

INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

DEFINICIÓN Y ALCANCES

Los "Ensayos no Destructivos" (END) son métodos de ensayo que permiten detectar y evaluar discontinuidades, estructuras o propiedades de materiales, componentes o piezas, sin modificar sus condiciones de uso o aptitud de servicio. Estos ensayos están reunidos en una disciplina tecnológica determinada por una metodología de aplicación y condicionada por los factores económicos inherentes a la actividad productiva.

Como disciplina tecnológica los END tienen por objetivo:

- asegurar calidad y confiabilidad
- prevenir accidentes
- producir beneficios económicos
- contribuir al desarrollo de la ciencia de los materiales

Los END son ampliamente usados en la industria. En los procesos primarios de producción se los aplica para asegurar que los productos se mantienen dentro de los patrones de calidad. La posibilidad de realimentar la información obtenida con los END en el sistema productivo para efectuar las correcciones requeridas, da idea de la orientación posible de los desarrollos futuros en este terreno. En la fabricación de componentes, son esenciales para asegurar que todas las variables que influyen el comportamiento de los materiales se mantienen dentro de las especificaciones del diseño y para asegurar calidad uniforme. En la instalación de plantas y complejos industriales, así como en obras civiles de infraestructura, son requeridos para controlar la ejecución de procesos que se deben realizar "in situ".

Durante el servicio y operación de equipos y plantas industriales se aplican para verificar el estado de mantenimiento y detectar la aparición de defectos estructurales en los materiales. En este terreno existe un marcado interés por la extensión de sus aplicaciones y por el desarrollo de nuevos métodos de END, pues la detección prematura de una falla puede evitar un accidente en servicio que aparte de provocar daños económicos puede poner en peligro vidas humanas.

En el terreno científico los END se han convertido en un poderoso auxiliar de las investigaciones sobre los materiales, sus propiedades y su comportamiento, ya que permiten diseñar experiencias en las cuales la evaluación del estado y propiedades de la muestra puede ser realizada a lo largo del proceso de investigación, sin introducir modificaciones ajenas a los parámetros de estudio. Por ejemplo, mediante la aplicación del ensayo ultrasónico se puede estudiar el progreso de una fisura durante un ensayo de fatiga, sin interrumpir la experiencia.

CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS

Aparte de la involucrada en su definición, los END tienen características distintas que condicionan su aplicación.

En primer lugar se debe tener en cuenta que los métodos de END no son de aplicación general, sino de aplicación específica según el tipo de información que se desea obtener, y en ciertos casos del tipo y estado del material en ensayo.

No hay ningún método en particular que pueda cubrir los objetivos de la aplicación de los END en carácter general para todas las situaciones o casos. En efecto cada método tiene un campo específico que está limitado por el tipo de información requerida, el diseño del componente, los

factores económicos, o también por la combinación de todos o algunos de dichos factores. Por lo tanto, resulta fundamental tener en cuenta que cada método tiene sus alcances y limitaciones.

Otra característica distintiva de los END reside en el hecho de que la información es obtenida de propiedades del material que pueden no estar relacionadas con las estructuras y/o propiedades que se desean detectar y evaluar. Así por ejemplo las propiedades magnéticas son de interés en el cálculo de sección resistente que debe darse a un acero en una estructura, pero mediante sus propiedades magnéticas, un método de ensayo no destructivo permite detectar la presencia de discontinuidades superficiales o subsuperficiales que sí afectan la resistencia del material.

En otros casos, en cambio se utilizan propiedades directamente relacionadas como por ejemplo la variación de velocidad de propagación del sonido en el material como un medio para determinar su resistencia mecánica. No obstante, muchas de las propiedades primarias responsables o que influyen el comportamiento en servicio de un material y determinan la posibilidad de fallas, no pueden ser verificadas directamente por los END. Mucho de la verdadera experiencia y conocimiento científico de esta disciplina reside, en realidad, en la determinación de las relaciones entre estas propiedades primarias (por ejemplo resistencia mecánica) y las variables estructurales que pueden ser verificadas y monitoreadas. Este conocimiento de las relaciones entre las propiedades físicas y mecánicas permite plantear y desarrollar los métodos y técnicas que constituyen el arsenal de los END.

INSPECCIÓN VISUAL

El método más antiguo y común de ensayo no destructivo es la inspección visual, pero también es el menos entendido y adecuadamente utilizado de todos los métodos. Existe una diferencia enorme entre solo mirar un objeto y realmente observarlo con ojos entrenados. La inspección visual puede ser definida como: la examinación de un objeto utilizando solamente la vista o en conjunto con diferentes instrumentos de amplificación, grabación, registro, etc., sin cambiar, alterar o destruir el objeto sometido a prueba. En inspección visual, la más importante de las herramientas es la vista, la exactitud visual es el punto más importante de una persona que realiza inspecciones visuales.

Debido a que en muchas ocasiones por la propia geometría de los componentes a inspeccionar es un tanto difícil aplicar la “inspección visual directa”, sobre todo cuando se trata de verificar el interior de equipos industriales, se recurre a la “inspección visual indirecta”, en la cual se emplean elementos auxiliares tales como espejos y otros accesorios, los cuales facilitan la inspección. En muchos casos, aún con estas herramientas es muy complicado realizar la inspección, ya sea por la misma geometría o por la profundidad a la que se requiere inspeccionar. Es aquí en donde se aplica la “inspección visual remota”, en la que se utilizan ciertos equipos como el endoscopio y otros equipos de inspección visual remota.

INSPECCIÓN VISUAL REMOTA

El equipo más empleado en inspección visual remota es el “endoscopio”, también llamado boroscopio. Los endoscopios son comúnmente utilizados en ambientes donde es necesario inspeccionar áreas o equipos a los cuales no se tiene acceso o se requiere desensamblar las partes. También es utilizado en áreas donde se corre algún peligro por parte del personal técnico. Los endoscopios son frecuentemente utilizados para inspeccionar turbinas de gas, estructuras de aviones, reactores nucleares, líneas de tuberías y partes internas de máquinas automotrices. También algunos, con características especiales, son utilizados en ambientes corrosivos o explosivos. Los boroscopios pueden ser divididos en:

- **Endoscopios Rígidos:** utilizan un sistema clásico de lentes o bien los más modernos pueden utilizar una unidad de fibra óptica sólida para transmitir la imagen a través de la longitud del tubo completo. El diseño de un endoscopio rígido es similar al de un telescopio, es decir, una serie de lentes convergentes que están encapsulados en un tubo. La imagen, de esta manera, se forma en el centro del endoscopio mediante el uso de lentes, espejos o prismas. La imagen es refractada de un lente a otro hasta que sea focalizada en una imagen plana para ser vista por el ojo humano o una cámara. Los endoscopios rígidos son razonablemente económicos y dependen de una gran variedad de diámetros y dimensiones. Porque son rígidos y frágiles no pueden utilizarse para girar en las esquinas. En caso de ser doblados la funcionalidad del instrumento será destruida.



- **Endoscopios de fibra óptica flexible o Fibroscopios:** constan de miles de pequeños cristales o fibras de cuarzo que son ensamblados en grupos. Las fibras son recubiertas para crear una gran diferencia en los índices refractivos entre la fibra y la superficie, produciendo una reflexión interna total. La señal es continuamente reflejada desde la superficie interna de la fibra a todo lo largo sin pérdida de brillantez. Para transmitir apropiadamente la imagen, el grupo de fibras debe ser coherente. Cada fibra debe estar en la misma localización con respecto de todas las otras fibras al final de cada grupo.



El endoscopio industrial de fibra óptica es flexible y utiliza dos grupos de fibras ópticas, las cuales están protegidas del exterior, cada uno de esos grupos conjunta miles de fibras individuales. Uno sirve de guía o medio transportador de la imagen y el otro ayuda a iluminar el objeto bajo prueba.



Guías portadoras de imagen: el grupo de fibras utilizado como portador de imagen, transporta la imagen formada por los lentes a través de toda la longitud del endoscopio y hasta la posición para ser observada por el ojo (eye piece). La guía portadora de imágenes debe estar formada por un grupo de fibras coherentes: las fibras individuales deberán estar alineadas con gran precisión y guardarán una posición relativa idéntica. Las fibras portadoras de imagen tienen un diámetro de 9 a 17 micrómetros, su tamaño es uno de los factores que afectan la resolución, sin embargo la precisión en la alineación de ellas es más importante.

- **Guías portadoras de iluminación:** este grupo de fibras transporta la iluminación desde la fuente externa de alta intensidad hasta la superficie del objeto sometido a prueba. Este grupo es llamado guías portadoras de iluminación y normalmente son no coherentes. Estas fibras tienen un diámetro de 30 micrómetros y el tamaño del grupo es determinado por el espacio físico y los requerimientos de iluminación. Los endoscopios de fibra óptica generalmente tienen una sección flexible y controlable en uno de los extremos para que el inspector pueda manipular el endoscopio durante la prueba y pueda rastrear el área dentro del objeto de prueba.

EJEMPLO DE INSPECCIÓN VISUAL REMOTA

Desarrollo: Se dio paso a inspeccionar un segmento de una tubería para lo cual se contó con:

- Equipo de inspección visual remota
- Pieza a inspeccionar

Solución: A continuación, se muestran los componentes que se ocuparán para realizar la inspección:





En la siguiente imagen se observa el tubo al cual se le realizará la inspección en el interior, del lado derecho vemos el equipo de inspección visual remota y la sonda que se introducirá al tubo. Es importante mencionar que la sonda con la que cuenta este equipo tiene la ventaja de moverse en todas direcciones. En la parte frontal tiene la cámara y cuenta con un led de iluminación.

Luego se lleva a cabo la inspección. Se procede a encender el equipo y a introducir la sonda en el

interior del tubo. En esta imagen se puede ver que el tubo presenta gran cantidad de sarro acumulado.

Se inspeccionará toda la pared del tubo desplazando la sonda hacia adentro y hacia fuera del componente, y moviendo la sonda con el controlador hacia arriba y hacia abajo.

En la pantalla se observa la imagen del interior del tubo.

Esta es la imagen que se obtiene del interior del tubo.



CONCLUSIÓN

Para obtener los resultados apropiados de una inspección visual remota, por medio de endoscopios, se requiere una apropiada selección del instrumento, disciplina, procedimientos de rastreo documentados y un personal debidamente entrenado y capacitado. Un método de inspección incorrecto seguramente provocará que algunas condiciones rechazables no sean interpretadas adecuadamente y por tanto incrementará los riesgos de operación de la pieza sometida a prueba.

LÍQUIDOS PENETRANTES

INTRODUCCIÓN

El método de ensayo no destructivo por líquidos penetrantes está basado en el principio de capilaridad de los líquidos, que permite su penetración y retención en aberturas estrechas. Tienen un amplio campo de aplicación en la detección de defectos abiertos a la superficie (grietas, fisuras y poros) en metales (ferrosos y no ferrosos), materiales cerámicos, plásticos y vidrios que no sean porosos, ni presenten rugosidad excesiva o escamado.

Este método se distingue porque es prácticamente independiente de la forma o geometría de la pieza a examinar, requiere un equipamiento mínimo y permite obtener una gran sensibilidad en la detección de fisuras (superior a la que se puede lograr con radiografía o ultrasonido).

El método de ensayo no destructivo por líquidos penetrantes tiene sus antecedentes en la antigua técnica de “aceite y blanqueo”, aplicado desde fines del siglo XIX en los talleres ferroviarios para detectar fisuras de fatiga en componentes de locomotoras y vagones.

La técnica de “aceite y blanqueo” consistía en la realización de las siguientes operaciones: limpiar adecuadamente la pieza, sumergirla durante varias horas en una mezcla de aceite (25%) y kerosene (75%) en caliente (a fin de lograr la penetración de la mezcla en las posibles fisuras o poros), quitar la pieza del baño, escurrirla y remover la mezcla de la superficie mediante un trapo o papeles, blanquear la pieza con cal o tiza suspendida en alcohol. Finalmente, observar detenidamente la pieza, a fin de detectar las zonas en que las manchas de aceite en la cal revelan la presencia de los defectos, en los cuales había sido retenida la mezcla de aceite y kerosene.

Este ensayo tenía serias limitaciones en cuanto a su sensibilidad, debido principalmente a las características del líquido usado y a la falta de contraste de las indicaciones.

La necesidad de mejorar y acelerar los métodos de control de calidad en la producción masiva de equipos y armamentos durante la segunda guerra mundial, especialmente para materiales no ferrosos, impulsaron el mejoramiento de esta antigua técnica. Así, en 1941 Roberto y José Switzer patentaron un método muy mejorado.

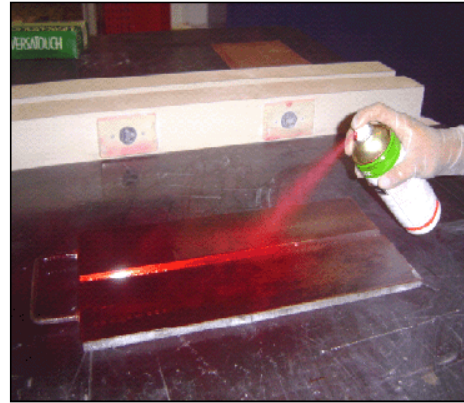
El desarrollo y perfeccionamiento del método se extendió a todas las etapas del proceso, sobre la base de la aplicación de conocimientos científicos y técnicos. Habiéndose logrado en la actualidad, procesos de gran sensibilidad, capaces de detectar, en condiciones especiales, fisuras cuyo espesor es del orden de tan solo décimos de micrones, sin recurrir a elementos auxiliares de la visión.

FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

El fundamento del método reside en la capacidad de ciertos líquidos para penetrar y ser retenidos en fisuras, grietas y poros abiertos a la superficie de un material, cuando son aplicados sobre la misma.

Esta capacidad depende principalmente de tres propiedades: mojabilidad o ángulo de contacto entre líquido y sólido, tensión superficial y viscosidad. La relación entre éstas, puede ser establecida mediante la observación del fenómeno de “capilaridad”.

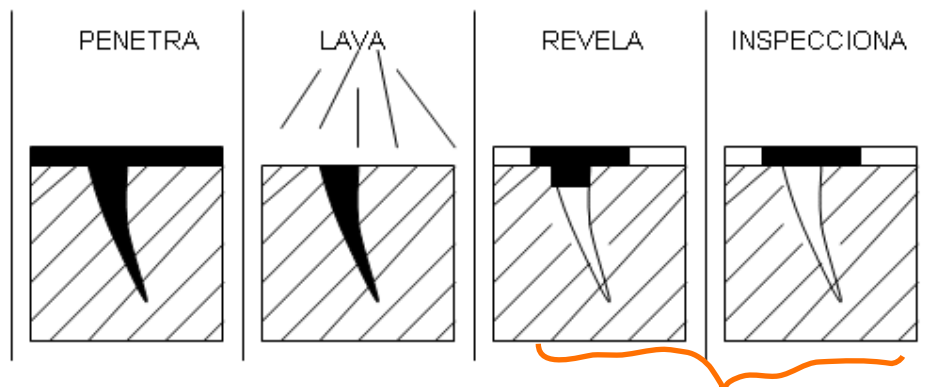
El líquido debe tener buenas propiedades penetrantes, pero también debe ser removido fácilmente de la superficie en que se ha aplicado y quedar al mismo tiempo retenido firmemente en los defectos. Esta condición puede ser obtenida mediante apropiadas mezclas de líquidos orgánicos.



En su estado actual el método de ensayo con líquidos penetrantes comprende las siguientes operaciones:

1. **Limpieza efectiva de la parte a examinar**, incluyendo un buen secado.
2. **Aplicación del líquido penetrante de manera que cubra toda la superficie.**
3. **Dejar transcurrir el tiempo necesario para la penetración del líquido.** Este tiempo puede variar entre algunos minutos y una hora aproximadamente.
4. **Remover el líquido penetrante de la superficie**, evitando que sea extraído el que ha penetrado en las fallas. Esta remoción puede hacerse mediante pulverización con agua, por arrastre con trapos humedecidos en solvente, o bien por pulverización con agua previa aplicación de un agente emulsificador, según sea el tipo de líquido penetrante usado.
5. **Dejar secar la superficie y aplicar el revelador**, que puede ser talco o alguna otra sustancia mineral finamente pulverizada, en forma de polvo seco o en suspensión alcohólica, que una vez evaporada deja una fina capa de polvo.

El revelador tiene por función extraer el líquido penetrante retenido en las fallas, que al difundirse en la superficie ofrece indicaciones visibles de la presencia de las mismas. Si el líquido penetrante es coloreado se tendrá un buen contraste con respecto al fondo blanco del revelador. Si es fluorescente deberá ser observado con luz ultravioleta.



CLASIFICACIÓN DE LOS LÍQUIDOS PENETRANTES

El tipo de líquido penetrante usado determina variantes en la aplicación del método. Los diferentes tipos de penetrantes han sido motivo de normas que los definen y clasifican, por ejemplo la ASTM E-175. Básicamente se pueden clasificar de la siguiente manera:

PIGMENTO

CARACTERIZACIÓN

Fluorescente	{	Lavables con agua
		Post-emulsificables*
		Removibles con solvente
Coloreados	{	Lavables con agua
		Post-emulsificables*
		Removibles con solvente

*Post-emulsificables: El lavado de este tipo de penetrantes, sean o no fluorescentes, debe ser precedido por una operación previa de emulsificación dado que estos líquidos no son lavables con agua. Esto complica la realización del ensayo, pero mejora sustancialmente la sensibilidad del método especialmente para la detección de defectos poco profundos y abiertos.

CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES PARA EL EXAMEN CON LÍQUIDOS PENETRANTES

El éxito y la confiabilidad de un examen realizado con líquidos penetrantes dependen del cuidado y exactitud con que el operador ejecuta las diferentes etapas, desde la limpieza de las partes hasta completar todas las operaciones que permiten la observación y evaluación final de las indicaciones.

Los principios básicos para el examen con líquidos penetrantes son:

1. El penetrante debe penetrar en el defecto a fin de poder dar forma a una indicación. Es esencial que el defecto esté limpio y libre de materias contaminantes a fin de que el penetrante pueda entrar libremente. Es además importante dejar el tiempo apropiado de penetración para asegurarse de que el penetrante haya llenado el defecto.
2. Durante la remoción del penetrante de la superficie es posible que el penetrante pueda ser extraído, tanto de la superficie como del interior del defecto. Si esto ocurre, no se formarán indicaciones. Cuando se usa un líquido lavable con agua, la misma no lavará al penetrante de las fisuras y grietas finas, ya que el agua no tiene las propiedades de penetración del líquido. En el caso de líquidos post-emulsificables, la posibilidad de remover el penetrante de los defectos es mucho menor debido a que estos penetrantes no son lavables con agua. En las piezas que hayan sido procesadas con líquidos coloreados es posible remover el exceso de penetrante usando trapos o papeles humedecidos con solvente limpiador.
3. Grietas y fisuras limpias son usualmente fáciles de detectar. Aberturas superficiales que no estén contaminadas pueden a veces ser difíciles de detectar, debido a lo fino de la abertura que presentan. La presencia de contaminantes en los defectos reduce la sensibilidad de detección en una o varias formas:
 - a. el contaminante puede llenar completamente el defecto e impedir la entrada de penetrante.
 - b. el contaminante puede reaccionar con el penetrante y reducir su coloración o su fluorescencia.
 - c. el contaminante puede ser de tal naturaleza que reduzca o anule la actividad capilar del penetrante.
4. Cuanto menor sea la abertura del defecto, mayor debe ser el tiempo requerido para la penetración. Fisuras muy finas requerirán mucho más tiempo para la penetración que poros o huecos abiertos.
5. Defectos que presentan aberturas anchas requieren técnicas especiales. Si la discontinuidad superficial es más ancha que profunda el lavado o enjuague puede remover el penetrante. En estos casos se usarán líquidos post-emulsificables.

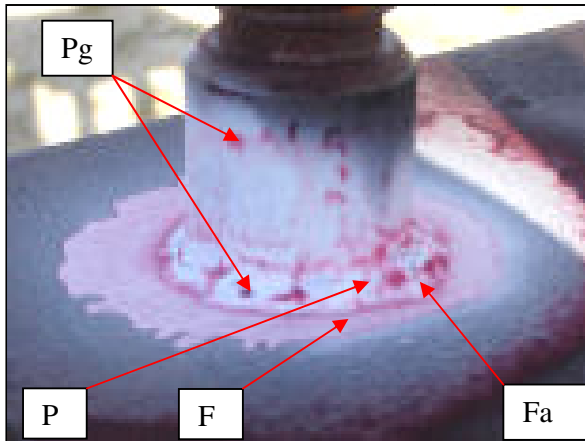
6. En todo proceso de examen con líquidos penetrantes debe existir una perfecta compatibilidad entre el método de lavado, líquido penetrante, líquido removedor, emulsificador y medio revelador. No deben mezclarse productos que correspondan a distintos procesos o distintos fabricantes salvo que se puedan demostrar sus perfectas compatibilidades.

OBSERVACIÓN Y EVALUACIÓN DE LAS INDICACIONES

La observación de las indicaciones debe iniciarse inmediatamente después de secado el revelador y debe repetirse por lo menos una vez después de transcurridos 15 a 20 minutos o al cabo de un tiempo no menor al requerido para la penetración. En el caso de indicaciones débiles o dudosas, el tiempo de observación puede extenderse aún más.

Para el caso de líquidos penetrantes coloreados, la observación debe hacerse con luz natural o luz artificial asegurándose, en ambos casos que la iluminación no sea inferior a 500 lux en la superficie bajo examen. Deben evitarse resplandores o reflejos, ya que afectan la sensibilidad visual.

Con penetrantes coloreados las indicaciones se verán de color rojo intenso, que contrasta con el fondo blanco producido por la capa de revelador. La profundidad del color y la velocidad con que se extiende puede relacionarse con la profundidad del defecto.



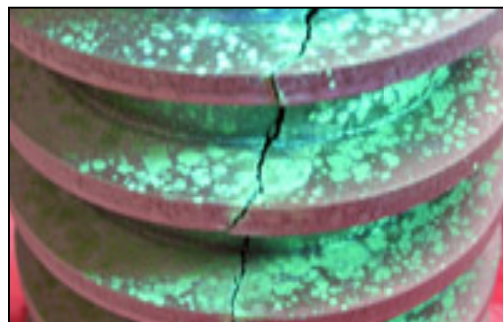
En la figura se observa una pieza soldada a una base, examinada con líquido penetrante rojo.

En la pieza se distinguen principalmente poros gruesos (Pg). Mientras que en la unión soldada se destacan fisuras anchas conectadas con cavidades (FaC), poros gruesos (Pg) y fisuras finas (Ff).

La observación de líquidos penetrantes fluorescentes debe hacerse en un cuarto oscuro. La iluminación debe hacerse con lámparas de luz negra de alta intensidad (de 900 a 1000 lux para gran sensibilidad o de 200 a 250 para trabajos menos exigentes).

En la observación de penetrantes fluorescentes, las indicaciones al ser iluminadas con luz negra, se ven por su brillante fluorescencia de color amarillo verdoso y el mayor contraste se obtendrá cuanto mayor sea el oscurecimiento logrado en la superficie a examinar.

Para la interpretación de los resultados debe tenerse en cuenta que, en discontinuidades grandes, que han retenido mucho penetrante, las indicaciones se van a extender en la superficie



Generalmente una fisura o discontinuidad similar, mostrará una línea (roja o fluorescente), fisuras muy estrechas o parcialmente cerradas (pliegues) mostrarán una línea de trazos. Poros gruesos pueden producir una indicación grande que cubra toda un área. Los poros muy finos serán indicados por puntos distribuidos al azar o agrupados en áreas localizadas.

Materiales cerámicos vitrificados retendrán muy poco penetrante después de la aplicación y cualquier fisura, agujero o escamas adheridas serán fácilmente discernibles como indicaciones fluorescentes o rojas, según el método, en forma de líneas o puntos. Escamas o astillas adheridas, usualmente aparecen como indicaciones difusas que observadas con aumento mostrarán que el color proviene del colorante o pigmento atrapado debajo de las mismas.

Cuando un agujero es muy grande y playo de manera que el penetrante es removido parcialmente durante el lavado, la sensibilidad de detección disminuye

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ENSAYO DE LÍQUIDOS PENETRANTES

Ventajas:

- El método tiene alta sensibilidad a la detección de pequeños defectos superficiales
- El método tiene pocas limitaciones respecto al material, es decir, metálicos y no metálicos, magnéticos y no magnéticos, conductores y no conductores, etc.
- Grandes áreas de partes o materiales de gran volumen pueden ser inspeccionadas rápidamente y a bajo costo.
- Las indicaciones son producidas directamente sobre la superficie de la parte y constituyen una representación visual de la discontinuidad.
- Los vaporizadores en aerosol pueden hacer a los materiales penetrantes muy portátiles.
- Los materiales penetrantes y los equipos asociados son relativamente baratos.

Desventajas:

- Solamente pueden ser detectadas discontinuidades superficiales.
- Sólo materiales con superficies no porosas pueden ser inspeccionados.
- La limpieza inicial es crítica, dado que los contaminantes pueden enmascarar las discontinuidades.
- El inspector debe tener acceso directo a la superficie inspeccionada.
- La terminación y rugosidad superficial afecta la sensibilidad de la inspección.
- Se requiere una limpieza final de las partes o materiales aceptable.
- Se requiere una adecuada manipulación química y disposición de los penetrantes.

PARTÍCULAS MAGNETIZABLES

INTRODUCCIÓN

Este método fue concebido por W.E.Hoke del Bureau of Standards en 1920, e introducido a una aplicación industrial por A.V.de Forest en 1928, quien juntamente con F.B.Doane formó en 1954 Magnaflux Corporation.

Fundamentos Teóricos

Se denomina imán a todo aquel cuerpo que tenga la propiedad de atraer otras sustancias llamadas “ferromagnéticas”. Esa característica de atracción se llama “magnetismo”, y se debe a un efecto de “inducción magnética” ejercido por el imán sobre el otro cuerpo, al que transforma momentáneamente en un imán.

A toda sustancia que acuse los efectos de la proximidad de un imán, la denominamos “cuerpo magnético”. Éstos se divide en:

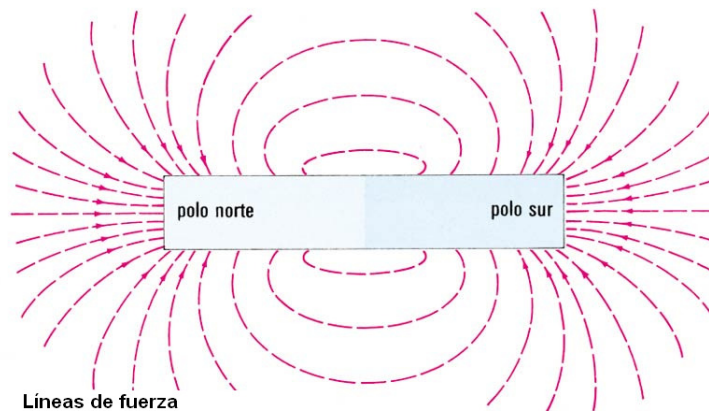
Ferromagnéticos: son fuertemente atraídos por un imán (hierro, níquel, cobalto, casi todos los aceros, etc.).

Paramagnéticos: son levemente atraídos por un imán (platino, aluminio, cromo, potasio, estaño, etc.).

Diamagnéticos: son levemente repelidos por un imán (plata, plomo, cobre, mercurio, etc.).

Se llama “campo magnético” al espacio exterior al imán dentro del cual se ejerce el efecto de inducción. O sea, el campo magnético está conformado por el conjunto de todas las líneas de fuerza cuyo número y forma dependen del foco magnético o fuente que generó el campo.

Entendiendo por “línea de fuerza” a una curva tal que en cada uno de sus puntos es tangente a la dirección que tomaría una aguja imantada (o sea, la dirección del campo). Las líneas de fuerza son lazos cerrados que no se cruzan, buscan el camino de menor resistencia, tienen un sentido definido (dentro del imán van de sur a norte, y fuera de él de norte a sur) y se encuentran con mayor densidad en los polos del imán.



Se define intensidad de campo magnético “H” o fuerza magnetizante, a la fuerza que actúa sobre un polo norte magnético unitario, colocado dentro de un campo magnético. O sea, es la fuerza que tiende a establecer un flujo magnético en un circuito magnético. Se mide en “oersted”.

Siendo la inducción o densidad de flujo “B” el número de líneas de fuerza por unidad de área, tomada en ángulo recto a la dirección del flujo. Se mide en “gauss”. Tenemos que:

$$B \propto H$$

El factor de proporcionalidad es la permeabilidad “ μ ” que representa la facilidad con que un material puede ser magnetizado:

$$B = \mu \times H$$

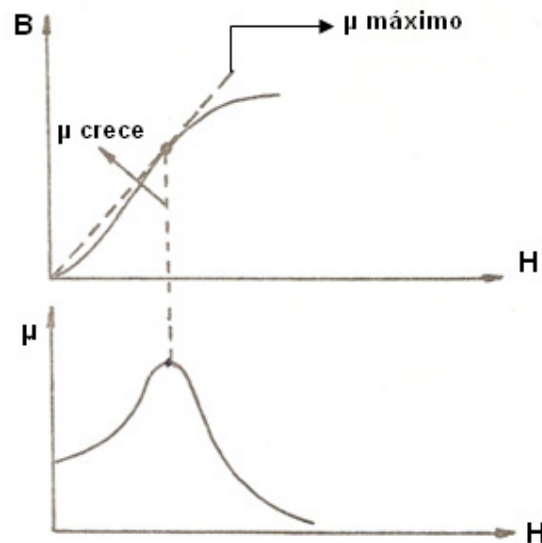
En donde H se refiere a la fuerza que tiende a magnetizar un cuerpo, y B al campo introducido en dicho cuerpo. Tenemos que “oersteds” y “gauss” son numéricamente iguales en aire o vacío, de donde se desprende que para el aire:

$$\mu = 1$$

Podemos clasificar nuevamente a los cuerpos magnéticos en función de su permeabilidad:

- Ferromagnéticos $\mu \gg 1$
- Paramagnéticos $\mu > 1$
- Diamagnéticos $\mu < 1$

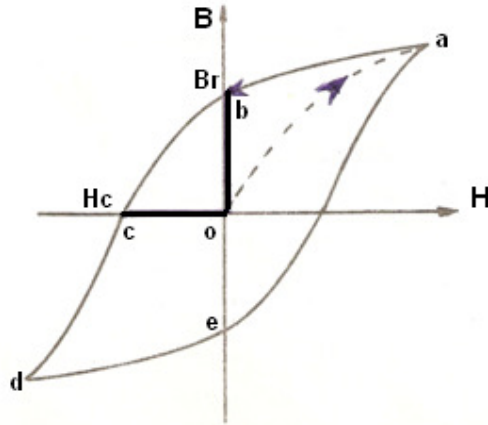
A continuación se muestran las curvas B – H y μ – H:



La permeabilidad “ μ ” crece con el valor de H, hasta un cierto límite para luego decrecer. Vemos que $\mu \neq \text{cte.}$ y depende de:

- a. del valor de H o de B
- b. de la composición química del material
- c. de la temperatura
- d. del tratamiento térmico anterior
- e. del procesamiento mecánico anterior

Por lo tanto B no es linealmente proporcional a H, dando lugar a las denominadas “curvas de histéresis” de los materiales.



Con intensidad de campo nula no hay magnetización (punto o). La sección o - a o “curva virgen” se logra cuando el material no ha sido sometido a la acción de un campo magnético, y culmina en el punto “ a ”, pues se entra en la zona de saturación, en la cual a pesar de incrementar H no se notan incrementos apreciables de B .

A partir de este punto si reducimos H , vemos que los valores de inducción no corresponden a la curva o - a , sino a la a - b . Si llegamos a anular el valor de H , observamos que hay un valor de inducción Br denominado “magnetismo remanente” que caracteriza la “retentividad” del material. O sea, la habilidad del material de retener una porción del campo magnético luego de interrumpida la corriente magnetizante.

Disminuyendo H , llegamos al punto “ c ” denominado “fuerza correctiva” o H_c , que es la magnetización inversa que debemos aplicar al material para anular su magnetismo remanente o residual.

Si seguimos disminuyendo H llegamos al punto “ d ” en donde el material se encuentra nuevamente “saturado”.

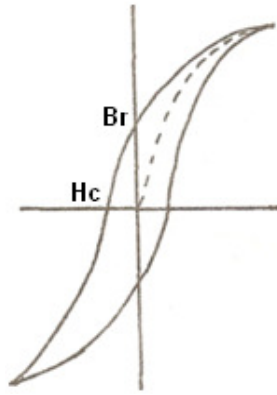
Aumentando ahora el valor de H llegamos hasta el punto “ e ” donde existirá un nuevo magnetismo remanente de polaridad inversa al anterior.

Incrementando nuevamente el valor de H se obtiene el punto “ a ” donde se cierra el ciclo de histéresis.

El ciclo de histéresis es propio de cada material, y su área nos da las características magnéticas del mismo.

Si la curva es delgada el material tiene:

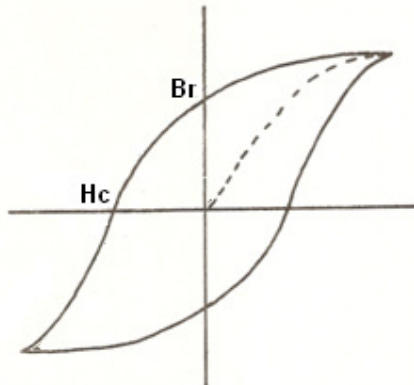
- baja retentividad (pequeño Br)
- alta permeabilidad
- baja reluctancia



Estas características corresponden a un material fácil de magnetizar y de desmagnetizar, con un bajo contenido de carbono, por ejemplo: hierro.

Si la curva es ancha el material tiene:

- alta retentividad (B_r grande)
- baja permeabilidad
- alta reluctancia



Estas características corresponden a un material duro de magnetizar, con un alto contenido de carbono, por ejemplo: acero.

Por su elevada retentividad sería un buen imán.

Es importante aclarar que “reluctancia magnética” es la resistencia que presenta el material a ser magnetizado.

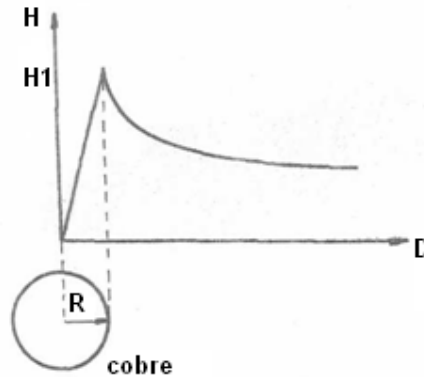
CAMPOS MAGNÉTICOS INDUCIDOS ELÉCTRICAMENTE

Cuando una corriente eléctrica circula a través de un conductor crea un campo magnético alrededor del conductor, concéntrico con el mismo. Siendo la intensidad del campo "H", directamente proporcional a la intensidad de corriente que circula; y la densidad de líneas de flujo será tanto mayor cuanto mas cerca nos encontremos de la superficie del conductor.

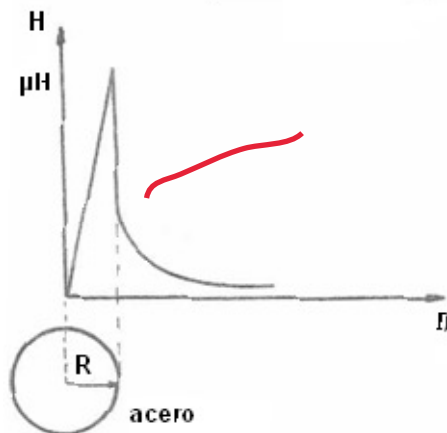
Recordando que la corriente circula de positivo a negativo y aplicando la regla del tirabuzón, podemos conocer el sentido de las líneas de fuerza.



Si el conductor es de cobre, este campo es exterior e interior.

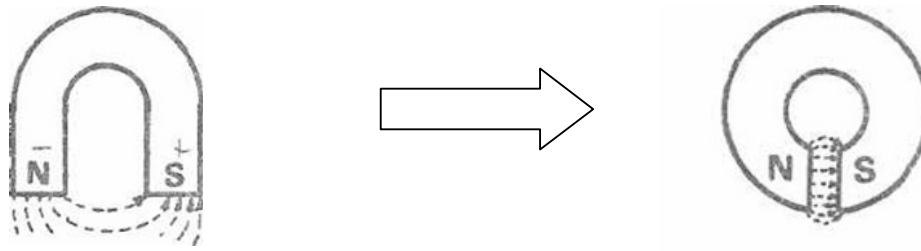


Si el conductor es de un material ferromagnético, el campo queda delimitado en su interior, siendo máximo en su superficie.



FUNDAMENTOS DEL METODO DE PARTICULAS MAGNETIZABLES

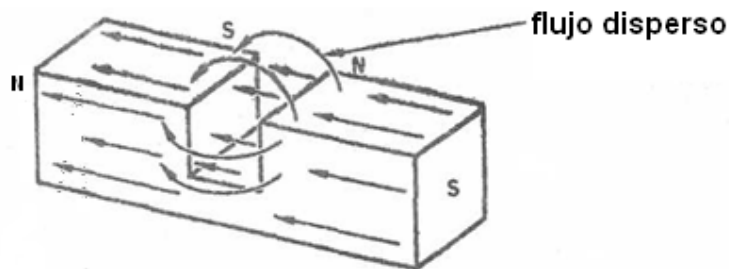
Si tenemos un imán herradura y lo cerramos del todo hasta aproximar sus extremos, nos queda:



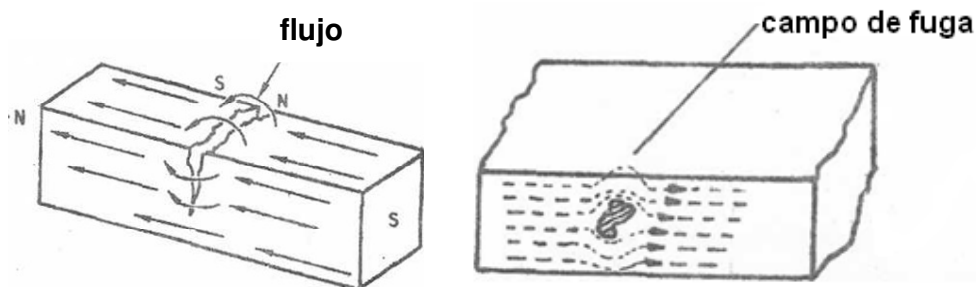
Si lo cerramos del todo, vemos que prácticamente desaparecen los polos, pero existe una pequeña cantidad de líneas de fuerza que se cierran a través del aire, a las que denominaremos FLUJO DISPERSO, el cual nos determina el **CAMPO DE FUGA**.



Análogamente, si en un imán se efectúa un corte parcial, se forman dos polos opuestos y aparecerá en esa zona un campo de fuga, formado, por las líneas de fuerza que salen de la barra y pasan a través del aire de un polo al otro.



Como la interrupción del camino de las líneas de fuerza dentro del imán crea dos nuevos polos, deducimos que una discontinuidad (fisura, inclusión, variación de los parámetros magnéticos del material, etc.) dará lugar a la formación de dos nuevos polos, y por ende de un campo de fuga.

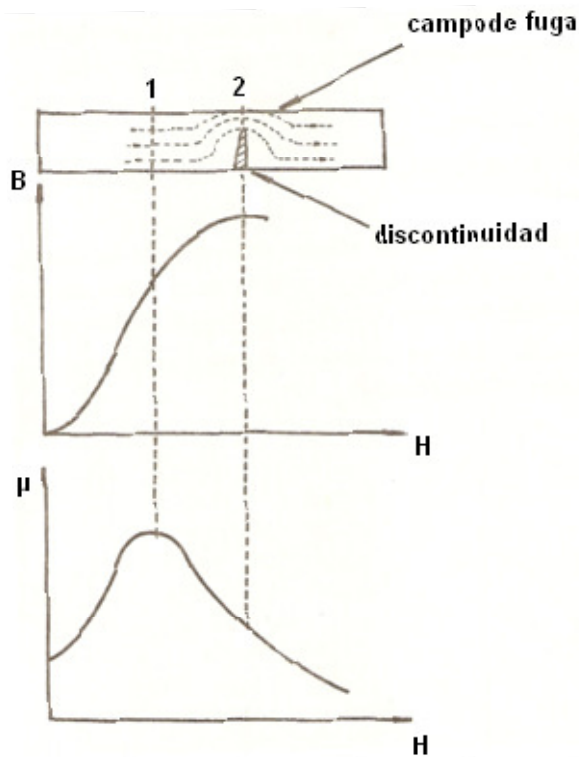


El método de partículas magnéticas consiste en la detección de campos de fuga, o sea flujos dispersos provocados por la formación de polos magnéticos a ambos lados de aquellas discontinuidades que interrumpen el camino de las líneas de fuerza.

Por lo tanto, éste método puede detectar discontinuidades en materiales que puedan ser fuertemente magnetizados o ferromagnéticos.

En consecuencia, en la sección que corresponde a la discontinuidad, hay una gran densidad de flujo que deberá pasar por una sección reducida. Por lo tanto, la permeabilidad será menor que en el resto

de la pieza, forzando a que parte del flujo escape fuera de la misma, dando lugar a un campo de fuga.



Dicho campo de fuga nos permite detectar la discontinuidad, mediante un detector o medio magnético. O sean las partículas magnéticas, que son atraídas por los campos de fuga, dando lugar a la indicación de la discontinuidad.

La condición óptima de trabajo es aquella que: en el momento de la detección, la intensidad de campo "H" sea tal que en la pieza se obtenga máxima permeabilidad sobre la curva virgen.

CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ENSAYO

a) Técnica del campo residual o remanente

Se utiliza el campo magnético que retiene el material luego que se interrumpe la fuerza magnetizante. Este magnetismo residual o remanente es siempre menor que el que existe cuando la corriente está fluyendo.

b) Técnica del campo continuo

Consiste en efectuar la aplicación de las partículas magnéticas mientras se mantiene la fuerza magnetizante.

Por lo tanto un campo continuo es una técnica de ensayo más sensible que la del campo residual, o sea provee una mejor indicación, por ser mayor el flujo disperso y por ende la atracción sobre las partículas magnéticas.

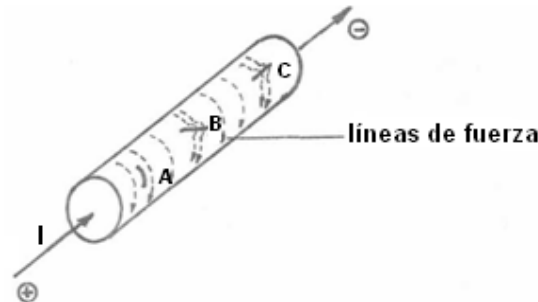
MODOS DE MAGNETIZACION

a) Magnetización Circular



Recordando que la circulación de corriente a través de un material ferromagnético produce un campo magnético confinado en su interior, y máximo en su superficie. Podemos aplicar este efecto en la detección de discontinuidades.

Si tomamos una barra con discontinuidades orientadas en distintos sentidos, y hacemos circular corriente a través de ella.



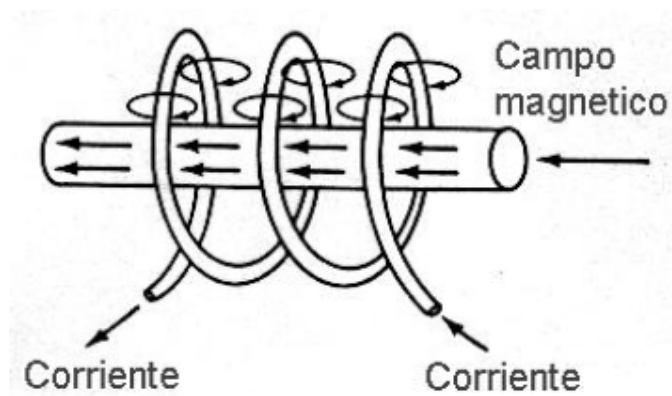
Vemos que la discontinuidad "A" es paralela a las líneas de fuerza, o sea que no produce polos magnéticos, por lo tanto no provoca campos de fuga y no se detecta. Las discontinuidades, "B" y "C" sí se detectan.

Por lo tanto, debemos tener una idea de la orientación posible de los defectos en la pieza a ensayar (basándonos en su proceso de fabricación, tratamiento térmico, esfuerzos mecánicos a que fue sometida, etc.) para fijar la dirección de circulación de corriente que nos permita detectar dichas discontinuidades.

El campo se incrementa desde cero en el centro de la barra hasta alcanzar su valor máximo sobre la superficie, esto nos indica que el flujo disperso será mayor si la discontinuidad es superficial.

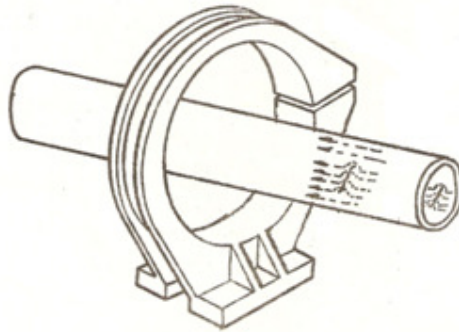
b) **Magnetización Longitudinal**

Bobinas con uno o múltiples arrollamientos del conductor se utilizan para inspeccionar piezas longitudinalmente. El campo dentro de la bobina tiene una dirección definida, que corresponde a las direcciones de las líneas de fuerza producidas por cada porción del conductor.



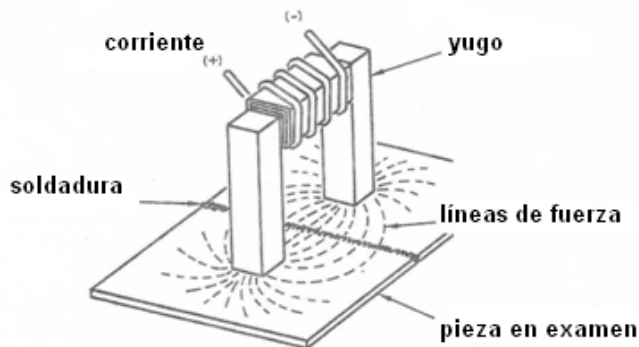
La máxima intensidad de campo está sobre la superficie interior de la bobina, pues es donde hay mayor densidad de flujo.

Este modo de magnetización, permite detectar fisuras o discontinuidades, tanto interiores como exteriores. Pues las líneas de fuerza en magnetización longitudinal, se presentan en toda la sección de la pieza.



Otra forma de magnetización longitudinal es mediante la utilización del YUGO, que consiste en una bobina de alambre de cobre arrollada sobre un núcleo de chapas de hierro-silicio en forma de "U".

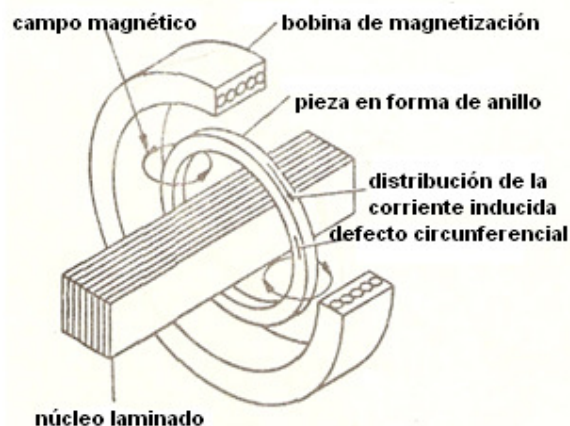
También podemos obtener magnetización longitudinal utilizando un IMÁN PERMANENTE.



c) **Magnetización por Corrientes Inducidas**

Se aplica este modo de magnetización cuando se desean detectar defectos en dirección circunferencial en piezas con forma de anillo.

Se coloca la pieza dentro de una bobina magnetizante, concéntricamente con la misma. Y se coloca dentro de la pieza y paralelo al eje de la bobina, un núcleo laminado de acero de baja retentividad. La longitud del núcleo debe ser aproximadamente igual al diámetro del anillo y no inferior a 15 cm.



Este procedimiento induce un campo magnético circular en la pieza, que permite detectar defectos circunferenciales.

d) **Magnetización combinada circular y longitudinal**

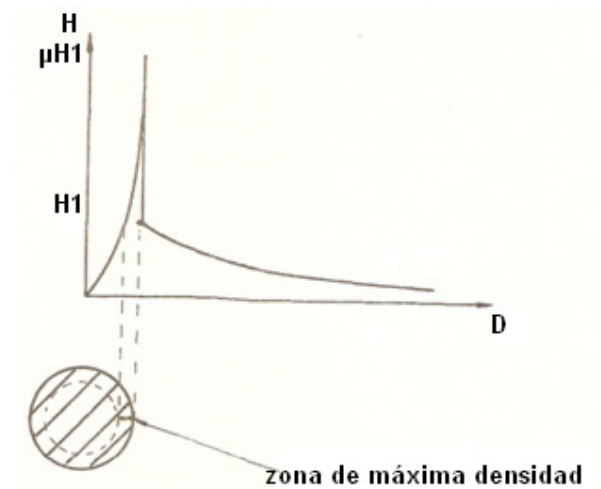
Para inspeccionar completamente defectos con diferentes orientaciones en la pieza son necesarios dos o más magnetizaciones e inspecciones. Una de ellas con magnetización circular y otra con magnetización longitudinal. Para disminuir tiempo de inspección y efectuar una sola observación, en cierto tipo de piezas de geometría simple es posible aplicarlas simultáneamente dos o más corrientes magnetizantes con el fin de detectar defectos orientados en todas las direcciones mediante un solo ensayo. Esto crea lo que se llama un "campo vectorial"

Este modo de magnetización debe ser realizado por personal calificado.

TIPOS DE CORRIENTES PARA MAGNETIZAR

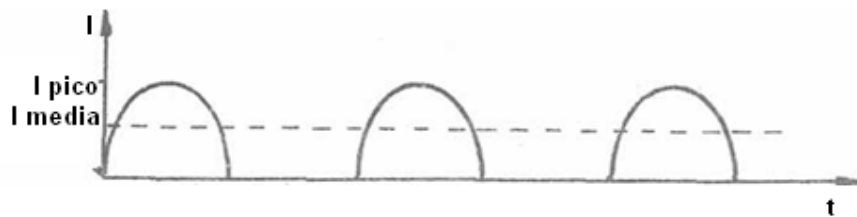
a) **Alterna monofásica**

Tiene poca penetración, por lo tanto las líneas de fuerza se concentran en la superficie, siendo muy sensibles a discontinuidades superficiales. Este tipo de excitación da gran movilidad a las partículas magnéticas.



b) **Alterna rectificada de 1/2 onda o continua pulsante:**

Por ser pulsante otorga gran movilidad a las partículas magnéticas, con lo cual responden mejor a los flujos dispersos.



Tiene las mejores cualidades de penetración para defectos sub-superficiales. La densidad de flujo esta determinada por la $I(\text{pico})$, mientras que el calentamiento es producido por la $I(\text{media})$. En esto reside su principal ventaja con respecto a la continua por rectificación de trifásica, ya que esta tiene $I(\text{pico}) \approx I(\text{media})$ con lo cual a igual densidad de flujo tenemos mayor calentamiento.

PARTÍCULAS MAGNÉTICAS: CARACTERÍSTICAS Y TÉCNICAS DE APLICACIÓN

Las principales características que deben poseer son: muy baja retentividad y elevada permeabilidad (o sea un ciclo de histéresis muy delgado), tamaño y forma adecuada, baja densidad, elevada movilidad, muy buena visibilidad o contraste, e inalterabilidad.

Comercialmente se presentan en dos variedades:

- Para observar con luz blanca
 - grises
 - rojas
 - negras
 - amarillas
 - blancas

Para observar con luz ultravioleta de onda larga, que en las lámparas comúnmente utilizadas en los equipos comerciales tienen un pico de radiación en 3650×10^{-9} m, conocida normalmente como "luz negra".

- Fluorescentes
 - fluorescencia naranja
 - fluorescencia amarillo-verdosa

Las técnicas de aplicación son dos:

a) Técnica seca:

- * Es más sensible para la detección de discontinuidades subsuperficiales.
- * Se la utiliza para piezas grandes de difícil manejo y es adecuada para la detección con equipos de magnetización portátiles.
- * Es sumamente importante para esta técnica, que la superficie a inspeccionar esté limpia y seca.
- * Las partículas magnéticas a utilizar en esta técnica pueden ser para observar con luz blanca o con luz "negra".

Seleccionando el grano de las partículas magnéticas se preestablece el umbral de detección.

a1) con campo continuo

Normalmente se la aplica cuando se utiliza para magnetizar puntas, yugos o bobinas.

Los pasos a seguir son los siguientes:

Aplicamos la corriente de magnetización.

Espolvoreamos las partículas magnéticas.

Quitamos soplando suavemente el exceso de partículas, mientras se aplica la corriente para no borrar accidentalmente alguna indicación.

Suspendemos la circulación de corriente.

Analizamos las indicaciones.

a2) con campo remanente

Sólo se pueden ensayar por esta técnica piezas cuyo magnetismo remanente sea elevado. Este requisito lo cumplen aquellas piezas cuyo contenido de carbono sea superior al 0,2%.

Esta técnica de ensayo debe aplicarse en aquellas piezas de geometría complicada y cambios de sección relativamente notorios, para evitar que indicaciones no relevantes (defectos aparentes) puedan enmascarar indicaciones de defectos reales.

Los pasos a seguir son los siguientes:

Aplicamos la corriente de magnetización.

Suspendemos la circulación de corriente.

Espolvoreamos las partículas magnéticas.

Quitamos el exceso de partículas soplando suavemente.

Analizamos las indicaciones.

b) Técnica húmeda:

Las partículas se aplican en suspensión en aceite liviano, kerosene, agua u otro vehículo con punto de ignición no inferior a 60°C.

Las partículas magnéticas para preparar el baño suelen venir en forma de polvo, pasta o concentrados líquidos. Los concentrados para diluir en agua traen incorporados, o en su defecto el fabricante suministra por separado, aditivos para reducir la sedimentación de las partículas, agentes humectantes antiespumantes y agentes antioxidantes de acuerdo a las necesidades del proceso.

Estos concentrados a su vez poseen un emulsionante que impide la coagulación de las partículas, incluso cuando aceites o contaminantes grasos estén presentes en el baño hasta una determinada proporción en volumen, especificada por el fabricante del producto.

También se comercializa el baño preparado en forma de aerosol, en dos variantes:

- partículas coloreadas
- partículas fluorescentes

Esta técnica es más sensible para la detección de discontinuidades superficiales; es más utilizada para ensayar piezas pequeñas o ser aplicada en procesos de automatización.

Presenta una muy buena movilidad de las partículas, para lo cual se utilizan vehículos de baja viscosidad.

Normalmente se utiliza esta técnica cuando se magnetiza entre cabezas (magnetización circular).

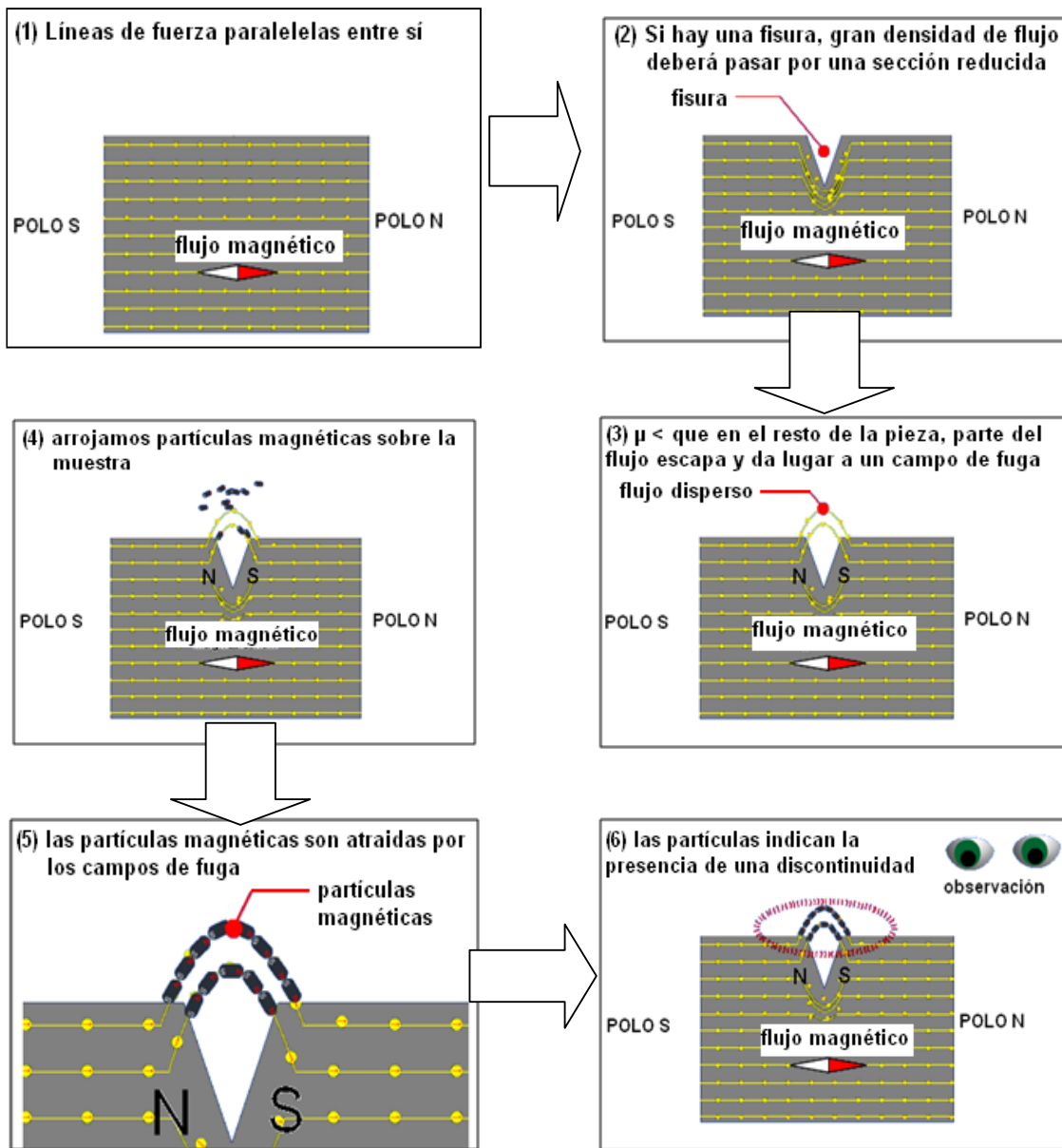
Se procede de la siguiente manera:

- 1) Se baña toda la superficie de la pieza con las partículas magnéticas en suspensión.
- 2) Se aplica la corriente en el instante en que suspendemos el baño, para evitar que la fuerza del chorro del baño lave alguna indicación.
- 3) Se suspende la circulación de corriente.
- 4) Se analizan las indicaciones.

En la preparación del baño es de suma importancia la concentración del mismo, o sea la relación entre el volumen de partículas magnéticas y el volumen de líquido. Una concentración muy baja disminuye la sensibilidad del ensayo, y una concentración muy elevada puede enmascarar la indicación de los defectos.

Para esta técnica de ensayo es fundamental la limpieza de los componentes del equipo, y la concentración del baño.

SÍNTESIS ESQUEMÁTICA DEL MÉTODO



VENTAJAS Y DESVENTAJAS CON RESPECTO AL MÉTODO DE PARTÍCULAS MAGNETIZABLES

Ventajas

- Es más rápido.
- No son necesarias limpiezas sofisticadas, ni preparaciones especiales de la superficie.
- Puede detectar discontinuidades superficiales aún bajo delgadas capas plásticas o esmaltes.
- Puede detectar ciertas discontinuidades sub-superficiales.

Desventajas

- Los materiales no magnéticos no pueden ser testeados con este método (Al, Mg, Cu, Pb, Ti, bronce, aceros austeníticos, etc.).
- El campo magnético debe interceptar las discontinuidades en una dirección dada, por lo tanto, el operador debe conocer su posible ubicación o efectuar más de un ensayo por pieza.
- Las excesivas corrientes que son necesarias para magnetizar piezas grandes.
- La desmagnetización que puede ser necesaria con posterioridad al ensayo.
- El calentamiento localizado y quemado de la superficie de la pieza cuando se utilizan puntas o pinzas con elevada circulación de corriente.

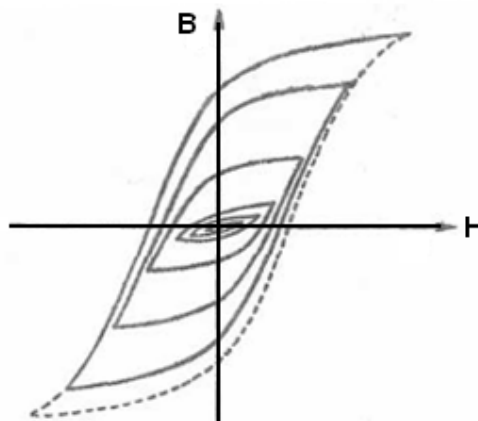
PRECACUCIONES A TENER EN CUENTA

- Los arcos eléctricos que aparecen debido al mal contacto entre las puntas y la pieza cuando circulan corrientes elevadas: por lo tanto no usar en áreas explosivas.
- Los aceites y pastas utilizados afectan la piel. Para uso continuo de estos productos emplear guantes o cremas protectoras.
- Las partículas magnéticas utilizadas en el método seco no son tóxicas, pero en lo posible debe evitarse su inhalación usando mascarar.
- En caso de emplear luz negra, poner los filtros adecuados. No enfocarla directamente sobre los ojos, ni usarla sobre superficies reflectantes.

DESMAGNETIZACIÓN

Suele ser necesario desmagnetizar las piezas una vez inspeccionadas, debido a que el campo magnético residual atrae partículas metálicas ferromagnéticas, por lo tanto si la pieza está sometida a movimiento rotativo o alternativo, esta circunstancia aumentaría el desgaste. Si la pieza debe ser maquinada estas partículas adheridas interferirán en la operación. También pueden molestar para el caso de posteriores soldaduras de arco, pues el campo remanente puede llegar a desviar el arco eléctrico. En otros casos pueden interferir con el uso de instrumentos sensibles a campos magnéticos (aeronáutica por ejemplo).

Para desmagnetizar se somete la pieza a un campo magnético alternativo decreciente, en forma continua o por pasos. Este campo puede ser obtenido con la misma bobina que utilizamos para magnetización longitudinal. Excitamos dicha bobina con corriente alterna y pasamos la pieza a través de la misma hasta alejarnos de ella (esto sin interrumpir el paso de corriente). Obtenemos así, ciclos de histéresis de valor decreciente como se muestra a continuación:



Otra forma de desmagnetizar es elevar la temperatura de la pieza hasta llegar a su “punto de Curie”, a partir del cual un material ferromagnético pierde totalmente su magnetismo remanente.

RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

INTRODUCCIÓN

El objeto de este ensayo es obtener información sobre la macroestructura interna de una pieza o componente.

El principio aplicado es el de la transparencia de los materiales para ondas electromagnéticas de energía apropiada (rayos X o gamma) y el uso de un transductor (película radiográfica) que permita el registro de la imagen obtenida por transparencia.

La aplicación del ensayo requiere el uso de una fuente productora de radiación, la obtención de una imagen radiante que sensibiliza la película radiográfica (transductor), la formación de una imagen latente en la película que una vez revelada brinda una imagen fotográfica observable visualmente por transparencia.

Esta imagen fotográfica o radiografía es el registro de la estructura interna del objeto en una proyección plana, y correctamente interpretada permite obtener información sobre la presencia de discontinuidades, cambios de sección, variaciones locales de densidad o composición que pueden o no constituir defectos. El carácter permanente del registro obtenido constituye una de las ventajas del método.

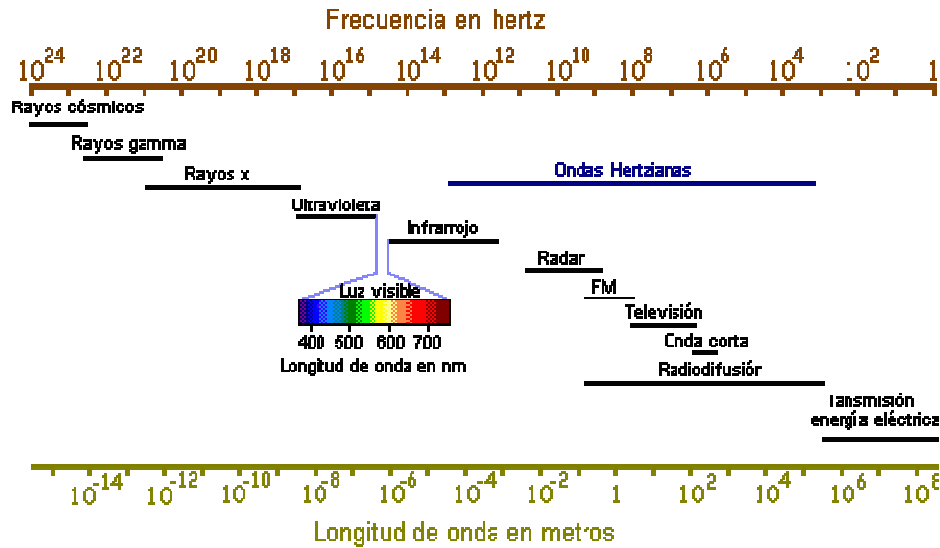
Por razones de practicidad trataremos la radiografía industrial en forma generalizada involucrando, en el mismo método, el ensayo efectuado con rayos X o con rayos gamma. Consideramos que la particularidad de cada una de dichas técnicas no invalida un tratamiento general del método. Las diferencias entre ambas técnicas están dadas principalmente por el origen de la radiación empleada, únicamente, ya que la naturaleza de ambos tipos de radiación es la misma.

NATURALEZA DE LA RADIACIÓN EMPLEADA

Los rayos X y los rayos gamma utilizados en radiografía industrial son ondas electromagnéticas de la misma naturaleza que las ondas de radio o de televisión y que la radiación luminosa, pero de frecuencia y por lo tanto energía mucho más alta. Los rayos X y gamma, siendo de igual naturaleza se diferencian por su origen. Los rayos X se originan por excitación de la envoltura electrónica del átomo mediante bombardeo con electrones acelerados, o por desaceleración de dichos electrones en el campo de atracción nuclear.

Los rayos gamma tienen su origen en el seno del núcleo atómico de los radioisótopos produciéndose en forma espontánea según las leyes del decaimiento radioactivo. Generalmente los rayos gamma cubren rangos de energía más estrechos.

A continuación se muestra el espectro de radiación electromagnética:



Entre las propiedades de interés se debe recordar que las radiaciones X o gamma:

- se propagan en línea recta no siendo desviadas por campos eléctricos ni por campos magnéticos
- ionizan los gases
- excitan radiación fluorescente en ciertos compuestos químicos
- sensibilizan las emulsiones fotográficas
- dañan los tejidos vivos y no son detectadas por nuestros sentidos
- atraviesan todos los materiales incluso los opacos a la radiación luminosa, sufriendo una absorción o pérdida de energía en relación con los espesores o densidad de material atravesado

INTERACCIÓN CON LA MATERIA

La radiación X o gamma puede interactuar con la materia, de acuerdo con distintos procesos, de los cuales los más importantes son tres:

- **Efecto fotoeléctrico:** Un fotón, correspondiente al haz de radiación electromagnética, que se considera que atraviesa la materia, puede interactuar con un electrón orbital de un átomo transfiriéndole por choque inelástico toda su energía. Si la energía del fotón es superior a la energía de ligadura del electrón, este será desplazado de su órbita y puesto en movimiento como electrón libre con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón y la energía de ligadura.

$$E_{ce} = E - W_e = h \cdot f - W_e$$

E_{ce} = energía cinética del electrón

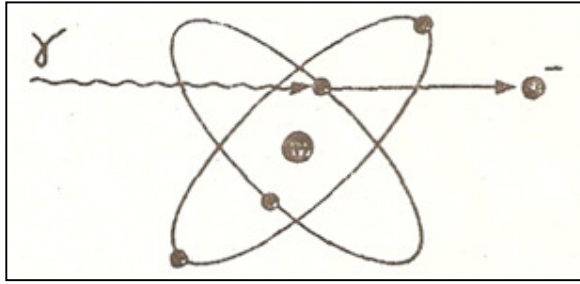
$E = h \cdot f$ = energía del fotón

h = constante universal de Planck

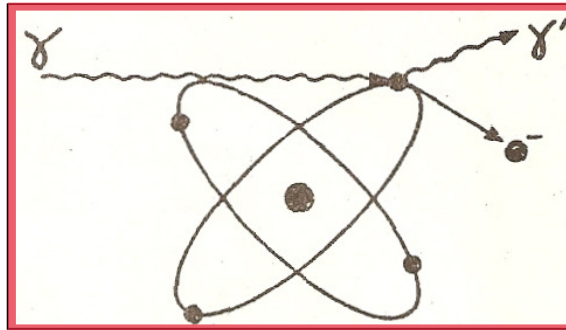
f = frecuencia de la radiación

W_e = energía de ligadura del electrón

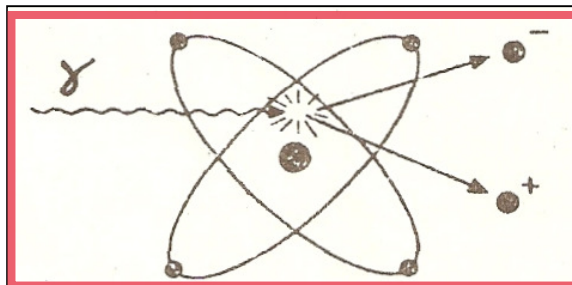
De acuerdo con esto, el efecto fotoeléctrico resulta en la absorción virtualmente completa del fotón del haz de radiación primaria apareciendo en cambio electrones en movimiento y rayos X secundarios que por su baja energía son rápidamente absorbidos en el material.



- **Efecto Compton:** Un fotón correspondiente a un haz de radiación X o gamma también puede interaccionar con un electrón que se puede suponer en reposo, sufriendo un choque elástico y transfiriéndole solo una parte de su energía. De esta interacción resulta entonces un electrón en movimiento, con una cierta energía cinética y un fotón secundario de menor energía que el incidente, que se desplaza con una dirección distinta, que depende de la energía cedida y de los momentos resultantes.



- **Producción de Pares:** Cuando la radiación electromagnética X o gamma atraviesa el campo eléctrico del núcleo puede sufrir una interacción con el mismo transformándose en materia, más precisamente en dos electrones de signo contrario (un electrón y un positrón).



La probabilidad de ocurrencia de este efecto, aumenta al aumentar la energía. En este tipo de absorción no se produce radiación electromagnética secundaria dispersa.

ATENUACIÓN DE LAS RADIACIONES

Considerando un haz de radiación X o gamma podemos ver que en cada interacción con la materia, por cualquiera de los efectos considerados (efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares) se elimina o remueve un fotón. En razón de ello el haz original o primario al atravesar la materia va reduciendo su intensidad, se va atenuando.

La disminución de intensidad ΔI correspondiente a un espesor de absorbente ΔX es proporcional a la intensidad I del haz incidente, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta I / \Delta X = - \mu \cdot I$$

donde μ es el coeficiente de atenuación lineal que expresa la probabilidad de interacción de la radiación con la materia.

Considerando incrementos infinitesimales podemos escribir la ecuación anterior en su forma diferencial:

$$dI / I = - \mu \cdot dX$$

que podemos integrar entre los límites 0 y X;

$$\int_{I_0}^{I_x} \frac{dI}{I} = - \mu \int_0^X dX \Rightarrow \ln \frac{I_x}{I_0} = - \mu \cdot X$$

La ecuación puede expresarse en forma exponencial aplicando antilogaritmos, con lo cual tenemos la conocida expresión:

$$I_x = I_0 e^{-\mu \cdot X}$$

El coeficiente μ corresponde a la suma de los coeficientes de atenuación lineal de cada uno de los diferentes procesos de interacción antes descriptos, por lo tanto podemos poner:

$$\mu = \zeta + \sigma + K$$

ζ = coeficiente de atenuación lineal para efecto fotoeléctrico

σ = coeficiente de atenuación lineal para efecto Compton

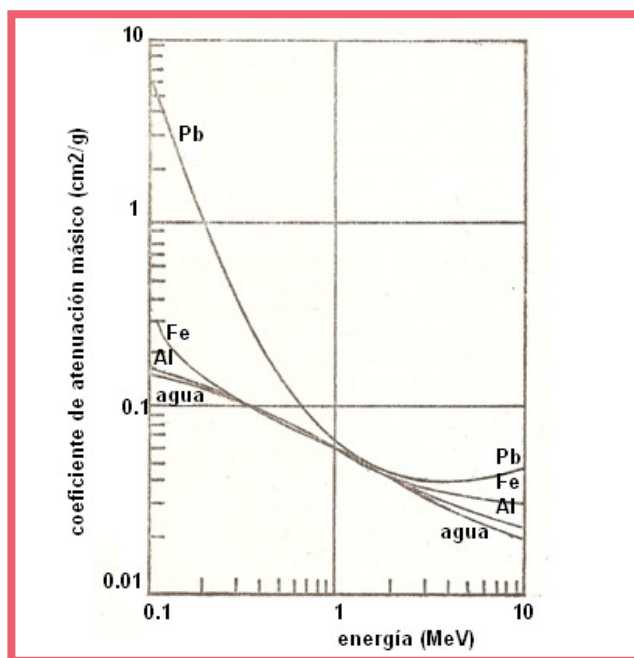
K = coeficiente de atenuación lineal para producción de pares

Cada uno de estos coeficientes mide la probabilidad de ocurrencia del evento indicado con su nombre, por unidad de longitud recorrida en el material considerado.

Teniendo en cuenta que para la interacción de la radiación con la materia lo que interesa es la masa de material atravesado y no el camino recorrido, suele ser conveniente utilizar para los cálculos el “coeficiente de atenuación másico” que resulta de dividir el coeficiente de atenuación lineal por la densidad (ρ) del absorbente, es decir:

$$\text{Coeficiente de atenuación másico} = \mu / \rho \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

Una de las ventajas que presenta el uso de este coeficiente es el hecho que dentro de un cierto rango de energía su valor es el mismo para materiales de número atómico medio y bajo, como se puede apreciar en la siguiente figura:



La ecuación del coeficiente μ , que expresa la relación entre la intensidad de radiación transmitida en función del espesor y material atravesado, nos permite calcular la intensidad de la radiación emergente de una pieza de espesor X sobre la cual incide un haz de radiación X o gamma de intensidad I_0 .

Si el absorbente presenta diferentes espesores en cada uno de ellos, la intensidad de radiación emergente será diferente; mayor en las áreas de menor espesor y menor en las áreas que corresponden a espesores mayores.

Por otra parte, el valor de μ depende del tipo de material atravesado. Por lo tanto, si la pieza es de espesor constante pero tiene variaciones de material, también variará la intensidad de radiación emergente de acuerdo al valor de μ que corresponda a cada material.

Estas variaciones de intensidad en el haz emergente, debidas a variaciones de espesor y/o a variaciones en el tipo de material que pueden ser de diseño o por defectos, se pueden registrar mediante una película fotográfica, cuyo ennegrecimiento es función de la cantidad de radiación recibida, dando origen al método radiográfico.

Al aplicar el método radiográfico debemos tener en cuenta que al producirse atenuación por efecto Compton, según hemos visto, se origina radiación electromagnética secundaria dispersa. Por esta razón, de la pieza que estamos radiografiando emerge no sólo el haz de radiación primaria transmitida, diferenciada según los distintos espesores atravesados, sino también una cierta intensidad de radiación secundaria dispersa que llega a la película con cualquier dirección, produciendo un ennegrecimiento de fondo que interfiere en la imagen radiográfica, por cuanto la película no distingue entre uno u otro tipo de radiación. No tener en cuenta la radiación dispersa constituye una de las causas de error más frecuente en la práctica radiográfica.

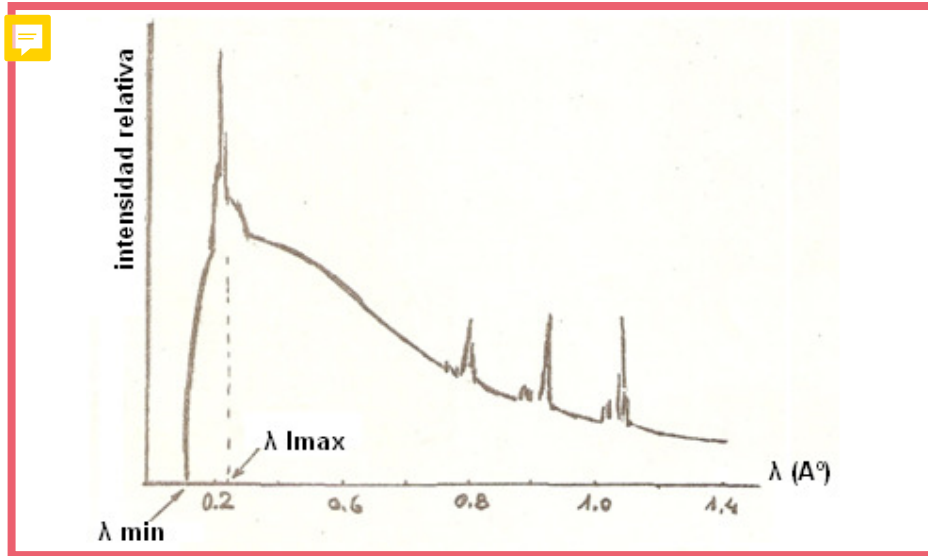
PRODUCCIÓN DE RAYOS X

La radiación X se obtiene por bombardeo electrónico de un blanco metálico. En una válvula electrónica para producir rayos X, los electrones emitidos por el cátodo son acelerados y dirigidos sobre el ánodo mediante un campo eléctrico.

La emisión de rayos X en el ánodo o blanco se produce según dos fenómenos distintos:

- 1) emisión de un espectro continuo de rayos X por enfrenamiento de los electrones en el blanco.
- 2) emisión de un espectro de rayas (discontinuo) producido por recaptura de electrones orbitales desplazados previamente por choque de los electrones incidentes.

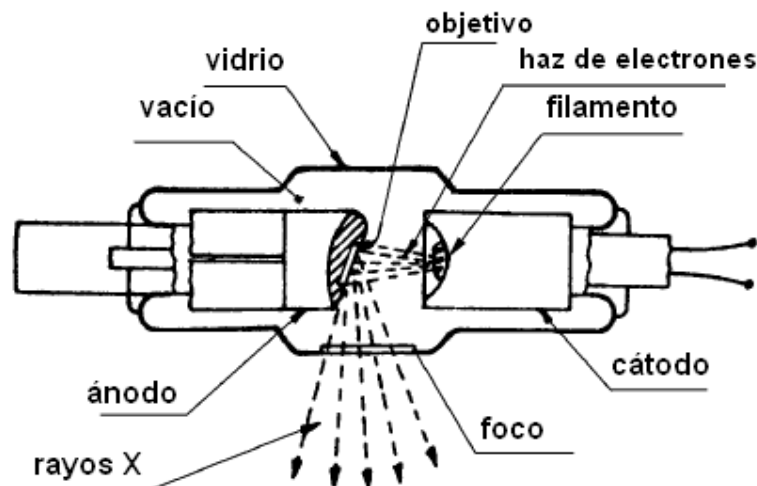
La energía de los electrones incidentes en el blanco y el elemento que constituye a éste, determinan las relaciones entre ambos espectros.



En la figura se muestra un espectro característico de un blanco de tungsteno bombardeado con electrones acelerados por una diferencial de potencial de 200 KV. Se observa que la mayor parte de la energía emitida como rayos X corresponde al espectro continuo.

GENERACIÓN DE RAYOS X

Los tubos de rayos X consisten esencialmente en una ampolla de vidrio cerrada al vacío en la cual se encuentran sellados dos electrodos: el ánodo (positivo) y el cátodo (negativo). El cátodo termina en un filamento calentado por la circulación de corriente que suministra un transformador de baja tensión. El filamento, que es el elemento emisor de electrones, enfrenta al ánodo que es usualmente un bloque de cobre con su extremo cortado en bisel a 70° respecto del eje del tubo. Sobre el ánodo se encuentra una lámina delgada de tungsteno que constituye el blanco.



El calentamiento del filamento (cátodo) produce la emisión de electrones que será mayor cuanto mayor sea la temperatura, el que se regula mediante la corriente que circula por el filamento y que puede llegar a ser de varios amperes. Los electrones son acelerados hacia el blanco mediante la aplicación del alto voltaje entre cátodo y ánodo. El área actual que cubren los electrones en su colisión con el blanco se llama "foco de emisión" o simplemente "foco". El tamaño del foco queda determinado por la forma del filamento y la focalización lograda sobre el haz de electrones.

El flujo de electrones hacia el blanco constituye la corriente del tubo (corriente módica), su magnitud es del orden de los miliamperes (generalmente entre 3 y 15) y su regulación puede hacerse variando la corriente de filamento ya que depende principalmente del calentamiento del cátodo.

La velocidad de los electrones, es decir su energía, es controlada variando el voltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo. El voltaje para que los electrones adquieran la energía necesaria para lograr la emisión de rayos X es elevado y se lo expresa generalmente en KV.

Cuando los electrones acelerados chocan con el blanco son detenidos abruptamente y ceden la mayor parte de su energía en forma de calor mientras que una pequeña proporción, alrededor del 1 %, es utilizada en la emisión de rayos X. La eficiencia de la conversión en rayos X es aumentada usando como blanco metales de elevado número atómico, tungsteno por ejemplo.

Las principales limitaciones de potencia que tienen los tubos de rayos X están dadas por el tamaño del foco y la disipación del calor.

El tamaño del foco de cualquier tubo de rayos X debe mantenerse dentro de ciertos límites impuestos por razones de calidad radiográfica. Pero la limitación del tamaño de foco implica una limitación en la potencia (alta tensión y corriente de tubo), por cuanto una excesiva concentración en la carga calórica dificulta su disipación y conduce a la fusión del blanco.

EQUIPOS DE RAYOS X

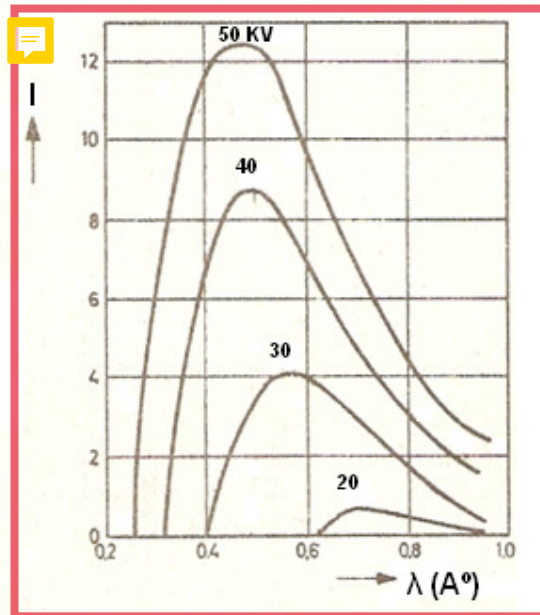
En su aspecto físico un equipo de rayos X de uso corriente en la industria, consta de una valija o consola de comando y de un cabezal de irradiación. En la primera se encuentran un autotransformador de entrada, comandos para regulación de alta tensión y corriente anódica y preselector de tiempos para fijar la duración de cada exposición. En el cabezal de irradiación se encuentra alojado el transformador de alta tensión, el tubo de rayos X y un sistema de refrigeración, adecuado a la potencia del tubo.

ESPECTRO DE RAYOS X Y CONTROL DE LA EMISIÓN

Los equipos de rayos X de uso industrial están diseñados de manera que la mayor parte de la energía sea emitida bajo la forma de espectro continuo, por lo tanto al referirnos al espectro de emisión de esos equipos no es necesario considerar el espectro de rayas o emisión característica.

Los factores que gobiernan la emisión en su calidad y cantidad son el flujo de electrones que bombardea el blanco (corriente anódica) y la tensión de aceleración aplicada (KV) a los mismos.

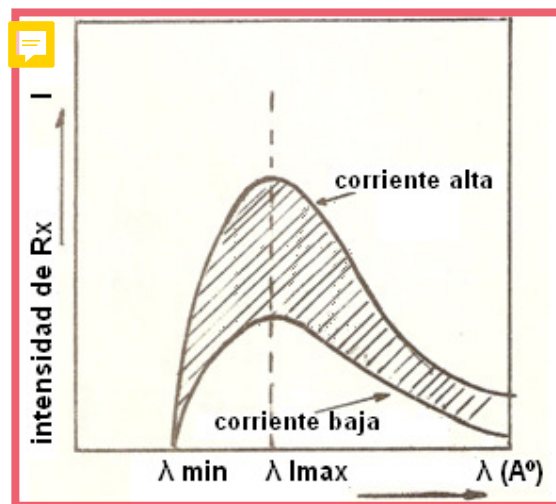
El espectro continuo de rayos X emitido por el blanco (ánodo) varía de acuerdo con el voltaje aplicado. Cuanto mayor sea el voltaje mayor será la energía de los electrones que excitan el blanco. En la figura que se muestra a continuación, se indica la relación entre espectros continuos obtenidos por excitación a distintos voltajes manteniendo la corriente anódica constante. Se puede observar que a mayor tensión mayor es la energía a la que se inicia el espectro (la longitud de onda mínima decrece).



Al aumentar la tensión se produce además, un aumento de intensidad en todas las longitudes de onda, pero este aumento es mayor para las menores longitudes de onda, **esto determina que la longitud de onda a la cual corresponde la mayor intensidad relativa se acerque a la menor longitud de onda (mayor energía) emitida**, en forma proporcional al aumento de tensión de aceleración que se aplique.

Se observa entonces que las variaciones en la tensión de aceleración aplicada al tubo determina una modificación en la "calidad" o características de la radiación emitida.

En la siguiente figura se muestra que el aumento de corriente anódica no varía la calidad del espectro, manteniéndose el valor de I_{\min} y el valor de longitud de onda, para el cual se produce la mayor intensidad relativa. El aumento de corriente anódica sólo produce un aumento en la intensidad de radiación emitida. Esto se explica en razón de que el aumento de corriente anódica sólo implica un aumento en el flujo de electrones que excita el blanco (ánodo) y no un aumento de la energía cinética de los mismos.



RAYOS GAMMA

En principio todo radioisótopo que emita radiación gamma puede ser usado para ensayos no destructivos en la misma forma que los rayos X.

ISÓTOPOS Y RADIOISÓTOPOS

Los átomos de un mismo elemento se caracterizan por tener igual número atómico e idénticas propiedades químicas pero puede ocurrir que no todos ellos tengan el mismo peso atómico. La diferencia estará dada por el diferente número de neutrones que contengan en su núcleo. Estos átomos de un mismo elemento que se diferencian por su peso atómico son llamados isótopos. Así el iridio de la naturaleza es una mezcla de dos isótopos uno de ellos de peso atómico 191 y el otro de peso atómico 193. Un isótopo será indicado por su símbolo químico en un número que indica la suma de protones y neutrones que contiene su núcleo. Así los isótopos naturales del iridio se escribirán Ir 191 y Ir 193.

Los isótopos radioactivos o radioisótopos son aquellos isótopos cuyos núcleos contienen más o menos neutrones que los que están presentes en los núcleos de los isótopos estables que existen en la naturaleza para el elemento considerado. Tales núcleos son inestables y pierden energía, según distintos procesos, emitiendo radiaciones de distinto tipo, incluida radiación gamma, según los casos. Este proceso conocido como "decaimiento radioactivo", caracterizado por el tipo de radiación emitida y por la velocidad del decaimiento, es el que determina la aptitud del radioisótopo para cada aplicación particular.

Los radioisótopos usados en radiografía son obtenidos de los productos de fisión del uranio en los reactores atómicos o por reacciones nucleares realizadas por bombardeo neutrónico de isótopos estables en dichos reactores. La mayoría de los radioisótopos usados en radiografía tienen un neutrón en exceso en el núcleo. Este neutrón adicional ha sido forzado a incorporarse en el núcleo bombardeando un isótopo estable con neutrones en un reactor nuclear.

ESPECTRO DE RADIACIÓN

La emisión de radiación gamma es una consecuencia de transformaciones bien definidas dentro del núcleo y por lo tanto ocurre en rangos de energía perfectamente establecidos en cada caso, corresponde por lo tanto un espectro de rayas.

Algunos radioisótopos como el Cs 137 emiten una sola energía mientras que otros producen un espectro más o menos complejo con diferentes energías. Un ejemplo de este último es el Ir 192 que emite no menos de 16 energías diferentes. El Co 60 por su parte emite sólo dos energías diferentes de rayos gamma y el Cs 137 emite una sola radiación de 0,66 MeV de energía.

DECAIMIENTO RADIOACTIVO

Si se observa la relación entre protones (Z) y neutrones (N) en los núcleos atómicos de los distintos elementos se puede concluir que mientras la relación Z/N se mantiene próxima a la unidad el isótopo tiende a ser estable.

A medida que nos alejamos de dicha relación, ya sea por defecto o por exceso de neutrones, los núcleos son inestables, encontrándose en condiciones de sufrir un proceso de redistribución de sus nucleones de manera de acercarse al valor de la relación Z/N más estable para el elemento considerado.

Este proceso de redistribución de los nucleones en un isótopo inestable (radioisótopo), que se produce con emisión de partículas y/o radiaciones, se conoce con el nombre de decaimiento o desintegración radioactiva. El decaimiento de los radioisótopos puede producirse de diversas maneras.

PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN

La velocidad a la cual una masa de átomos radioactivos sufre el proceso de decaimiento radioactivo descrito es una función de la estructura nuclear y no puede ser modificada por medios químicos ni físicos.

El decaimiento radioactivo es un proceso estadístico que depende únicamente de la estructura del núcleo del radioisótopo considerado y del número de los mismos simultáneamente presentes.

Ha sido demostrado experimentalmente que la probabilidad de que un átomo en particular se desintegre es independiente de su edad, de la historia pasada del mismo o del medio en que se encuentre. Por lo tanto si hay N átomos presentes de un radioisótopo, la variación ΔN en dicho número debida al decaimiento radioactivo en un intervalo de tiempo Δt depende únicamente de N y de la constante λ característica para cada radioisótopo. Esta constante λ es llamada “constante de decaimiento” y caracteriza a cada radioisótopo. Estos factores se pueden entonces relacionar por la ecuación:

$$\Delta N / \Delta t = - \lambda \cdot N$$

El signo negativo es debido a que se trata de una disminución de N en el tiempo. Si se considera que N es muy grande con relación a los intervalos considerados, la ecuación puede ser escrita como sigue:

$$dN / N = - \lambda \cdot dt$$

La fracción de átomos N que restan de un número inicial N_0 al cabo de un tiempo finito t puede ser determinada integrando la ecuación anterior desde cero a infinito. Tendremos así:

$$\ln (N / N_0) = - \lambda \cdot t$$

Esta ecuación puede expresarse en la forma exponencial de uso más frecuente:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

La constante λ tiene dimensión de la recíproca del tiempo y es tabulada generalmente en s^{-1} . Pero un modo más conveniente de expresar el decaimiento radioactivo es por medio del período de semidesintegración ($T_{1/2}$) que es el tiempo necesario para que una cantidad inicial de radioisótopo se reduzca a la mitad. Su relación con respecto a λ se puede deducir a partir de la ecuación logarítmica, reemplazando t por $T_{1/2}$; luego:

$$\ln (N/N_0) = \ln 0,5 = - \lambda \cdot T_{1/2}$$

$$\ln 2 = 0,693 = - \lambda \cdot T_{1/2}$$

$$\lambda = 0,693 / T_{1/2}$$

De acuerdo a esto con esto la ecuación puede escribirse como sigue:

$$N = N_0 \cdot e^{-0,693 \cdot t / T_{med}}$$

Si bien en física nuclear se trabaja con los valores de λ , en la práctica industrial resulta más conveniente emplear el valor de $T_{1/2}$ para facilitar los cálculos de actividad de las fuentes utilizadas.

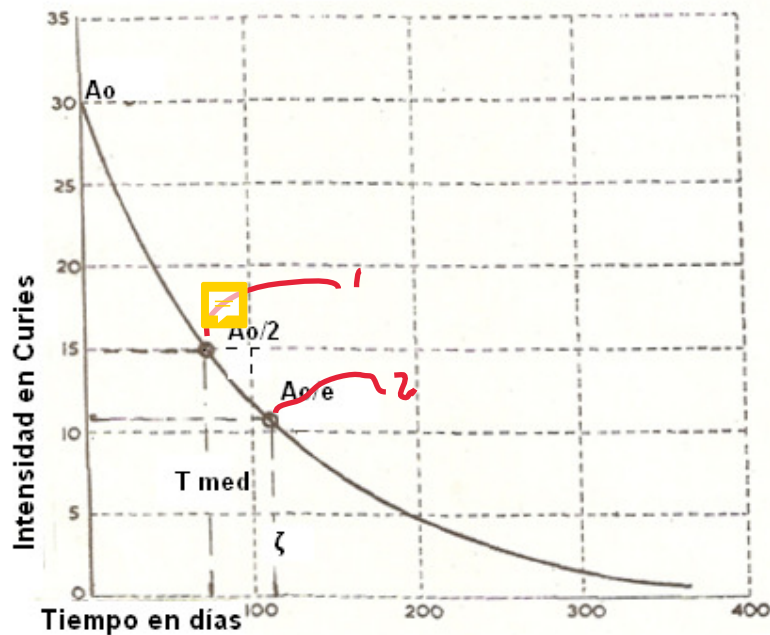
RADIOACTIVIDAD DE LOS RADIOISÓTOPOS

La radioactividad A de un radioisótopo se mide por la cantidad de átomos del mismo que se desintegran o decaen por unidad de tiempo. Como hemos visto que el número que decae ΔN es directamente proporcional al número N de átomos presentes, las ecuaciones anteriores pueden ser escritas en función de la actividad A de la fuente radioactiva, es decir:

$$\Delta N / \Delta t = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow A_t = A_0 \cdot e^{-0,693 \cdot t / T_{med}}$$

La unidad empleada para medir la actividad es el curie (Ci). Un curie corresponde a una velocidad de desintegración o decaimiento de $3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones por s^{-1} (esto es igual al número de desintegraciones que se producen por segundo en un gramo de radio puro).

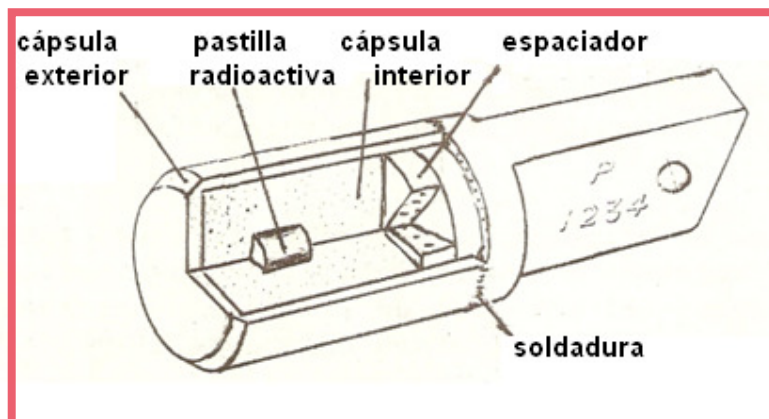
De lo que antecede queda claro entonces que la "actividad" de una fuente radioactiva no es un valor constante, sino que disminuye continuamente con el tiempo. En la práctica radiográfica, es necesario conocer en cada exposición la actividad actual de la fuente, para ello se usan gráficos como el siguiente. En dicho gráfico se ha indicado para el caso del Ir 192, el valor que corresponde a $T_{1/2}$ (período de semidesintegración) y ζ (vida media).



FUENTES DE RADIACIÓN GAMMA

Si bien en principio todo radioisótopo emisor de radiación gamma puede ser usado para radiografía en la práctica sólo cinco de ellos reúnen características que permiten su aplicación en radiografía industrial. Éstos son: Co 60, Cs 134, Cs 137, Ir 192 y Thulium(Tm) 170.

Una fuente de radiación consiste en algunos gramos o miligramos de material conteniendo el Radioisótopo dentro de una capsula de protección de manera que sea seguro su uso industrial.



En la figura se muestra el esquema de una fuente de radiación gamma de uso industrial. El material radioactivo en forma de pastilla se encuentra dentro de una capsula de acero cerrada por soldadura. Esta cápsula retiene y protege el material, lleva la identificación correspondiente y posee una prolongación o lengüeta que permite su fijación al dispositivo de manejo.

La pastilla de material radioactivo es usualmente un cilindro solido de metal puro (caso de Co 60 e ir 192) o cerámico (caso de Cs 134, Cs 137, Tm 170), cuyo diámetro y alto son iguales. Su tamaño puede variar de 0,5 x 0,5 mm hasta 6x6 mm. En el caso de Cs 137 la pastilla radioactiva es usualmente una esfera.

EQUIPOS PARA RADIOGRAFÍA GAMMA

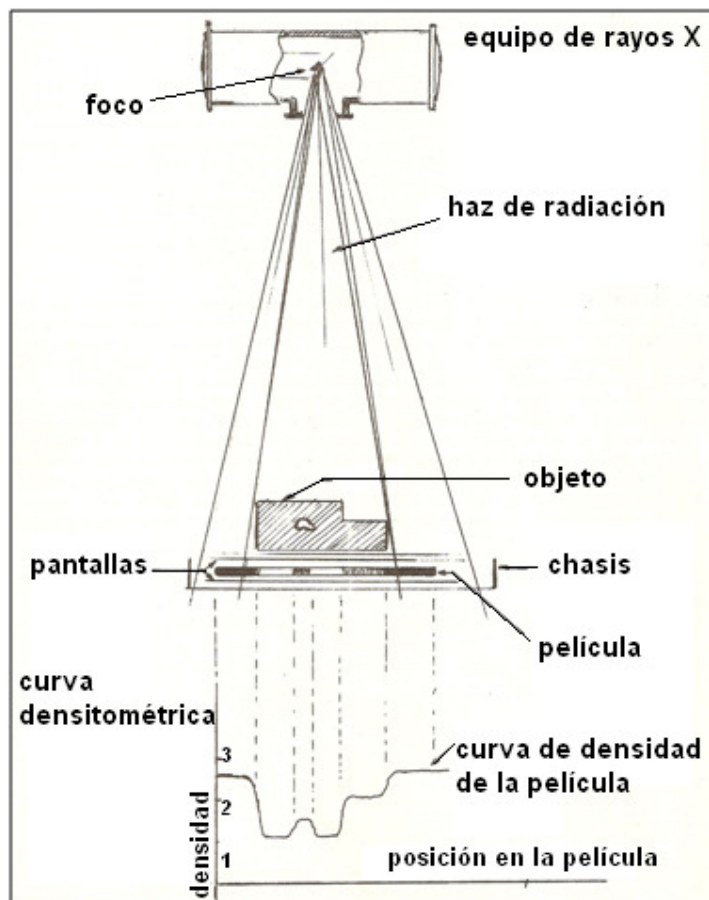
Dado que la emisión de radiación por un radioisótopo no puede ser detenida ni modificada, la fuente radioactiva debe ser guardada dentro de un blindaje que absorba la radiación y que este provisto de dispositivos que permitan realizar la exposición cuando sea requerido. Estos blindajes son llamados equipos de gammagrafía o cámaras de gammagrafía.

Existen tres tipos básicos de cámaras. Una retiene en forma permanente la fuente en su interior y para hacer la exposición se abre un diafragma colimador del haz que restringe el ángulo solido de exposición a un valor determinado. Otro tipo dispone de un mecanismo que permite conducir la fuente, por control remoto, desde el blindaje hasta el extremo de un tubo flexible que se posiciona en el lugar adecuado para hacer la exposición. Finalmente existe un tercer tipo, llamado de antorcha en el cual la fuente puede ser extraída del blindaje mediante un maneral adecuado que permite su ubicación en posición adecuada. Este ultimo tipo tiene restricciones en su uso por razones de seguridad y se lo emplea generalmente en la radiografía de soldadura de tuberías.

LA PRÁCTICA RADIOGRÁFICA

Tal como dijimos antes una radiográfica es el registro en un film fotográfico de la imagen radiante, de un objeto, producida por el paso, de radiación X o gamma a través del mismo.

El film consiste en un soporte transparente cubierto en ambos lados con una capa de **gelatina** que contiene en suspensión **granos** **extremadamente finos de haluro de plata**. Cuando el film es expuesto a radiación X, gamma, ultravioleta o luz visible se produce una **excitación fisicoquímica de los granos de haluro de plata**. Así excitados pueden ser reducidos a partículas negras de plata metálica mediante un proceso químico controlado que se conoce como **"revelado del film"**; terminado este proceso se deben eliminar los granos de haluro de plata no reducidos mediante el **"fijado"** y lavado del film que elimina además todos los agentes químicos incorporados durante el "procesado del film". Seco el film su



observación se debe hacer por transparencia.

La disposición para un ensayo radiográfico se puede ver en la figura. El haz de radiación X o gamma proveniente de una fuente lo más puntual posible, se hace incidir normalmente sobre la pieza en examen. La radiación es parcialmente absorbida, según vimos antes, en función del espesor y densidad del material atravesado, emergiendo diferenciada en su intensidad, constituyendo la "imagen radiante" del objeto. Esta imagen radiante es recogida por el film radiográfico colocado inmediatamente detrás del objeto y protegido, por una cubierta (chasis) contra el efecto de la luz. Se produce en el film una imagen latente que es puesta de manifiesto como la radiografía del objeto una vez realizado el procesado del film. En la radiografía aquellas partes más oscuras corresponden a las zonas donde la intensidad de radiación ha sido mayor es decir a las partes del objeto que tienen menor espesor o menor masa específica.

Al observar una radiografía se deben tener en cuenta tres características fundamentales:

- 1) **Densidad:** Es el término que describe el grado de ennegrecimiento alcanzado en la película. Cuantitativamente se expresa por el logaritmo en base decimal de la relación entre la luz incidente sobre el film I_0 y la luz transmitida, I_t , a través del mismo.

$$D = \log (I_0 / I_t)$$

La densidad en el film es medida mediante el instrumento conocido como "densitómetro" que utiliza una fuente de luz estable y una célula fotoeléctrica para medir la luz transmitida, dando el resultado en valores de % de transmisión o valores de densidad según definición anterior.

- 2) **Contraste:** Al observar una radiografía la imagen se ve como variaciones en la luz transmitida que llega al observador a través de distintas densidades. La diferencia entre la intensidad luminosa de dos áreas adyacentes es un índice del contraste.

El contraste percibido por el observador es un valor subjetivo que no puede medirse y depende del mismo y de las condiciones de observación. El contraste como valor objetivo puede ser medido mediante un densitómetro y se expresa como la diferencia entre las densidades medidas en dos áreas adyacentes.

- 3) **Definición:** La nitidez de bordes o límites entre dos áreas de diferente densidad se conoce como definición radiográfica. El valor objetivo de la definición esta dado por el ancho del límite entre dos zonas adyacentes de densidad diferente, pero uniforme. Prácticamente su valor se obtiene registrando punto a punto los cambios de densidad a través del límite entre dos zonas adyacentes

SELECCIÓN DE LA RADIACIÓN

Independientemente de los factores prácticos que determinan el uso de equipos de rayos X o fuentes de radiación gamma para realizar una determinada radiografía debe tenerse en cuenta que el mayor contraste en la imagen radiante se obtendrá con radiación de menor energía y espectro continuo. Esto es apropiado para cuerpos con pocas variaciones de espesor o densidades, pero puede ser inconveniente al radiografiar cuerpos con grandes variaciones de espesor o densidad.

Generalmente al variar la calidad de la radiación utilizada influimos en el contraste en forma directa y a través de las modificaciones que se producen en la relación entre radiación directa y radiación dispersa.

Usando rayos X se aplicarán los diagramas de exposición eligiendo las tensiones más bajas compatibles con los otros factores intervinientes.

En caso de usar radiación gamma se seleccionará el radioisótopo de acuerdo al rango de espesores aconsejado para cada radioisótopo y material en particular teniendo en cuenta que, siendo el

espectro de radiación de los mismos poco complejo, los límites de aplicación son más estrictos que para el caso de rayos X cuyo espectro es continuo.

SENSIBILIDAD RADIOGRÁFICA

La detección de defectos en un material depende de la diferencia de absorción de la radiación entre la parte sana y la parte defectuosa. En el caso simple de que el defecto sea una cavidad, el que aparezca o no en la radiografía depende de que la técnica empleada sea capaz de detectar la diferencia de absorción que existirá entre la radiación que pasa por la zona sana y por la zona defectuosa. Si la técnica permite detectar la diferencia de intensidad de radiación debida a una diferencia del 2% en el espesor del material, entonces idealmente una cavidad cuyo diámetro fuera mayor que el 2% del espesor sería detectada, mientras que una menor pasaría inadvertida.

Si por otra parte el defecto en vez de ser una cavidad fuese una inclusión de otro material menos denso (por ejemplo escoria en una soldadura de acero) la situación sería diferente pues en este caso como el material de la inclusión también produce alguna absorción ahora el diámetro del defecto tendría que ser mayor que el 2% del espesor total para ser detectado. Por lo tanto, según la densidad del material del defecto podría no ser detectado aunque el diámetro fuera bastante mayor que el 2% del espesor.

Desafortunadamente la absorción relativa del defecto depende no solo de su constitución y homogeneidad sino también de la calidad de la radiación usada.

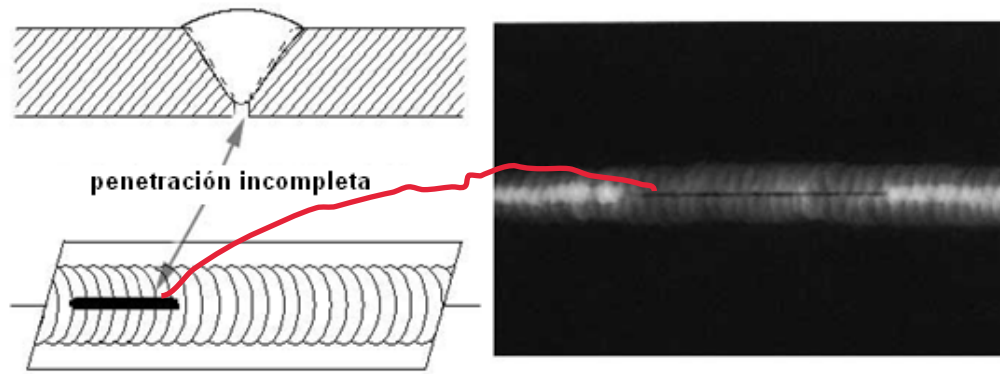
Si consideramos además que la detección del defecto depende de su orientación con respecto a la dirección del haz, especialmente si se trata de un defecto plano, es claro que no será posible argumentar ninguna certeza con respecto a la posibilidad de su detección por el hecho de que la técnica aplicada permita revelar una mínima diferencia en la absorción de radiación.

Es fundamental tener siempre presente que es imposible poder afirmar que una determinada técnica radiográfica permita detectar cualquier tipo de defecto por encima de una cierta dimensión a pesar de que se hayan definido por trabajos previos las características de absorción para un tipo específico de defecto, ya que no hay manera cierta para especificar las características de absorción para todo tipo y orientación de defecto.

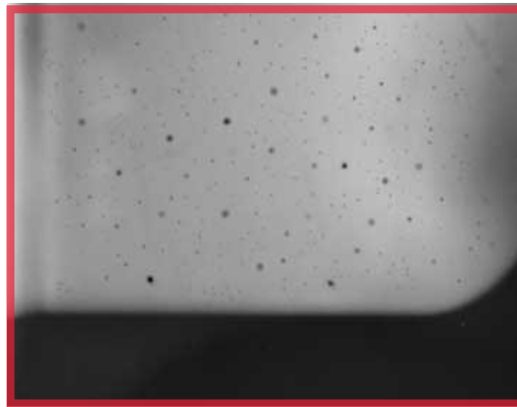
INTERPRETACIÓN RADIOGRÁFICA

Además de producir radiografías de alta calidad, el radiólogo también debe ser experto en la interpretación radiográfica. La interpretación de las radiografías se realiza en tres pasos básicos: (1) detección, (2) interpretación, y (3) evaluación. Todas estas medidas hacen uso de la agudeza visual del radiólogo. La agudeza visual es la capacidad para resolver un patrón espacial de una imagen. La capacidad de un individuo para detectar discontinuidades en la radiografía se ve afectada por las condiciones de iluminación en el lugar de visualización y el nivel de experiencia para reconocer las diversas características de la imagen.

En la siguiente figura, se observa un defecto típico en soldaduras, conocido como penetración incompleta o falta de penetración. Se produce cuando el metal de soldadura no logra penetrar en la articulación. Es una de las discontinuidades de soldadura más objetable. En la radiografía aparece como una zona oscura, con bordes rectos bien definidos en el centro de la soldadura.



A continuación se muestra la radiografía de una pieza fundida, en la que se destaca la porosidad causada por el gas acumulado o aire atrapado por el metal. Estas discontinuidades son generalmente cavidades esféricas, ocurren cuando no se ha podido proporcionar el calor necesario para forzar al gas o al aire a salir del molde. El gas o el aire queda atrapado en el metal fundido que comienza a solidificarse. Los poros también pueden ser causados por arena demasiado fina, demasiado húmeda o que tenga una baja permeabilidad para dejar escapar el gas.



VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

Ventajas

- Pueda usarse en materiales metálicos y no metálicos, ferrosos y no ferrosos.
- Proporciona un registro permanente de la condición interna de un material.
- Es mas fácil poder identificar el tipo de discontinuidad que se detecta.
- Revela discontinuidades estructurales y errores de ensamble.

Desventajas

- Difícil de aplicar en piezas de geometría compleja o zonas poco accesibles.
- La pieza o zona debe tener acceso en dos lados opuestos.
- No detecta discontinuidades de tipo laminar.
- Se requiere tomar medidas de seguridad para la protección contra la radiación.

ULTRASONIDOS

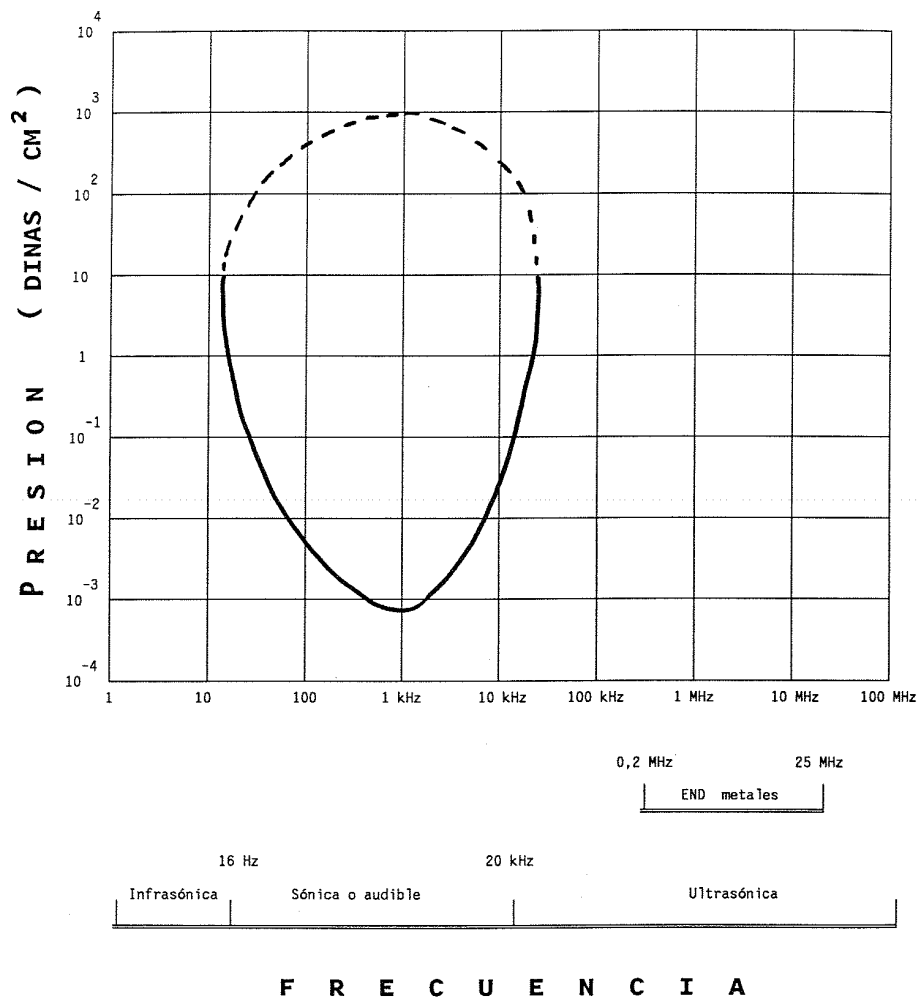
INTRODUCCIÓN

Los ultrasonidos se emplean en los ensayos no destructivos para detectar discontinuidades tanto en la superficie como en el interior de los materiales, sin producir en estos deterioro alguno.

Los ultrasonidos son una forma de energía vibrante que solo se diferencia del sonido perceptible por el oído humano en su frecuencia.

Se denominan ondas sonoras a aquellas vibraciones comprendidas entre 10Hz y 20000 Hz aproximadamente. A partir de los 20000 Hz comienzan los ultrasonidos.

Este límite se ha fijado de una forma arbitraria. Los ultrasonidos que se emplean en la verificación de materiales, tienen una frecuencia comprendida entre 0,25 MHz y 25 MHz.



APLICACIONES GENERALES

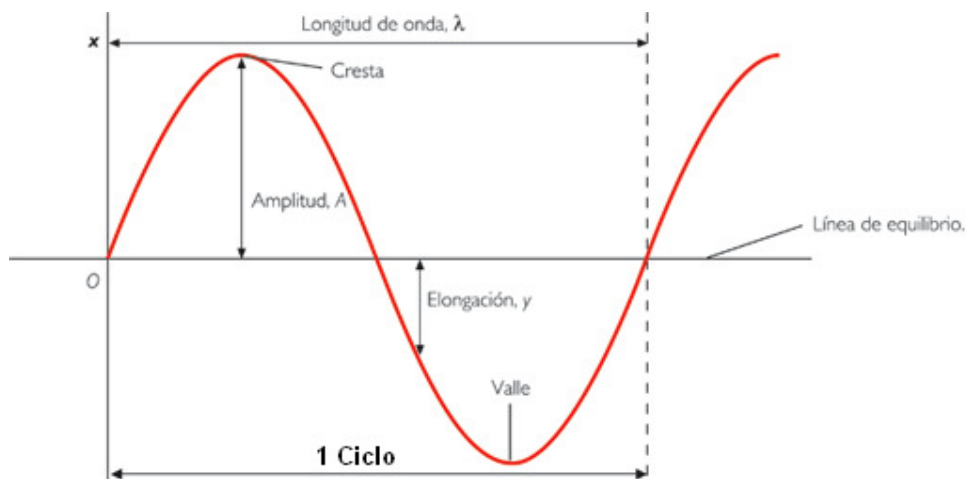
Los ultrasonidos además de utilizarse en los ensayos de materiales, tienen múltiples aplicaciones. Se utilizan para detectar objetos metálicos, para la limpieza de materiales, en medicina, etc.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS

Las ondas ultrasónicas debido a su pequeña longitud de onda, tienen unas características parecidas a las de la luz, por ello, se reflejan, se refractan, son absorbidas, se dispersan, etc.

Los parámetros que definen una onda ultrasónica son los siguientes:

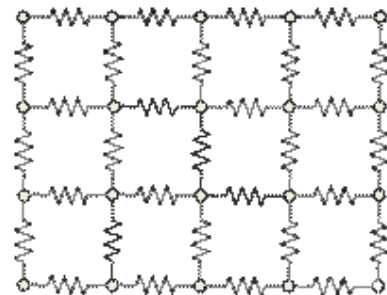
- **Frecuencia (f):** es el número de oscilaciones de una partícula por unidad de tiempo. Se mide en ciclos/segundo, igual a Hz.
- **Longitud de onda (λ):** es la distancia existente entre dos estados energéticos iguales y consecutivos en la onda. Se mide en mm.
- **Velocidad de propagación (c):** es la velocidad con que las partículas pasan de un estado de compresión a un estado de expansión. Se mide en m/s.
- **Amplitud (A):** es el desplazamiento de las partículas de su posición de reposo. Se mide en mm. La máxima amplitud se denomina elongación.
- **Ciclo:** un ciclo lo constituye una secuencia completa del movimiento de la partícula desde su posición de reposo, cuando pasa a un estado de movimiento y vuelve a su posición original de reposo.
- **Periodo (T):** es la inversa de la frecuencia, $T = 1/f$. La ecuación que relaciona la velocidad de propagación con la longitud de onda y la frecuencia es $c = \lambda \cdot f$.



PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS

La materia se compone de pequeñas partículas unidas entre sí por una fuerza elástica, por lo tanto es factible un movimiento de dichas partículas a partir de su posición fija.

Si se empuja una partícula, ésta comienza a vibrar y transmite su energía a las partículas vecinas. La energía se propaga a

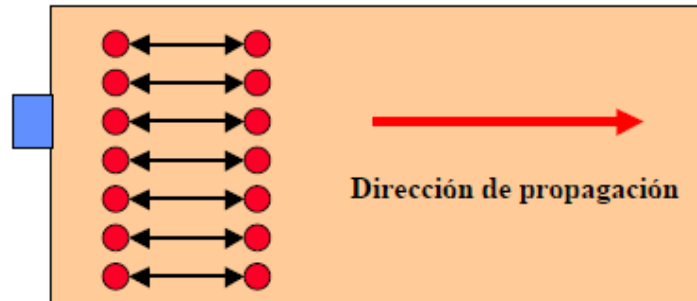


través de las partículas individuales por la materia.

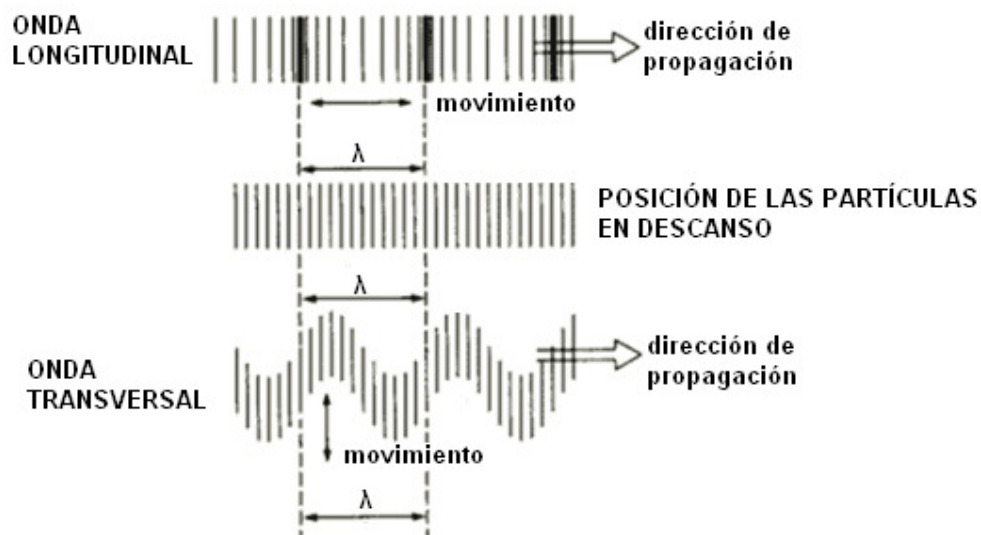
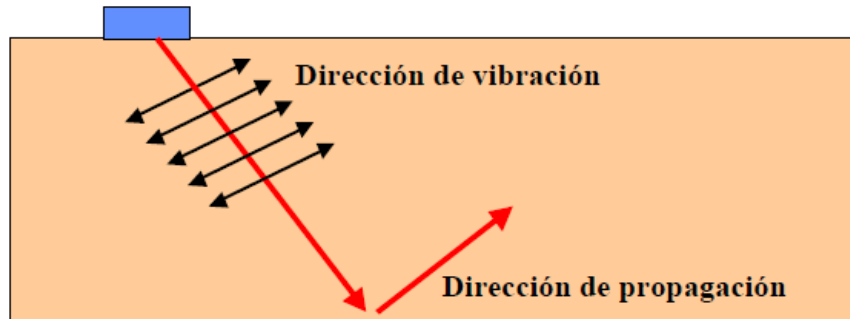
TIPOS Y FORMAS DE ONDAS

Las ondas que normalmente se utilizan para la inspección por ultrasonidos, son las siguientes:

- **Onda longitudinal:** la dirección de propagación del sonido es paralela a la del movimiento de las partículas.



- **Onda transversal:** también llamada "onda de cizalladura". No se propaga en los fluidos, porque éstos tienen un coeficiente de cizalladura muy bajo. En la onda transversa, la dirección de propagación del sonido es perpendicular a la del movimiento de las partículas.



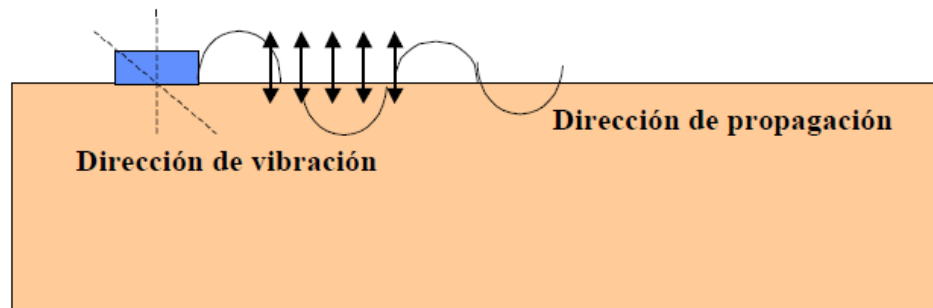
- **Onda superficial:** se puede considerar como una combinación de las dos anteriores.

Las ondas superficiales pueden ser de Rayleigh o de Lamb.

Las ondas de Rayleigh se propagan por la superficie del material siguiendo una órbita elíptica. Su penetración es casi igual al valor de la longitud de onda, mientras que su velocidad de propagación es ligeramente inferior que la de la onda transversal.

Cuando la vibración es transmitida en un material delgado que puede ser una chapa, entonces se produce la onda de Lamb.

Esta onda puede ser simétrica o asimétrica. Se diferencia de la onda de Rayleigh, transversal y longitudinal, en que su velocidad de propagación no sólo depende del material que tiene que atravesar, sino también de la frecuencia, el ángulo de incidencia y el espesor de la chapa. Además su utilización sólo es posible en chapas de pequeño espesor.

**TRANSMISIÓN DEL ULTRASONIDO A LA PIEZA A VERIFICAR**

La energía transmitida a una pieza puede ser pulsante o continua.

Cuando la energía se introduce en la pieza a examinar a intervalos muy pequeños, del orden de microsegundos, se dice que la transmisión es pulsante. Por el contrario, cuando la emisión se produce sin interrupción, se dice que la transmisión es continua.

VELOCIDAD DE LAS ONDAS EN LOS MATERIALES

Las ondas ultrasónicas viajan a través de los materiales a una velocidad constante, que se denomina “velocidad de propagación”. La velocidad de propagación es una constante del material. Ahora bien, dentro de un mismo material cada tipo de onda tiene una velocidad de propagación distinta, por ejemplo, la velocidad de propagación de la onda longitudinal en el acero es de 5900 m/s y la de la onda transversal, también en el acero es de 3230 m/s.

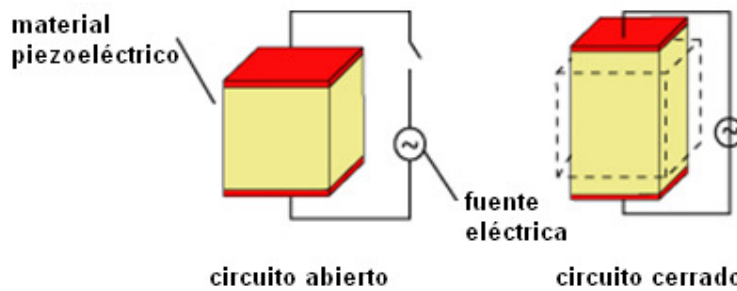
Si recordamos la fórmula que nos relacionaba la velocidad de propagación (c), la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f), $c = \lambda \cdot f$, vemos que al ser la velocidad de propagación constante, la longitud de onda dependerá de la frecuencia; $\lambda = c/f$. Conforme aumentamos la frecuencia, disminuye la longitud de onda.

GENERACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

Antiguamente las ondas ultrasónicas se generaban por el denominado efecto magnetostrictivo.

En la actualidad las ondas se generan por el efecto piezoeléctrico. Algunos materiales, cuando son cortados bajo determinados planos cristalográficos, cambian su forma cuando se les aplica una tensión eléctrica.

Si aplicamos una tensión continua a una plaquita de material piezoeléctrico, ésta se contraerá o dilatará, dependiendo de que la polaridad de la tensión sea positiva o negativa.



Si en cambio aplicamos una corriente alterna, la plaquita se contraerá y dilatará con la frecuencia de la tensión que apliquemos. Esto produce una vibración en el cristal, que genera ondas ultrasónicas.

A la plaquita piezoeléctrica se le denomina “transductor”. El transductor tiene la propiedad de que cuando es sometido a una presión de sonido, genera una pequeña tensión eléctrica. A estos fenómenos se los conoce con el nombre de “piezoeléctricos”.

Existen varios materiales piezoeléctricos que pueden ser utilizados para la construcción de transductores. Cada uno de ellos tiene distintas características y en cada caso se escogerá aquel que mejor se adapte a las condiciones del ensayo. Los más utilizados, junto con sus ventajas e inconvenientes son:

- **Cuarzo:** estabilidad, homogeneidad, dureza y resistencia al desgaste elevadas, resiste bien la temperatura, pero es un mal emisor. Muy utilizado para la producción de frecuencias altas.
- **Sulfato de litio:** tiene baja impedancia acústica lo que le proporciona una buena amortiguación y capacidad de acoplamiento. Es el mejor receptor, pero tiene baja resistencia a las temperaturas.
- **Titanato de bario:** es el mejor emisor, pero tiene una impedancia acústica elevada. Restringido a frecuencias inferiores a 15 MHz.
- **Metaniobato de plomo:** es un buen emisor y resiste bien la temperatura. Es el mejor material para generar impulsos cortos, lo que le da un excelente poder de resolución.

ATENUACIÓN

El término atenuación se utiliza para definir la pérdida de energía que sufre el haz ultrasonoro cuando atraviesa un determinado material.

La atenuación es función de la naturaleza del elemento que es atravesado por el haz.

IMPEDANCIA ACÚSTICA

La impedancia acústica (Z) es la resistencia que opone un material al ser atravesado por un haz ultrasonoro.

REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN

Si el haz ultrasonoro atraviesa dos materiales de diferente impedancia acústica, al llegar a la superficie de separación de ambos materiales (interfase), parte de él se refleja y parte pasa.

Si las impedancias acústicas de ambos materiales son muy parecidas, la mayor parte del haz pasará de un material al otro, mientras que una pequeña parte es reflejada. Si por el contrario, los valores de ambas impedancias acústicas son muy distintos, una pequeña parte del haz pasa de un material al otro, mientras que la mayor parte es reflejada.

Si colocamos el transductor directamente sobre una pieza de acero, no podemos evitar que quede una película de aire entre el transductor y la superficie de la pieza.

Al ser la impedancia acústica del acero de un valor elevado y la del aire muy baja, casi todo el haz es reflejado, con lo que sólo conseguimos introducir en la pieza una ínfima cantidad de energía ultrasónica.

Si colocamos un material entre el transductor y la superficie de la pieza de acero que tenga una fluidez suficiente como para desplazar el aire de la interfase y que tenga una impedancia acústica más parecida a la del acero, conseguiremos introducir una mayor cantidad de energía ultrasónica en la pieza. Este material se denomina “acoplante”.

Como acoplante se puede utilizar agua, aceite, resina, grasa, pasta, etc.

PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

Existen tres procedimientos fundamentales para el ensayo de materiales por ultrasonidos, dentro del campo de los ensayos no destructivos, estos procedimientos son:

- a) Procedimiento de impulsos y sus ecos
- b) Procedimiento de transmisión
- c) Procedimiento de resonancia

A continuación se desarrollan los dos primeros.

Procedimiento De Impulsos Y Sus Ecos

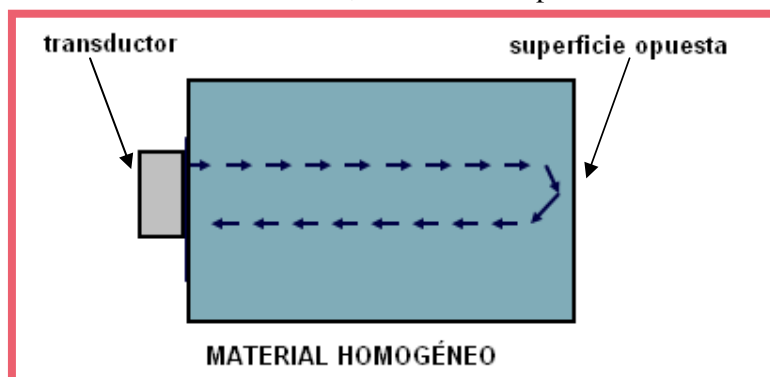
Este procedimiento se basa en la introducción, dentro de la pieza a examinar, de impulsos cortos de ondas ultrasonoras uniformemente distribuidas en el tiempo. Estos impulsos son reflejados en las discontinuidades de los materiales cuya orientación sea normal a la dirección de propagación de los impulsos.

En este procedimiento se utilizan uno o dos transductores. Cuando se utiliza un solo transductor, éste funciona alternativamente como emisor y como receptor. Cuando se utilizan dos transductores, uno funciona como emisor y el otro como receptor, pero los dos constituyen un bloque único.

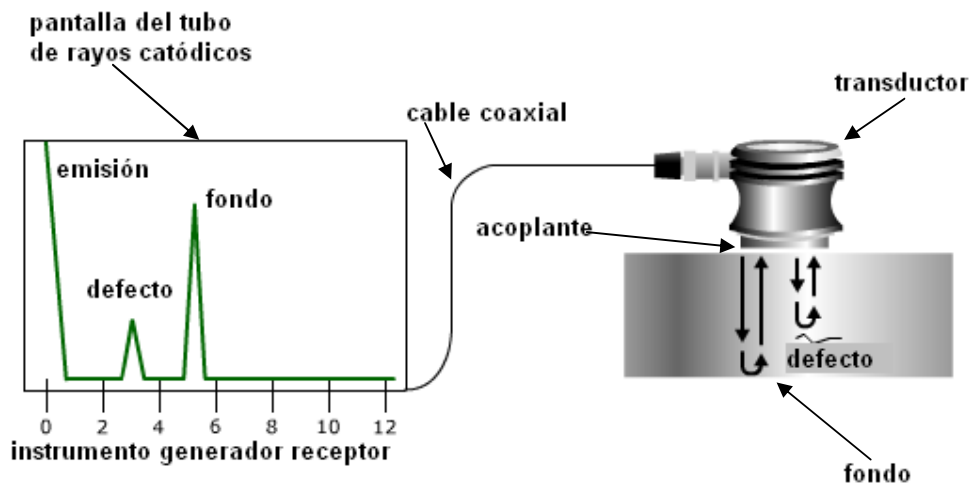
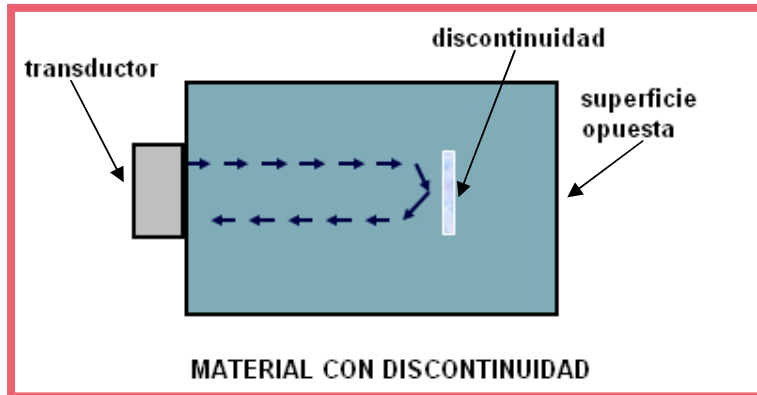
Mediante los impulsos que son reflejados, podemos conocer la dimensión relativa de las discontinuidades y su situación.

El transductor emisor recibe una señal eléctrica y la transforma en ultrasónica. El transductor receptor recibe los impulsos ultrasonoros reflejados y los transforma en una señal eléctrica. Esta señal eléctrica se puede reproducir en la pantalla de un tubo de rayos catódicos.

Cuando un impulso es introducido dentro de una pieza, si ésta está constituida por material homogéneo, atravesará todo el material hasta llegar a la superficie opuesta del lado del transductor donde existe una interfase, material de la pieza-aire.



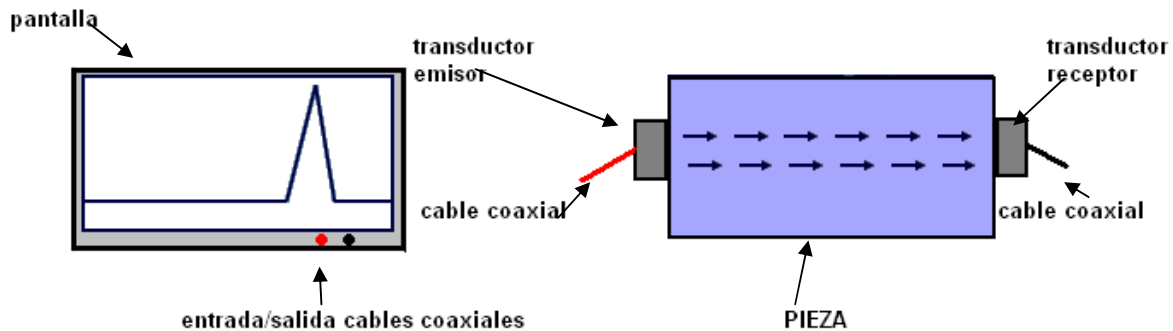
Si por el contrario, la pieza tiene alguna discontinuidad, al tener una impedancia acústica distinta de la del material de la pieza, constituye una interfase y por lo tanto el impulso es reflejado en la discontinuidad antes de llegar a la superficie opuesta.



Procedimiento De Transmisión

Este procedimiento se utiliza casi exclusivamente en instalaciones automáticas. Cuando la inspección hay que hacerla manualmente se utiliza el procedimiento de impulsos y sus ecos.

En este procedimiento la pieza se sitúa entre dos transductores, uno emisor y otro receptor. El transductor emisor recibe una señal eléctrica y la transforma en ultrasónica y el receptor recibe una señal ultrasónica y la transforma en eléctrica (piezoefecto).

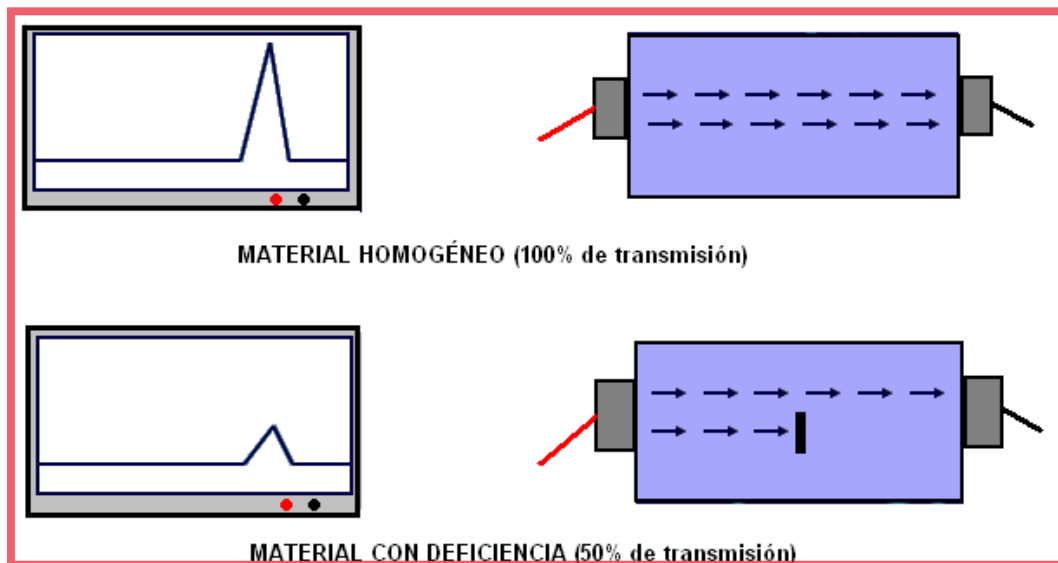


Si la pieza que estamos verificando está compuesta de un material homogéneo, el instrumento de medición receptor señalará, al menos teóricamente, el 100% de la energía emitida.

Si existe una deficiencia en la pieza, ésta tendrá una composición diferente de la del material que estamos verificando y por lo tanto, diferente impedancia acústica. Al existir dos materiales de

diferente composición, tenemos una interfase y por lo tanto, parte de la energía que llegue a la superficie de la deficiencia (interfase) se reflejará.

En este caso, el instrumento de recepción señala una transmisión menor del 100%.



Mientras que en el procedimiento de impulsos y sus ecos, la cantidad de energía ultrasónica reflejada, nos aportaba los datos necesarios para establecer el estado de la pieza, en el procedimiento de transmisión, realizamos la medida de la energía que es transmitida a través de la pieza.

El procedimiento de transmisión utiliza normalmente onda pulsante, aunque también puede utilizar onda continua.

MÉTODOS DE ENSAYO

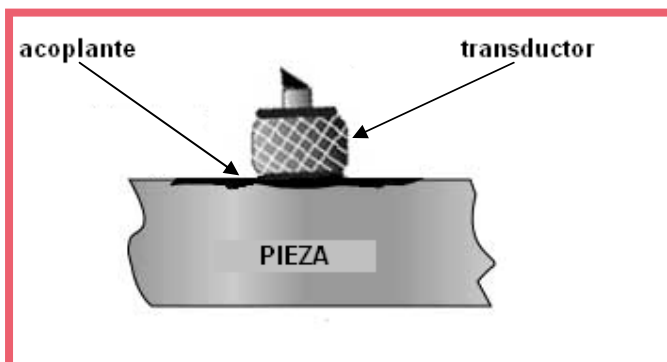
Los métodos de ensayo más comúnmente utilizados son:

- a) Método de contacto
- b) Método de inmersión

Método De Contacto

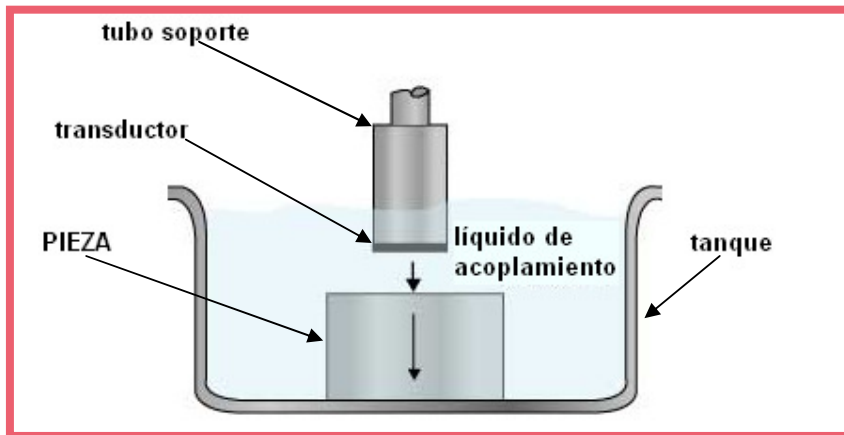
En el método de contacto, el transductor se acopla directamente con el material base por medio de una ligera capa de acoplante, que suele ser de naturaleza líquida o pastosa.

Este método se usa sobre todo en trabajos que se realizan a pie de obra, o bien cuando se inspeccionan piezas de grandes dimensiones.



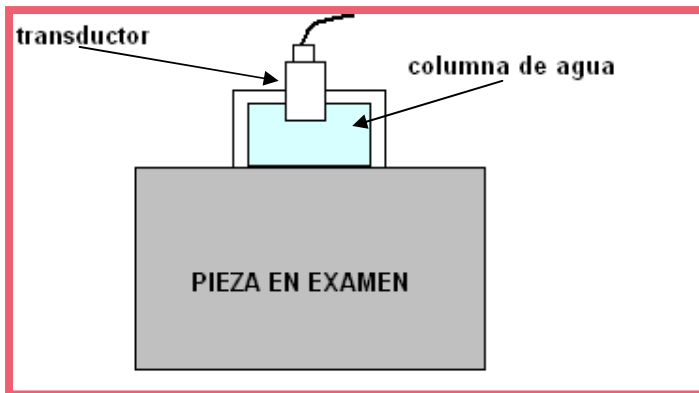
Método De Inmersión

En el método de inmersión la pieza a verificar y el transductor, se sumergen en un líquido de acoplamiento. La vibración ultrasonora se transmite a la pieza a través del líquido. El transductor no toca en absoluto a la pieza.



El líquido de acoplamiento generalmente es agua con algún aditivo.

En el caso de grandes piezas se suele utilizar un método, que aunque no es el método de inmersión propiamente dicho, se considera una variable del mismo, ya que es con el que más afinidades tiene. Este método consiste en la utilización de una columna de agua como acoplamiento.



REPRESENTACIÓN DE LOS ENSAYOS (A.S.T.M.)

Existen tres tipos de representación para poner en evidencia las características internas de las piezas examinadas. Estos tipos son:

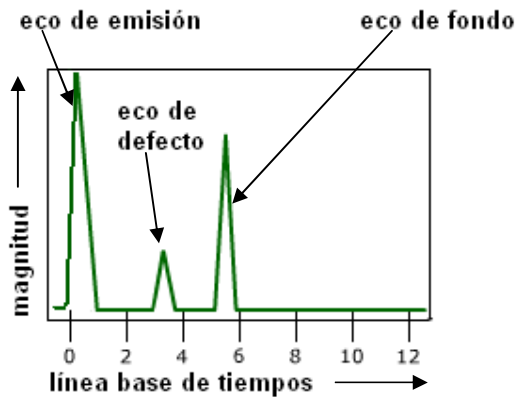
- a) Representación tipo A
- b) Representación tipo B
- c) Representación tipo C

En el siguiente apartado se detalla la Representación tipo A que es la más empleada en los ensayos no destructivos.

REPRESENTACIÓN TIPO A

La representación tipo A consiste en un sistema de coordenadas. En la abscisa está representado el tiempo que tarda el impulso ultrasónico en llegar a un determinado reflector y en la ordenada la magnitud de dicho impulso.

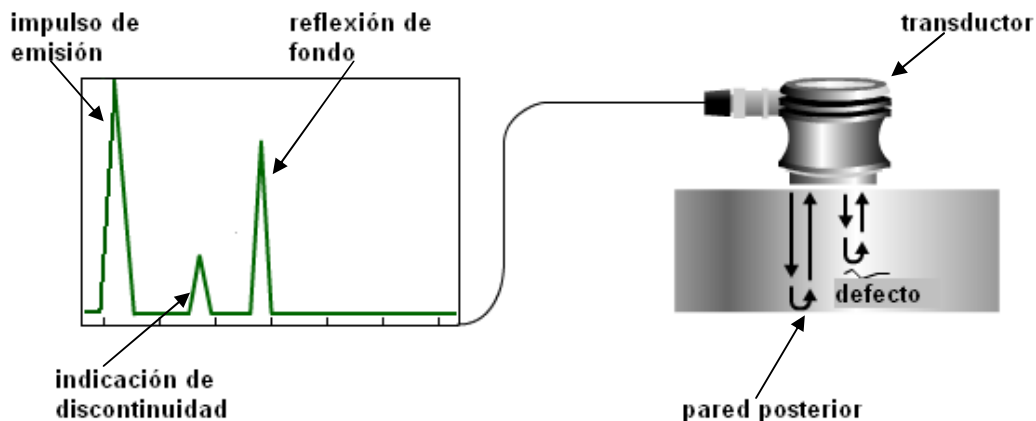
Por la posición del impulso ultrasónico (eco) y su magnitud, se puede determinar la profundidad de las discontinuidades y su .dimensión relativa.



Se puede hablar de una representación tipo A cuando se lee en la línea base de tiempos de la pantalla del tubo de rayos catódicos una indicación obtenida.

INTERPRETACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN TIPO A

En la siguiente figura se muestra lo que sucede cuando la onda ultrasónica atraviesa un material que contiene una discontinuidad, con la correspondiente representación en la pantalla.



La primera indicación (impulso de emisión), aparece a la izquierda de la pantalla y corresponde al recorrido previo del impulso ultrasónico desde el momento en que es emitido hasta que llega a la superficie de la pieza. La reflexión correspondiente a la pared posterior aparece a la derecha de la primera indicación. La discontinuidad aparece en un punto cualquiera comprendido entre el impulso de emisión y la reflexión de la pared posterior. En realidad, parte de la energía ultrasonora continua reflejándose en la pared anterior y posterior hasta que es absorbida o disipada en forma de calor. Estas reflexiones múltiples aparecen en la pantalla a la derecha de la primera reflexión proveniente de la pared posterior.

La altura del pico (reflexión vertical), representa la magnitud de la reflexión de la onda (eco).

Comparando la altura del eco correspondiente a la discontinuidad con la de una discontinuidad de dimensiones conocidas en un material similar que esté situada a igual distancia, se puede determinar la dimensión de la discontinuidad del material en examen.

La distancia entre el impulso de emisión y el eco de la discontinuidad y la distancia entre el impulso inicial y la reflexión correspondiente a la pared posterior (eco de fondo), son proporcionales al

tiempo empleado por la onda ultrasonora para atravesar el material y volver desde la discontinuidad, si existe, o desde la pared posterior.

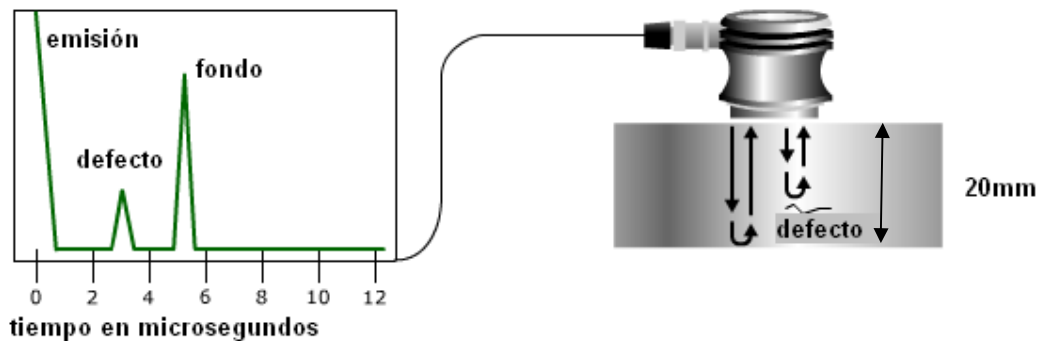
Como la velocidad de propagación de la onda ultrasonora a través de un material es una magnitud conocida y constante, de la fórmula $e = c.t$, se deduce lo anteriormente expuesto.

e = distancia entre el impulso de emisión y el reflector

c = velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material

t = tiempo empleado por la onda para recorrer e

Para mejor comprensión de lo anteriormente expuesto, observe la siguiente figura, en ella está representada la relación existente entre la distancia que hay desde el impulso de emisión, los reflectores y el tiempo empleado por la onda para recorrer dichas distancias.



Tenemos una pieza de acero de 20 mm de espesor y la onda tarda 5 microsegundos en recorrer los 20 mm. Si la onda tarda 2,5 microsegundos para alcanzar la discontinuidad, quiere decir que se encuentra a 10 mm de profundidad.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MÉTODO DE ULTRASONIDOS

Ventajas

- Elevada sensibilidad ($\lambda/2$).
- Poca dependencia de la geometría, bastando el acceso a una sola cara.
- Posibilidad de inspeccionar grandes espesores (metros de metal).
- Rapidez y resultado inmediato.
- Aparatos manuales y de poco peso.
- Ausencia de riesgos para el operador y personal alrededor.

Desventajas

- Naturaleza del material (impedancia acústica)
- Tipo de estructura interna (tamaño de grano, fases).
- Condición de la superficie.
- Mayor conocimiento y entrenamiento del personal.
- Falta de un documento objetivo de su ejecución.
- Interpretación relativa.