacío en la que se hallan un electrodo positivo “ánodo” y un electrodo negativo o “cátodo”. El cátodo consiste en un filamento de tungsteno, que al ser recorrido por una corriente eléctrica se pone incandescente emitiéndose unos electrones. Estos electrones están expuestos a una gran diferencia de potencial generada entre el ánodo y el cátodo, siendo acelerados y chocando contra el ánodo en el que se encuentra una placa metálica (llamada anticátodo), la cual por efecto del bombardeo emite rayos X.

Por el contrario, los rayos  $\gamma$  se emiten de manera espontánea acompañando a la emisión de partículas  $\gamma$  y a ciertas formas de desintegración  $\beta$ , en el interior de tubos catódicos sin existencia de bombardeo.

Existen dos elementos que podrían ser usados como fuentes de rayos  $\gamma$  en RT: el radio y el mesotorio. Sin embargo, la radiación que emiten es muy dura (útil para radiografiar grandes espesores), pero impide el uso de fuentes suficientemente pequeñas para que la calidad obtenida sea buena, además tiende a emitir gases radiactivos. Por ello se utilizan fuentes radiactivas artificiales, que no son más que ciertos isótopos obtenidos a partir de otros no radiactivos por irradiación neutrónica o productos derivados de fisión.

Para facilitar el manejo, los isótopos usados como fuentes se suministran encapsulados en contenedores de fuentes. Suelen ser dispositivos que contienen la sustancia radiante dentro de un blindaje, y disponen de un sistema de apertura direccional (de accionamiento remoto) que controla el tiempo e intensidad de exposición.

La irradiación por exposición a isótopos (rayos  $\gamma$ ) presenta ventajas e



inconvenientes respecto a la aplicación de rayos X:

#### **Ventajas de $\gamma$ frente a X:**

- No se necesita corriente eléctrica ni refrigeración, por lo que son fáciles de usar en campo.
- Se pueden aplicar a corta distancia foco-película, por tener un foco pequeño.
- Algunos isótopos tienen un alto poder de penetración => tiempo de exposición corto.

#### **Inconvenientes de $\gamma$ frente a X:**

- La imagen obtenida es menos contrastada, por ser la radiación más dura.
- La radiación no es regulable.
- Exige manipulación cuidadosa.
- La actividad de las fuentes decae en períodos cortos => alto coste.

### **PELÍCULA RADIOGRÁFICA**

El principal medio de registro es la película radiográfica, similar a la fotográfica. Presenta un soporte flexible transparente llamado base y una capa radiosensible o emulsión (gelatina con cristales de haluros de plata), que en este tipo de película está presente en las dos caras para reducir el tiempo de exposición y mejorar el contraste.

En los procesos de revelado se hace precipitar la plata de los granos de la película sensibilizados por la radiación. Una vez separada, ésta se oxida adquiriendo el color negro común en radiografías. Así se puede establecer una relación: mayor recorrido de la radiación en el material => mayor pérdida de energía de la radiación => menor radiación incidente sobre la película => menor cantidad de plata precipitada => menor oscurecimiento (contraste) sobre el revelado. Si se entiende un defecto como una zona que presenta falta de material, en esa zona la radiación “pierde menos energía” y genera una zona de oscura sobre el revelado.

De lo dicho se deduce que algunas características de las películas son: la densidad de haluros en la emulsión; el tiempo necesario de exposición (velocidad de la película); la sensibilidad o tamaño mínimo de los defectos detectables con esa película.

### **PROCESO RADIOGRÁFICO**

Una vez definido el equipo y el medio de registro (película radiográfica) a utilizar se describen las fases y parámetros a considerar:

Material del objeto a examinar: Hay que conocer la absorción del material a la radiación, que depende de la densidad, el espesor y el número atómico, para estimar la cantidad de radiación que llegará a la película.

Cantidad y Calidad de la Radiación: La primera depende de la distancia fuente- película

y de la actividad de la fuente (rayos  $\gamma$ ) o de la intensidad de corriente catódica (rayos X). La segunda, que equivale al poder de penetración y al valor de  $\lambda$ , depende del tipo de isótopo (en  $\gamma$ ) y del voltaje en el tubo (en X).

**Tiempo de Exposición:** Tiene una influencia directa sobre el contraste (diferenciación entre tonos de gris). Tiempos cortos producen poca definición y tiempos excesivamente largos dan ennegrecimiento general. Existen gráficas empíricas que dan el tiempo óptimo en función del material y espesor de la pieza, tipo de película, distancia foco-película, etc.

**Colocación de Elementos:** La posición relativa entre pieza, fuente y película definirá el área inspeccionada, así como el recorrido por el haz de rayos en el interior de la pieza, la orientación de los defectos visibles, etc.

**Ensayos en Blanco. Obtención de Testigos:** Esta práctica se hace para asegurar la correcta calibración de los equipos, que garanticen la calidad de inspecciones panorámicas con muchas exposiciones.

**Revelado:** Los materiales y tiempos de revelado vendrán dados, por un lado, por las características de los materiales comerciales empleados y, por otro, por los parámetros empleados durante el ensayo.

## **6.- ULTRASONIDOS**

### **FUNDAMENTOS FÍSICOS. DEFINICIONES**

El ensayo por UT se basa en la aplicación de ondas elásticas en forma de impulsos cortos que se propagan a través del material que se inspecciona, analizando posteriormente las ondas reflejadas.

Se dice que las ondas son elásticas porque, al contrario que la luz o las ondas de radio, necesitan un medio a través del cual transmitirse (no se transmitirían en el vacío). Esta es una característica de todas las ondas sonoras. En concreto los ultrasonidos no son más que sonidos cuya frecuencia está por encima del campo de frecuencias audibles (20 Hz a 20 kHz). Lo normal es emplear frecuencias por encima de 1 MHz en exploraciones.

En el ensayo por UT se utiliza la emisión por impulsos de las ondas; el tiempo de emisiones es del orden de microsegundos con un tiempo entre impulsos consecutivos de algunos milisegundos. El sistema de ensayo está en silencio aproximadamente 1000 veces más tiempo recibiendo que emitiendo. La información sobre el material que se inspecciona se deduce de las ondas se han sido emitidas y vuelven al punto inicial en forma de ondas reflejadas, por eso interesa maximizar el tiempo “de escucha”.

El sonido puede propagarse por un material según dos tipos fundamentales de onda: longitudinal y transversal. Existen otros modos de propagación mucho menos usados en técnicas END (superficiales, de barra y de Lamb), de las que no se hablará.

**Onda Longitudinal (O.L.):** Se llama así porque las partículas de material oscilan en la misma dirección en que se propaga la onda. También se llaman ondas de compresión, porque ése es el efecto que tienden a realizar sobre el material, y son del mismo tipo que las ondas sonoras del espectro audible. La velocidad de

propagación de este tipo de ondas, es una característica intrínseca de cada material (dependiendo de su densidad, estructura molecular, etc.).

**Onda Transversal (O.T.):** En este caso las partículas oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. El esfuerzo entre planos de átomos tiende a cortar el material, por lo que también se llaman ondas de cizalladura. Este tipo de ondas sólo son transmisibles en los sólidos, ya que ni los líquidos ni los gases presentan resistencia a la cortadura y, por tanto, son incapaces de transmitir esfuerzos en esa dirección. Esa será una propiedad importante a la hora de detectar inclusiones de aire o agua en materiales metálicos. La velocidad de propagación de ondas transversales es siempre menor que la de las longitudinales. En el acero es del orden de la mitad (3240 m/s por 5920 m/s para las longitudinales).

**Onda Superficial:** Se llaman también ondas de Rayleigh y son un caso particular de ondas transversales. Afectan sólo a la superficie del material y se parecen a las ondas que se producen en un estanque al tirar una piedra. Su velocidad de propagación es un poco inferior a las de las O.T. Son poco empleadas porque para detección de defectos superficiales existen métodos específicos como PM y LP y, actualmente, las corrientes inducidas.

## **GENERACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS**

Los ultrasonidos empleados en inspección se generan basándose en el efecto **piezoeléctrico**, según el cual “ciertos cristales sometidos a determinada presión, adquieren cargas eléctricas en su superficie, existiendo una proporcionalidad entre la presión ejercida y las cargas liberadas”.

En concreto, para la generación del eco de emisión en los palpadores se usa el efecto piezoeléctrico inverso: con un oscilador se aplican cargas alternas en los bordes del cristal, el cual se dilata y contrae a la misma velocidad que oscila la carga. Así las sucesivas contracciones y dilataciones producen la emisión de la onda de presión ultrasónica.

La información contenida en las ondas sónicas que vuelven reflejadas hacia el cristal, se convierte en impulsos eléctricos en el cristal, por efecto piezo- eléctrico directo. Esos datos son registrados y analizados por medio de un osciloscopio.

En cuanto a la naturaleza de los cristales empleados para la emisión ultrasónica, los más utilizados son: cuarzo, sulfato de litio o materiales cerámicos.

La máxima eficacia se consigue cuando la frecuencia de excitación aplicada coincide con la frecuencia característica del cristal. Esta depende de la velocidad de propagación acústica del cristal y de factores geométricos. Del mismo modo se puede controlar la emisión de ondas longitudinales o transversales según se conecte el cristal al circuito oscilador. En general se elige inspeccionar por medio de emisión de O.L u O.T. en función de la orientación de los defectos que se espera encontrar (paralelos o perpendiculares a la dirección de emisión del eco).

**Palpadores:** Como se ha dicho, la parte activa del sensor es el cristal, que en caso del ensayo por UT se suele incluir dentro de cajas metálicas cerradas llamadas

palpadores.

Los palpadores se clasifican en:

- **Palpadores normales:** Un palpador de incidencia normal se constituye por un transductor, que convierte los impulsos eléctricos en ondas sónicas, y una capa de amortiguador que se coloca en la parte trasera del mismo. Ésta suele estar constituida por mezclas de polvo metálico (W o PB) con mica y resinas “epoxi” como aglomerante, siendo su función doble: Por un lado frena la oscilación libre del cristal, evitando así oscilaciones demasiado largas; por otro absorbe el haz ultrasónico que se emite hacia atrás, que, por supuesto es idéntico al emitido hacia delante pero no sirve a efectos de inspección y debe ser anulado. De no hacerse así daría señales parásitas o aumentaría la zona muerta.

Por último existe una carcasa exterior metálica que no sólo sirve como protección contra golpes y desgaste sino también hace de puente de acoplamiento entre las impedancias acústicas del cristal y el material a inspeccionar.

- **Palpadores de inmersión:** Son idénticos a los anteriores, aunque su carcasa está diseñada para que no penetre agua en su interior. Es frecuente que estén focalizados con una lente esférica (alta precisión para emitir hacia una zona concreta), con lo que el diámetro del haz se reduce mucho obteniendo una gran resolución lateral. Esto es fundamental a la hora del dimensionado de un reflector.
- **Palpadores angulares:** Se construyen montando un transductor normal sobre una cuña de metacrilato, con el ángulo adecuado para que la refracción del material a inspeccionar se produzca según el ángulo y tipo de onda deseado. Los más usuales son los de 45, 60 y 70° de onda transversal. La parte frontal está formada por un material absorbente que evita el retorno al cristal de las ondas reflejadas en la interfase.
- **Palpadores de doble cristal:** Al emplear palpadores normales se da el problema de que existe una zona muerta que impide detectar reflectores próximos a la superficie, por quedar dentro del área de influencia del eco de emisión. Para solventar este problema, se fabrican palpadores emisor- receptor o “bicristales” en los que hay dos cristales separados por un tabique aislante montados sobre bases de “perpex”. Así la zona de influencia del eco de emisión queda dentro del recorrido previo en el “perpex”.

Otros factores importantes a la hora de elegir un sistema equipo-palpador para un examen concreto, son:

- El poder de resolución del palpador, que mide la capacidad de detectar separadamente reflectores muy próximos. Depende de las características constructivas del palpador. Si el transductor es de impulsos cortos y además se instalan materiales amortiguantes de la onda sonora, el poder de resolución será máximo. Por otro lado, la forma y duración del impulso eléctrico que excita al cristal condiciona el impulso acústico. Cuanto más corto sea el impulso acústico mayor será la resolución.
- El medio de acoplamiento. El aire transmite muy mal el sonido a frecuencias ultrasónicas. Es por eso que para poder inspeccionar por contacto es necesario eliminar la interfase de aire entre el palpador y el medio a inspeccionar. Eso se

hace con el medio de acoplamiento o acoplante.

Los empleados son líquidos o semilíquidos (agua, aceite mineral, glicerina, etc.) en función de factores como el acabado superficial de la pieza, la temperatura de trabajo, la limpieza del medio etc. En general el agua y los acoplantes de baja viscosidad son adecuados para superficies con buen acabado, mientras que en superficies rugosas se usa aceites de alta viscosidad. Para regular la viscosidad del acoplante, adaptándola al medio a inspeccionar se usan mezclas de agua con glicerina o pasta para empapelar. Por último en ensayos a temperatura elevada se usan grasas de silicona, que permiten trabajar hasta 200 - 250°C.

## **TECNICAS**

En general todas las técnicas se basan en la emisión de ecos por los palpadores hacia el volumen de inspección. Posteriormente se registran los ecos reflejados o refractados, una vez que han recorrido el material metálico examinado.

Se puede establecer una primera clasificación de las técnicas en:

- método de resonancia-método de transparencia o sombra
- métodos de impulso - eco

Los métodos de resonancia e impulso - eco operan por reflexión, es decir que se analizan las ondas reflejadas, mientras que el de transparencia opera por reflexión o transmisión.

**Métodos de resonancia:** Se usan fundamentalmente para la medida de espesores en componentes de superficies paralelas. El procedimiento consiste en aplicar un haz ultrasónico continuo y con un amplio espectro de frecuencias, normalmente a la superficie a inspeccionar (por medio de un palpador normal o de 0°). Las ondas sónicas cuya longitud de onda sea un submúltiplo del espesor de la pared tenderán a reforzarse por superponerse en fase, dando lugar a un fenómeno de resonancia, o sea, la formación de ondas estacionarias. Las ondas emitidas con distinta  $\lambda$  perderán energía y se atenuarán en la interfase opuesta metal - aire.

El mismo palpador emisor actúa como receptor de la onda estacionaria reflejada en la interfase y la transforma en señal eléctrica.

**Métodos de Transparencia o sombra:** Se basan en el efecto de sombra que un obstáculo (heterogeneidad en el seno de un medio conductor) produce al ser "iluminado" por un haz ultrasónico. En este caso el palpador emisor y el receptor actúan separados y opuestos entre sí, recogiendo el segundo la debilitación de la energía acústica del campo debida al obstáculo interpuesto. En función de la accesibilidad de la pieza a inspeccionar, se pueden emplear como emisor y receptor palpadores normales, si hay acceso a ambas paredes de la pieza y se coloca cada uno de ellos paralelos y sobre caras opuestas (trabajo por transmisión). En el caso más frecuente, de que solo haya acceso desde una superficie se pueden usar como emisor y receptor palpadores de emisión angular, de manera que lo que se registra en el receptor es el eco reflejado en la interfase "del fondo" de los haces que no han sido atenuados por ninguna indicación intermedia (también llamado método pitch & catch). En este caso el posible defecto es detectado por una discontinuidad

en la Están basados en el efecto de eco que un transmisión del haz ultrasónico emitido.

**Métodos de Impulso - Eco:** Están basados en el efecto de eco que produce un “reflector” al ser “iluminado” por un haz ultrasónico. En estos métodos, el receptor, separado del emisor o formando una unidad con el cristal emisor (palpador monocristal) solamente recogerá un eco devuelto si el haz encuentra un reflector en su camino, transformándolo en la indicación correspondiente.

Otra vez, en función de la accesibilidad del componente a inspeccionar, se puede calibrar el equipo de recepción para que registre si se produce un haz reflejado antes de llegar “al fondo” de la pared (tiro directo o medio salto) o bien después de la reflexión en la pared del fondo (salto completo o doble salto). Este último procedimiento es muy útil cuando hay que cubrir grandes espesores o cuando es necesario asegurarse de que se van a detectar defectos o grietas que están orientados según una inclinación parecida a la del haz de emisión. Con este método se detectarían en el segundo rebote del haz. El inconveniente del procedimiento es que al reflejarse el haz en el fondo se produce una gran pérdida de energía acústica y el haz tiende a dispersarse, por lo que se pierde resolución y poder de dimensionamiento.

En cuanto a las técnicas operativas, existen fundamentalmente dos tipos de ensayos en función de que el palpador esté o no en contacto directo con la superficie del componente a inspeccionar. En el primer caso se habla de **ensayos por contacto** y siempre se añade un medio acoplante para asegurarse la continuidad de un medio conductor desde el cristal de emisión hasta el material metálico. En ocasiones no es necesario mantener el palpador en contacto con la pieza, ya que ambos se sumergen total o parcialmente en el seno de un fluido conductor. En esos casos se habla de **ensayos por inmersión**, y suele ser el procedimiento usado para inspecciones en laboratorio, calibraciones de equipos, desarrollos de procedimientos de inspección.

Para el ensayo por ultrasonidos es muy importante que se elabore de manera detallada el procedimiento y que se seleccionen adecuadamente los parámetros esenciales aplicables, como por ejemplo la frecuencia, tamaño, tipo y ángulo del palpador, número y tipo de exploraciones, y, también, los márgenes de calibración y sensibilidad del ensayo, mediante los cuales se asegure la fiabilidad del citado ensayo. Pero si asegurar la capacidad de detección de defectos es muy importante en este tipo de ensayo, también lo es caracterizar la naturaleza de las imperfecciones detectadas y determinar su tamaño con el fin de determinar si el componente examinado es apto o no para la operación en esas condiciones. Por todo ello, tras la realización de la calibración mediante el uso de bloques patrón, en el que existen defectos con tamaños conocidos, y la ejecución de la inspección, en caso de detectarse indicaciones, éstas deberán ser discriminadas mediante métodos de dimensionamiento.

Los principales métodos de dimensionamiento están basados en el empleo del movimiento del palpador y la amplitud de los ecos. En definitiva, para el dimensionamiento exacto del defecto es esencial el uso del control de la ganancia.

Los métodos de dimensionamiento más conocidos basados en el movimiento del palpador son:

- Técnica de la caída de 6 dB o “eco mitad”. Es muy utilizado para el dimensionamiento de indicaciones planas grandes.
- Técnica de la caída de 20 dB. Utilizado para el dimensionamiento de indicaciones pequeñas durante la inspección de soldaduras con palpadores angulares.
- Método TOFT (Time-Of-Flight Diffraction): Está basado en el fenómeno de difracción producido por la punta de las grietas. Se utiliza de manera general para el dimensionamiento de los defectos de grietas pequeñas, del tipo de corrosión bajo tensión (SCC).

En cuanto a los métodos basados en la amplitud, los más empleados son:

- Bloque comparador: Este es el método más sencillo, consistente en comparar el eco de una indicación con el del reflector artificial (bloque de calibración).
- Curva de corrección Amplitud-Distancia (DAC). Se establece mediante la fase de calibración del equipo usando el bloque de calibración.
- Método de los diagramas AVG: Es un método de corrección tamaño-ganancia-distancia ideado por un fabricante de palpadores “Krautkrämer”. Se basa en la representación gráfica de las magnitudes de varios ecos producidos por reflectores de diferentes tamaños, localizados a diferentes distancias del palpador. Cada gráfica está asociada a un modelo de palpador.

## **7.- CORRIENTES INDUCIDAS**

### **FUNDAMENTOS FISICOS. PARAMETROS**

La inspección por CI se basa en la inducción de corrientes de Foucault, sobre un material metálico en presencia de una bobina a través de la cual circula una corriente eléctrica.

Si se tiene una bobina aislada, alimentada en sus extremos por una corriente alterna de frecuencia conocida, se creará un campo magnético variable que cambia de dirección cada vez que cambia el sentido de la corriente circulante. La bobina aislada crea un campo magnético (campo de vacío), siendo su impedancia una de valor fijo.

Sin embargo, si en las proximidades del campo magnético de vacío hay un material conductor, dicho campo penetra en el material y por efecto de la inducción magnética aparecen unas corrientes circulares y cerradas, que son perpendiculares a las líneas del campo inductor, y que a su vez generan otro campo magnético, llamado campo de reacción, opuesto al campo de vacío. La composición de ambos campos, modifican la impedancia de la bobina.

El fundamento de la inspección por CI es el siguiente: al acercar una bobina (a través

de la cual circula una corriente) a una superficie metálica, toda variación de dicha superficie (grietas, fisuras, cambios de dimensiones, etc.) hace que varíe la intensidad de las corrientes inducidas generadas dentro de la pieza. Esa variación da como resultado un cambio en la impedancia de la bobina. Se establece, por tanto, una relación biunívoca defecto vs variación de impedancia.

Las corrientes inducidas son de la misma frecuencia que la corriente de excitación, pero de fase distinta. Además tienden a oponerse a las variaciones de flujo que las originan, aumentando su intensidad con la conductividad del material. Esto lleva a la necesidad de conocer los factores que influyen en la magnitud de las CI, y por tanto de la señal registrada durante los ensayos.

- Debidos a los equipos empleados: Frecuencia de excitación, dimensiones y forma de la sonda (bobina) y distancia entre la pieza a examinar y la sonda (lift-off).
- Debidos a las propiedades de la muestra y el ambiente: conductividad térmica, permeabilidad magnética, dimensiones y forma, tensiones internas, temperatura, tipo de defecto.

## **CAMPO DE APLICACIÓN**

El ensayo por CI de materiales conductores tiene por objetivo comprobar la homogeneidad de las características metalúrgicas y mecánicas de las piezas, detectando los posibles defectos presentes en ellas, provocados bien durante el proceso de mecanización y tratamiento térmico o bien durante la instalación u operación del componente.

Las técnicas de inspección por CI se han desarrollado en CCNN, principalmente, para la vigilancia de tubos metálicos de pared fina, básicamente de haces de tubos de generadores de vapor o cambiadores de calor.

En los últimos años, sin embargo, el ensayo de CI se ha ido extendiendo a otros usos debido a la sensibilidad de las sondas de CI para caracterizar el estado de la superficie de examen, siendo muy habitual realizar inspecciones de cladding, medición de expansionado de placas tubulares y en general medida de continuidad de superficie metálica en muchos componentes de primario (shroud, codos de bombas de chorro, penetraciones de barras de control, etc.).

En general se puede decir que las aplicaciones más frecuentes son en tubos cuyo diámetro exterior está entre 5 y 25 mm. Para tubos de mayores dimensiones, sobre todo en espesor, se tienden a usar técnicas de UT. En el control de tubos de muy pequeño diámetro, la falta de rigidez del material harían necesarios haces ultrasónicos extremadamente finos. El método de CI es válido por medio del uso de bobinas envolventes.

Se enumeran a continuación las ventajas e inconvenientes del método de examen por CI:

### **Ventajas:**

- Obtención casi instantánea de la señal, sin necesidad de post-procesos (como en PT o RX).
- Permite obtener altas velocidades de inspección.



- Posibilidad de aplicación a un examen del tipo pasa - no pasa.
- Ausencia de necesidad de un medio acoplante.
- No influencia de agua o lubricantes en la superficie a inspeccionar.
- Posibilidad de automatización de la inspección.

#### **Limitaciones:**

- Sólo es aplicable a materiales metálicos específicos (los no ferromagnéticos).
- Existe gran cantidad de parámetros que pueden influir en la señal: conductividad del material, permeabilidad magnética, tratamientos superficiales, variaciones de frecuencia de emisión, etc.
- La capacidad de penetración de la señal en el material es limitada, del orden de 6 mm como máximo.

#### **EQUIPOS DE INSPECCIÓN**

Otra de las ventajas de este método de examen frente a otros es que, si bien no proporcionan una información exhaustiva sobre el componente (volumen completo en piezas de espesores grandes), el equipo necesario para realizar una inspección es bastante sencillo.

De acuerdo con lo ya expuesto, el primer elemento será la sonda, integrada fundamentalmente por una bobina que crea el campo magnético de vacío y reciba el campo de reacción creado por las corrientes inducidas. El resto de la sonda será un sistema mecánico que proteja la bobina del desgaste y asegure continuamente una distancia lo más pequeña posible entre ésta y el material a inspeccionar.

Para proporcionar corriente eléctrica a la bobina de inspección, se necesita un equipo excitador. Este suele ser un oscilador que genera una señal periódica sinusoidal de frecuencia determinada (frecuencia de inspección). El oscilador incluye etapas de amplificación de señal. Una característica básica de este equipo es la estabilidad de la señal emitida a lo largo del tiempo, porque de esa forma se asegura la estabilidad de la frecuencia de las CI sobre el material.

Como lo que se mide en este tipo de ensayos es la variación de impedancia de la bobina (que a su vez será función del tipo de defecto del material a controlar) se necesita un voltímetro, o dispositivo parecido, puesto en paralelo con la bobina para medir dichas variaciones. En la realidad, para facilitar el post- proceso y la presentación de los datos al evaluador el dispositivo de medida es una pantalla de rayos catódicos (osciloscopio).

El procedimiento usado para detectar fluctuaciones en la impedancia de la bobina contenida en las sondas es el Puente de Wheatstone. Está formado por cuatro ramas en cada una de las cuales hay una impedancia. Dicho puente se alimenta por dos extremos no adyacentes y el elemento de medida se coloca el paralelo con los otros dos extremos. En los equipos de CI se sustituye una de las impedancias por la bobina de inspección, con lo cual toda variación en la impedancia de ésta se detecta como un

desequilibrio en el puente.

## **MODOS DE TRABAJO EN CI DIFERENCIAL Y ABSOLUTO**

Existen dos modos de trabajo:

**Modo diferencial:** sirve para la detección de defectos pequeños (poca pérdida de volumen de material; tipo entalla de tubo ASME). Como se ha dicho consiste en sustituir las impedancias de dos de las ramas de un puente de Wheatstone por bobinas de inspección, que se desplazan a lo largo de la superficie a inspeccionar, una a continuación de la otra y separadas por un espacio pequeño y conocido. Si una de las bobinas pasa por encima de un defecto (p.e. falta de material), la impedancia de esa sonda cambiará pero no así la impedancia de la otra bobina que todavía está en una zona sana del material. En ese momento el puente se desequilibra en una cierta cantidad que será proporcional al tamaño del defecto encontrado. Este procedimiento es aplicado en la detección de defectos puntuales o rápidos.

**Modo Absoluto:** sirve para la detección de defectos graduales suaves o variaciones de espesor. Este otro método se aplica en casos en que los defectos más probables son la pérdida de espesor por desgaste. En esos casos una bobina en diferencial no detectaría ya que la diferencia de espesor en los dos puntos sobre los que se encuentran las sondas sería tan pequeña que no se llegaría a desequilibrar el puente. En el modo absoluto, sólo se toma como bobina activa una de las ramas del puente, mientras que otra de las impedancias de sustituye por lo que se llama bobina de absoluto, que se pone en contacto con una pieza idéntica al material a inspeccionar, pero de calidad controlada (una especie de tubo de referencia). De ese modo el puente de Wheatstone se desequilibrará en cuanto la sonda detecte una variación mínima en el material, comparando con el bloque patrón.

Como se puede apreciar, ambos modos pueden ser aplicados con las mismas bobinas. La única diferencia es el modo de conexión de las sondas al puente, que puede ser configurado por medio de los conectores en los equipos.

La representación de las señales de corrientes inducidas en el equipo de adquisición son diferentes, mientras que en modo diferencial aparecen con doble lóbulo, en modo absoluto se representan con un simple lóbulo.

En los ensayos por CI la detección de defectos se realiza por comparación de las señales obtenidas en componentes reales, con las obtenidas en la inspección de tubos de calibración. Estos se fabrican con materiales idénticos a los de los tubos reales y posteriormente se implantan artificialmente (por electro-erosión normalmente) entallas de geometría y posición análoga a los defectos que se espera encontrar. Las características de los tubos de calibración para determinados componentes se especifican en el código ASME (sección V). En él se detalla desde el material a emplear a las entallas a realizar y sus tolerancias dimensionales.

El análisis de los diferentes tipos de señales se hace midiendo dos parámetros representativos: el tamaño de la señal y la inclinación de ésta con respecto a un determinado eje. Ambos parámetros están asociados a dos características

fundamentales de las señales de CI, la amplitud de la señal y la fase de la señal con respecto al eje horizontal. En base a esto y de acuerdo a unos criterios es posible detectar y caracterizar los defectos.

## **8.-EMISION ACÚSTICA**

### **FUNDAMENTO DEL MÉTODO**

El método está basado en el fenómeno de emisión acústica que se produce al producirse ciertas deformaciones plásticas en los metales. En concreto el origen es el movimiento de las dislocaciones que acompaña a una deformación. En algunos casos sus efectos sobre la resistencia estructural pueden ser importantes.

La emisión acústica se puede emplear para obtener información sobre el movimiento de las dislocaciones de los materiales, siendo una herramienta útil en el estudio de la mecánica de fractura y el comportamiento de los materiales. Sin embargo, el método puede dar indicios sobre el fallo inminente de un componente estructural metálico.

En esencia el método consiste en la captación de las emisiones producidas en la microestructura metálica, por medio de sensores adecuados. Dichos sensores son sólo transductores basados en efecto piezoeléctrico, similares a los palpadores de UT pero actuando del modo inverso, esto es captan emisiones acústicas y las transforman en impulsos eléctricos. En la práctica los transductores operan en un rango de frecuencias alrededor de los 200 kHz (fuera del espectro audible, eliminando así ruidos parásitos y del entorno). Un post-procesado de la señal eléctrica puede aportar información sobre los procesos que se están produciendo en la micro-estructura. Así las emisiones acústicas continuas y de baja amplitud se asocian con deformaciones plásticas y los pulsos cortos de alta amplitud se interpretan como procesos de desarrollo y crecimiento de grietas.

### **APLICACIONES**

Se describen dos de las aplicaciones más extendidas de este método:

#### **Mecánica de Fractura**

Por emisión acústica se han realizado estudios de tracción en monocristales, así como investigaciones sobre emisiones durante transformaciones de fases metálicas (las transformaciones martensíticas son una fuente importante de emisiones acústicas).

También se ha estudiado la mecánica de fractura en materiales con grietas, así se ha comprobado que si se somete una pieza con grietas a una deformación plástica, se da una emisión acústica que se inicia en los extremos de la misma y en puntos de concentración de tensiones. Este procedimiento concreto es directamente aplicable en el campo de los ENDs. Relacionados con esto, están los ensayos que permiten relacionar la frecuencia de las emisiones acústicas en las proximidades de una grieta con el crecimiento y evolución en el tiempo de la misma. Así, realizando inspecciones periódicas de indicaciones conocidas se puede predecir el comportamiento y prever posibles fallos catastróficos. Este es un campo en pleno proceso de I+D y en cualquier

caso se puede considerar una técnica de laboratorio, más que una técnica de inspección en servicio.

### **Integridad de Estructuras**

Una característica diferenciadora de este método de END, frente a todos los expuestos antes es que es un ensayo dinámico. Esto es, requiere que los componentes estructurales estén sometidos a una sollicitación lo más aproximada posible a la producida durante la operación. Es pues un método ideal para ser aplicado durante el funcionamiento real, si las condiciones ambientales lo permiten.

Actualmente se emplea el método de emisión acústica en los siguientes campos:

- Vigilancia continua de vasijas en CCNN para detección y localización de grietas.
- Vigilancia de grandes componentes a presión, durante ensayos hidrostáticos.
- Control de agrietamiento de las soldaduras durante procesos de enfriamiento.
- Determinación de agrietamientos por corrosión bajo tensión en estructuras de responsabilidad.

## **9.- PROCEDIMIENTOS**

Los procedimientos de ensayos no destructivos son los documentos que describen, básicamente, “cómo” se tienen que realizar los exámenes no destructivos y “qué” criterios de aceptación son aplicables para la caracterización de los defectos. De modo general, el contenido de los procedimientos se adapta a los requisitos definidos en la sección V del código ASME, en la que se expone la información mínima que debe contener un procedimiento para asegurar su correcta realización. Así mismo, incluirá requisitos acerca de las calibraciones de los equipos en el caso que sea necesario, los criterios de reportabilidad y aceptación de indicaciones y sobre la cualificación del personal encargado de la ejecución de los END.

Si bien para muchos métodos de END, el que los procedimientos se ajusten al código ASME V, permite asegurar no solo su adecuada realización sino también su capacidad para cumplir sus objetivos; sin embargo, para algunos métodos este aspecto no es suficiente, caso de los ultrasonidos y las corrientes inducidas, para los que es necesario realizar un proceso de validación para asegurar la fiabilidad de la técnica utilizada y la capacidad del personal que lleva a cabo el ensayo.

Por esta razón, se incluyó como mandatario en el código ASME Sección XI, la aplicación de los requisitos expuestos en el Apéndice VIII Performance Demonstration Requirements for Ultrasonic Examination systems”.

En España, se ha adoptado una metodología de validación de técnica de Ends alternativa a la del Apéndice VIII, basada en los principios definidos en el documento “European Methodology for Inspection Qualification of Non Destructive Testing”, la cual se encuentra desarrollada en la guía CEX-120 de UNESA

Esta metodología prevé dos tipos de aproximación posible para realizar la validación. Una de ellas se basa en la ‘Demostración Práctica’, similar a la propuesta por el Apéndice VIII, es decir basada en exámenes sobre maquetas del componente con defectos representativos, y la otra, basada en la elaboración de Justificaciones Técnicas” que permiten recoger todas las evidencias existentes sobre el procedimiento de inspección a validar, provenientes tanto de experiencia en centrales como de laboratorios, programas internacionales como el “PISC”, etc., que permitan concluir que el procedimiento en cuestión tiene ya demostrado suficientemente su fiabilidad.

Así mismo, un aspecto muy importante para garantizar la repetibilidad y fiabilidad de los Ends depende de los conocimientos, habilidad y capacitación del personal que realiza los Ends, por ello se requiere que se encuentren certificados de acuerdo a la norma aplicable (ANSI/ASNT CP-189, EN-ISO-9712 y otras). El CSN emitió la Guía de Seguridad, GS 10.10 “Certificación y certificación de personal que realiza ensayos no destructivos”, en la que se recoge los criterios y principios necesarios para este fin.

## **10.- BIBLIOGRAFÍA**

- “Introducción a los métodos de ensayos no destructivos de control de la calidad de los materiales”. Instituto Nacional de Técnica Aeroespaciales “Esteban Terradas”. 3ª Edición. Fco. Ramírez Gómez.
- “Non Destructive Testing Handbook”. Volume 7. Ultrasonic Testing. ASTN Third Edition. Gary L. Workman, Doron Kishori.
- Código ASME Sección V y XI (apéndice VII y VIII).