

Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata

DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA



CATEDRA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

(Revisión 2)

REVISADO Y REEDITADO
POR ESTEBAN A. TUJA
Mayo de 2006

Profesor Titular:	Ing. Aer. Dawid Gomplewicz.
Profesor Adjunto:	Ing. Aer. Claudio Rimoldi.
Ayudante (Dip):	Ing. Aer. Laura Rubio.
Ayudante (AI):	Srta. María de la Paz Alonso.
Colaborador (AH):	Sr. Fernando Cordisco.
Colaborador (AH):	Sr. Esteban Tuja.

ADVERTENCIA

La exposición excesiva a los rayos X o gamma es **extremadamente perjudiciales para la salud de las personas**; siendo más peligrosas cuanto menor sea la longitud de onda de las mismas y cuanto mayor sea la intensidad de la fuente. Si bien los equipos de radiografía están diseñados para minimizar los peligros que implica la exposición a las radiaciones directas o indirectas, se deben observar ciertas precauciones.

Los equipos, materiales y productos de radiografía industrial deben ser operados únicamente por personal especialmente entrenado en el uso y cuidado de material radiactivo y se debe evitar en todos los casos la exposición de las personas a los rayos.

Además de un completo conocimiento de los equipos empleados, deben seguirse en todo momento las instrucciones de los fabricantes de los mismos.

Se deberán observar en todo instante las medidas de seguridad para la protección tanto de los operadores de los equipos como de los terceros que pudieran estar presentes en las inmediaciones. El uso de alarmas y/o acordonados de seguridad y el cuidado de las distancias mínimas de seguridad resultan imprescindibles para evitar la exposición accidental a las radiaciones.

El uso de dosímetros personales, así como de radiómetros, alarmas sonoras, el adecuado vallado y blindaje, son de suma importancia para controlar las tasas de dosis de radiación recibidas tanto por el operador como por el público.

Además de las buenas prácticas, será necesario cumplir con las leyes nacionales, provinciales y locales.

En la República Argentina, el uso con fines profesional de radiaciones ionizantes, tales como las empleadas en las inspecciones por rayos X o gamma, está regulado por la Secretaría de Estado de Salud Pública de la Nación y por la Comisión Nacional de Energía Atómica, en el marco legal establecido por la **Ley N° 19.587** (Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo) y su **Decreto Reglamentario N° 351/79**, más las disposiciones complementarias especificadas en:

- **Decreto N° 842/58** (Reglamento para el uso de Radioisótopos y Radiaciones Ionizantes);
- **Ley N° 21.664** (Convenio sobre la protección de los trabajadores contra las radiaciones ionizantes);
- **Ley N° 17.557** (Disposiciones para la instalación y utilización de equipos específicamente destinados a la generación de rayos X); y su **Decreto Reglamentario N° 6.320/68**.

Las medidas de prevención y seguridad propias de cada método exceden los alcances del presente trabajo, cuyo fin es brindar la información básica acerca del uso industrial de las técnicas radiográficas. Sin embargo ponemos especial énfasis en el hecho que **es obligación del Ingeniero conocer los riesgos que implica el uso de las técnicas de inspección no destructiva de radiografía industrial**.

----- X -----

ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR EL MÉTODO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL

1º) Generalidades:

La radiografía industrial es un método de ensayo no destructivo que permite la detección de discontinuidades tanto superficiales como internas en piezas de prácticamente todos los materiales empleados en la industria. Es una técnica tremendamente versátil, permitiendo radiografiar objetos de todos los tamaños (desde los componentes electrónicos microscópicos hasta componentes de la industria pesada) y de prácticamente todos los materiales conocidos; ya sean fabricados por forjados, fundiciones, mecanizados, laminados, compuestos, etc, y por separado o bien como parte de un conjunto de piezas ensamblado.

Mediante el uso de radiaciones de alta penetración, tales como las usadas en las técnicas de rayos X y gamma (no ocasionan daños a la pieza inspeccionada), la radiografía proporciona un registro visual permanente sobre una película sensible (debidamente procesada luego de la exposición) acerca de las condiciones que presenta la pieza inspeccionada. En muchos casos resulta de suma utilidad para observar lo que ocurre en el interior de un elemento sin necesidad de desarmarlo o destruirlo.

2º) Naturaleza y principio de funcionamiento del método:

La inspección radiográfica mediante rayos X o gamma aprovecha las capacidades de penetración de las radiaciones electromagnéticas ionizantes y su efecto fotoquímico sobre películas sensibles (u otros medios sensibles a éstas) para examinar el interior de los objetos. La información que una radiografía puede brindar acerca de un objeto depende principalmente de tres factores, a saber:

- a. La composición del objeto.
- b. La densidad del material y el espesor del objeto.
- c. La energía de los rayos X o gamma que inciden sobre el objeto.

Los rayos X y gamma son formas de radiación electromagnética, al igual que la luz visible, la luz ultravioleta, la radiación infrarroja, las micro ondas y las ondas de radio. Todo este conjunto de formas de radiación conforman el “espectro electromagnético”.

Los rayos empleados en la radiografía industrial son aquellos que presentan las menores longitudes de onda, lo que les confiere la capacidad de ser altamente penetrantes en la materia. Las radiaciones empleadas son además del tipo ionizantes, esto es, tienen la propiedad de producir iones al interactuar con la materia (desequilibrio eléctrico por desplazamiento de electrones).

Tabla 1:
Radiación electromagnética

	λ m		
	10 km	10^4	<div style="border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;">ondas de radio</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;">radiación calorífica</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;">radiación infrarroja</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;">luz visible; U.V.</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;">rayos Grenz</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;">rayos X</div> <div style="border-bottom: 1px solid black; margin-bottom: 5px;">rayos gamma</div>
	1 km	10^3	
	100 m	10^2	
	10 m	10^1	
	1 m	1	
	10 cm	10^{-1}	
	1 cm	10^{-2}	
	1 mm	10^{-3}	
	100 μ m	10^{-4}	
	10 μ m	10^{-5}	
	1 μ m	10^{-6}	
	100 nm	10^{-7}	
	10 nm	10^{-8}	
	1 nm	10^{-9}	
	0,1 nm	10^{-10}	
	0,01 nm	10^{-11}	
	0,001 nm	10^{-12}	
	1 X	10^{-13}	
	0,1 X	10^{-14}	
	0,01 X	10^{-15}	

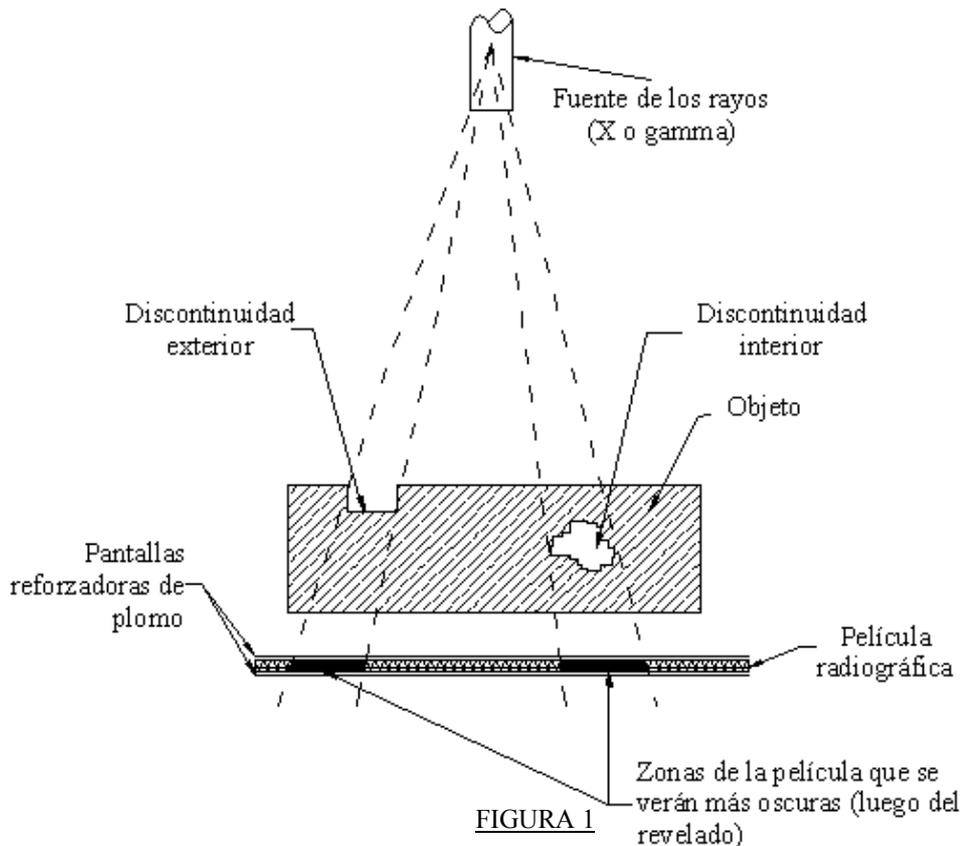
Energía de rayos X

100 eV	
1 keV	
10 keV	
100 keV	
1 MeV	
10 MeV	
100 MeV	

Las principales propiedades de estas radiaciones son las siguientes. Nótese que muchas de ellas son similares a las de la luz.

- Se propagan en línea recta y a la velocidad de la luz.
- Producen, en ciertas sustancias, fluorescencia y fosforescencia.
- Tienen acción sobre emulsiones fotográficas.
- No son afectados por campos eléctricos o magnéticos.
- No pueden ser desviados por lentes o prismas, pero si por medio de una red cristalina (difracción).
- Las longitudes de onda son muchísimo menores que las del espectro de la luz visible:
 - Luz visible: 3.900 a 7.700 Å.
 - Rayos X: 5 a 0,01 Å.
 - Rayos Gamma: 0,01 a 0,005 Å.
- Atraviesan la materia, dependiendo su penetración de la naturaleza de la materia y de la energía de los rayos.
- Pueden, como la luz, producir fenómenos de interferencia, polarización y difracción.
- Pueden **deteriorar o destruir las células vivas y provocar alteraciones genéticas o cromosómicas**.
- No son visibles ni pueden ser detectados por **ninguno de nuestros sentidos** (su presencia solo puede ser advertida mediante el uso de equipos detectores especiales). Esto, junto a la propiedad anterior, constituye el mayor factor de riesgo del uso de radiaciones ionizantes.

Desde el punto de vista de la aplicación del método, su propiedad más importante consiste en el hecho que estas radiaciones SON ABSORBIDOS POR LA MATERIA de MANERA DISTINTA para cada material. La absorción es directamente proporcional a la densidad y espesor del cuerpo irradiado (e inversamente proporcional a la energía del rayo). Esta propiedad, llamada "ABSORCIÓN DIFERENCIAL" nos dará las bases del método. La figura siguiente muestra un esquema de la aplicación del método.



Una discontinuidad en el material, tal como un hueco, una fisura, o un cambio de forma modificará el espesor efectivo del material y cambiará por consiguiente el grado de absorción de la radiación en dicha zona. Dado que toda la radiación que no se absorbe o dispersa en el material es transmitida, la cantidad de radiación transmitida será función de los cambios localizados que presente el espesor efectivo del material. El efecto de la intensidad de la radiación transmitida (emergente del material) sobre una película (o film) sensible es la que se aprovechará para detectar las discontinuidades o defectos.

Si en la figura anterior, en lugar de un hueco hubiese una inclusión de un material diferente, se tendría también un cambio en la composición aparente del material y por consiguiente, un cambio en la intensidad de la radiación transmitida en esa zona, permitiendo eventualmente su detección.

En resumen: La técnica de radiografía industrial satisface los requisitos primarios de toda inspección no destructiva, a saber:

- a- **MÉTODO:** Se tiene una forma de energía (radiación ionizante) que puede ser producida y aprovechada de manera controlada.
- b- **TRANSFORMACIÓN:** Esta forma de energía es capaz de interactuar con el material a ser inspeccionado (penetración y absorción total o parcial) de manera tal que se producen cambios en la forma de energía, pero no en el material.
- c- **DETECCIÓN e INTERPRETACIÓN:** Luego de dicha interacción, los cambios sufridos por la forma de energía pueden ser detectados e interpretados para observar la condición que presenta el material (efecto fotoquímico sobre la película sensible a las radiaciones).

3°) Obtención de los rayos

La diferencia entre los rayos gamma y los rayos X radica en la forma de obtención de los mismos y no en su naturaleza.

- Rayos X:

Los rayos X son producidos por un artefacto eléctrico: el tubo de rayos X. Si bien existen tubos de varios tipos, en líneas generales consisten en una ampolla de vidrio al vacío en cuyo interior se disponen los elementos necesarios para la generación de los rayos. Estos se generan cuando una corriente de electrones de altísima velocidad proveniente del “cátodo” es desacelerada bruscamente por impacto contra el “ánodo”.

Así, para producir rayos X se necesitan:

- a) Fuente de electrones.
- b) Placa de material para que esos electrones choquen.
- c) Medio para acelerar y controlar dichos electrones.

a) El suministro de los electrones necesarios para la generación de rayos X se obtiene fácilmente por calentamiento de un material adecuado. El cátodo es un filamento de tungsteno por el cual circula una corriente eléctrica de algunas milésimas de ampere (CORRIENTE DE TUBO) generada por una fuente de bajo voltaje, con el fin de calentarlo hasta ponerlo al rojo.

A medida que la temperatura del filamento aumenta, los electrones (del material con que está construido) se agitan cada vez más, hasta que finalmente escapan del material, formando una “nube de electrones” a su alrededor. Esta nube de electrones permanecerá en

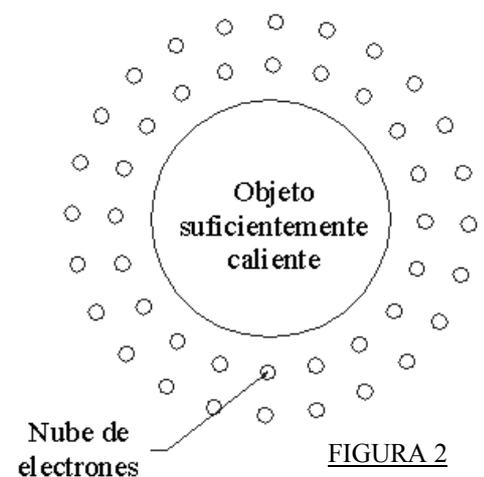


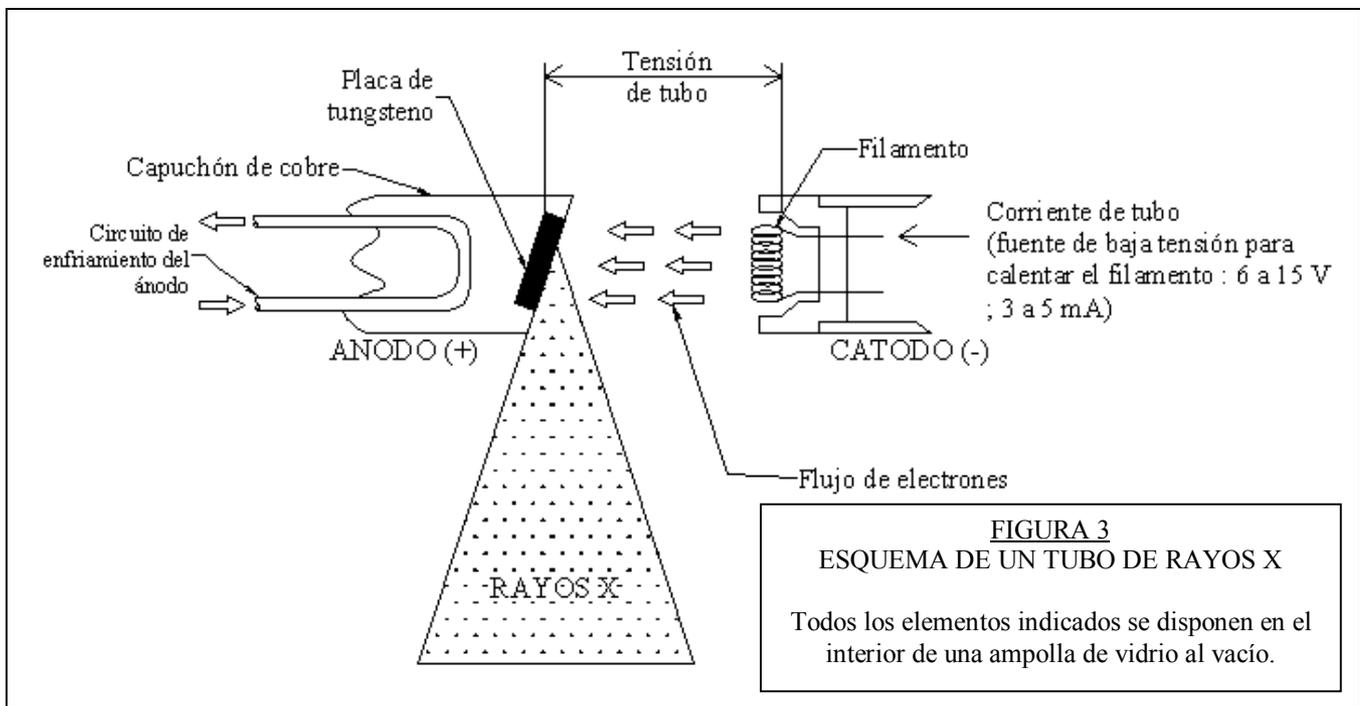
FIGURA 2

movimiento alrededor del filamento, a menos que una acción externa los arranque de sus órbitas obligándolos a migrar hacia otro sitio.

b) Enfrentando al cátodo se encuentra el ánodo (también denominado anticátodo), hecho de un metal de alto punto de fusión. Sobre este elemento se harán chocar los electrones provenientes del cátodo.

c) Para acelerar los electrones de la nube catódica hacia el ánodo se aplica una diferencia de potencial de varios miles de voltios entre cátodo y ánodo (TENSIÓN DE TUBO), siendo este último el elemento de valor positivo. Así, los electrones serán atraídos hacia la placa anódica de tungsteno a gran velocidad. La aceleración de los electrones debe ser realizada bajo condiciones de vacío, pues de lo contrario, la colisión con las moléculas de aire originaría grandes pérdidas de energía.

Cuando el haz de electrones acelerado choca contra la placa de tungsteno del ánodo, se producen ciertas perturbaciones atómicas en este material que dan lugar a la emisión de rayos X, además de la emisión de luz, muchísimo calor. El ánodo está constituido por una placa de tungsteno, el cual posee un alto punto de fusión ($\sim 3300^{\circ}\text{C}$), relativamente buena conductividad térmica y elevado número atómico (la producción de rayos X es proporcional al número atómico del material del ánodo).



Como regla general, podemos enunciar los siguientes principios:

1) A mayor temperatura de filamento, mayor emisión de electrones, lo cual implica mayor corriente de tubo; por ende: LA SALIDA DE RAYOS X ES PROPORCIONAL A LA CORRIENTE DE TUBO. Esta corriente de tubo del equipo es controlada por un dispositivo que regula la corriente de calentamiento suministrada al filamento.

2) A mayor tensión de tubo, mayor será la velocidad de los electrones que impactan contra la placa de tungsteno del ánodo. El resultado es una menor longitud de onda de los rayos X emitidos por el aparato y por ende una mayor penetración de los mismos. Los rayos X generados con las mayores tensiones de tubo posibles (menores longitudes de onda) son usados para la penetración de materiales de grandes espesores y/o densidades más elevadas.

Detalle operativo de los tubos de rayos X de uso industrial:

De toda la energía disponible en el tubo, solamente un 2% se transforma en rayos X. Del resto, aproximadamente un 5 a 8% se transforma en luz visible (que queda confinada en el interior del aparato), y el porcentaje restante (más de un 90%) en calor, provocando el calentamiento del ánodo en la zona de impacto del haz de electrones al rojo blanco. Dado que en radiografía industrial suelen usarse tiempos de exposición muy prolongados (varios minutos), el tubo de rayos X debe ser refrigerado de alguna manera. Es por ello que para mejorar la conductividad térmica del ánodo, la placa de tungsteno se monta sobre una pieza de cobre que por poseer buena conductividad térmica facilitará la refrigeración del ánodo mediante la circulación de agua, aceite o aire.

Interrumpiendo la alimentación eléctrica el dispositivo cesa toda emisión de radiación.

- Rayos Gamma:

A diferencia de los rayos X, los rayos gamma no son generados por ningún artefacto, sino que provienen de la desintegración del núcleo de los átomos de un material radioactivo. Los materiales o sustancias radioactivas son aquellas que espontáneamente emiten radiaciones alfa, beta o gamma. Las fuentes usadas en radiografía industrial son radioisótopos artificialmente producidos por bombardeo de un elemento estable adecuado con exceso de neutrones en el interior de un reactor nuclear. A este se lo conoce como “proceso de activación”.

La calidad (longitud de onda o energía o poder de penetración) e intensidad de estos no pueden ser controlados por el operador y solo son función de la materia radioactiva de la fuente. Al igual que los rayos X, los gamma pueden ser interceptados por materiales absorbentes. Las longitudes de onda de los rayos gamma son inferiores a las de los rayos X, por lo que son más penetrantes. Sin embargo, las radiografías de mejor contraste y definición se obtienen con rayos X de bajo voltaje de tubo.

La actividad de una fuente es la expresión de la velocidad de desintegración de un radioisótopo y su unidad natural de medición es la “Desintegración por segundo”, que en el sistema internacional recibe el nombre de “Bequerelio” (Bq). Sin embargo, dado que un Bq resulta ser una cantidad de actividad muy pequeña suele usarse por practicidad la unidad antigua, el Curie (Ci), que equivale a 37.000 millones de desintegraciones por segundo. (1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq = 37 GBq).

Las fuentes de rayos gamma se pueden obtener con diferentes valores de actividad (típicamente entre 1 y 100 Ci) y esto se logra agrupando mayor o menor cantidad de pastillas de material radiactivo dentro de una cápsula sellada. Por ello se las denomina “fuentes selladas”.

Las fuentes de rayos gamma van perdiendo gradualmente su actividad a lo largo del tiempo. Se caracterizan por la denominada “vida media” ($t_{1/2}$), siendo esta el tiempo que tarda la actividad de una fuente en reducirse a la mitad del valor inicial. La actividad de una fuente puede ser determinada para cualquier momento a partir del momento de su activación, según la siguiente expresión:

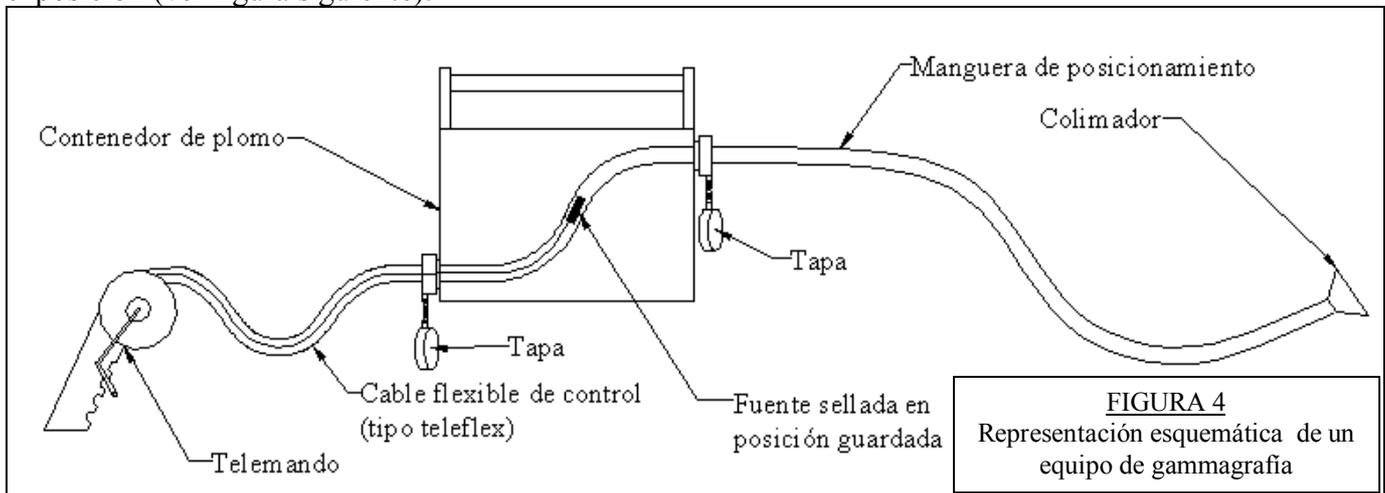
$$A = A_0 / (2^n) \quad ; \quad \text{con } n = t / t_{1/2} \quad ; \quad \text{donde:}$$

A = actividad de la fuente en el momento actual (a determinar).
A₀ = Actividad inicial de la fuente.
t = tiempo transcurrido desde la actividad inicial.
t_{1/2} = vida media del radioisótopo de la fuente.

Las fuentes más usadas en radiografía industrial con rayos gamma son producidas artificialmente y son los radioisótopos de tulio 170, iridio 192, cesio 137 y cobalto 60, con vidas medias de 127 y 74 días, 26,6 y 5,3 años respectivamente.

ADVERTENCIA: aún cuando una fuente radiactiva pueda ser considerada agotada para su uso en radiografía industrial, seguirá emitiendo radiaciones **altamente peligrosas para las personas**. Estas fuentes gamma “agotadas” deben ser tratadas como **elementos radioactivos peligrosos por personal especialmente habilitado para ello (CNEA)**.

La aplicación de la técnica radiográfica con rayos gamma es equivalente a la de los rayos X, a diferencia que el equipo de gammagrafía no requiere de alimentación externa alguna. La fuente radiactiva utilizada se encuentra encerrada en un contenedor de plomo y se desliza dentro de un conducto curvado convenientemente, de modo de asegurar que la radiación no escape de él mientras no se lo esté usando. Para realizar la exposición se abre una tapa y a través de una manguera flexible, es posible llevar la fuente radiactiva hasta el lugar donde se desea tener el foco durante el tiempo requerido. Esto se realiza mediante el accionamiento de un telemando que por lo general es mecánico y de accionamiento manual (tipo “teleflex”) que empuja la fuente fuera del contenedor. En el extremo de la manguera suele colocarse un “colimador”, cuya finalidad es la de solo permitir la emisión de los rayos hacia la dirección donde está la película y evitar irradiar el resto del entorno de trabajo. Transcurrido el tiempo de exposición, el mismo telemando se acciona de manera inversa para volver a meter la fuente sellada dentro del contenedor, donde permanecerá almacenada hasta la próxima exposición (ver figura siguiente).



Una vez realizada la exposición (al igual que con rayos X) se revela e interpreta la radiografía obtenida.

En lo sucesivo nos referiremos principalmente a la técnica de rayos X por ser la más utilizada en la industria aeronáutica, pero es bueno recordar que salvo por la generación y el control de la radiación, son técnicas similares.

4º) Energía, calidad e intensidad de radiación:

Energía y Calidad de rayos X:

La energía de un rayo X o gamma es una medida de su capacidad de penetración de la materia. Se la denomina también como “calidad” de radiación y viene dada por la longitud de onda del rayo producido. A menor longitud de onda, mayor energía (mayor calidad de rayo):

$$Q = h \cdot c / \lambda \quad ; \quad \text{donde:}$$

$$h = \text{cte. De Planck} = 6,623 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{seg}$$

$$c = \text{velocidad de la luz}$$

$$\lambda = \text{longitud de onda.}$$

Para el caso de los rayos X, la penetración es controlada por la tensión de tubo: a mayor tensión de tubo, menor longitud de onda. ($\lambda = 12.400 / V$ [Å]), y por lo tanto, mayor poder de penetración.

Por practicidad, la energía de los rayos X y gamma se expresa en miles o en millones de electrón Volt (ver Tabla 1), siendo 1 eV la energía ganada por un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio. Si bien la energía de los rayos gamma no es debida a la aceleración de electrones en el tubo, se establece la equivalencia basada en la igualdad de la longitud de onda, de modo que una fuente gamma de 1MeV tendrá la misma energía que un rayo X generado en un tubo con una tensión de 1000kV.

Si bien, en general las longitudes de onda de los rayos gamma son menores que la de los rayos X que se pueden obtener con la mayoría de los equipos de Rayos X (limitados por la tensión de tubo máxima que pueden alcanzar), esta alta energía de penetración da como resultado imágenes menos contrastadas y son por ello menos sensibles y más difíciles de interpretar (brindan menos información). El uso de rayos gamma solo se justifica en la inspección de materiales de muy alta densidad y/o espesores elevado (industria metalúrgica pesada).

Intensidad (o cantidad) de radiación

Se denomina así a la cantidad de energía que pasa por la unidad de área (en dirección normal a la de propagación) en la unida de tiempo (medida en Roentgen por segundo, por minuto o por hora).

En un punto dado del espacio, la intensidad de radiación proveniente de una fuente de rayos X depende directamente de la corriente del tubo (mA), mientras que en el caso de radiaciones gamma, depende de la actividad de la fuente.

Esta magnitud tiene gran importancia para la determinación de las dosis a las que estarían expuestas las personas en un lugar determinado, próximo a una fuente radiactiva (X o gamma).

5°) Principios físicos de inspección por rayos X y rayos gamma.

Ley de absorción:

Al pasar las radiaciones a través de la materia existe siempre una parte que es absorbida. La parte de las radiaciones que es absorbida por una lámina de metal es proporcional al espesor de la misma y a un factor denominado COEFICIENTE DE ABSORCION (que depende del material) y de la longitud de onda de la radiación usada.

$$\frac{I_0 - I}{I_0} = \frac{\Delta I}{I_0} = -\mu_1 \cdot \Delta x$$

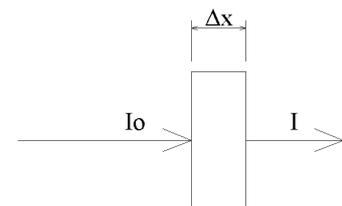


FIGURA 5

Donde: I_0 = intensidad de radiación incidente;
 I = intensidad de radiación que emerge luego de ser absorbida parcialmente;
 Δx = espesor de la lámina;
 μ_1 = coeficiente de absorción lineal;
 (-) = indica que la intensidad disminuye a medida que atraviesa el metal.

$dI / I = -\mu_1 \cdot dx$; integrando, queda:

$\log_e I = -\mu_1 \cdot x + c$; donde $c = \log_e I_0$ cuando $x = 0$

$\log_e I - \log_e I_0 = -\mu_1 \cdot x \Rightarrow$

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_1 \cdot x}$$

denominada **ley de absorción de radiaciones por los metales y materia en general**.

En general, se suele usar el denominado: coeficiente de absorción de masa: $\mu = \mu_1 / \rho$,
 donde ρ = densidad absoluta del material; luego:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot x}$$

NOTA: la absorción $e^{-\mu \cdot \rho \cdot x}$ no depende del estado físico o químico del material: la cantidad absorbida por una cierta cantidad de agua es igual a lo absorbido por la misma cantidad de hielo o vapor.

Podemos concluir que la absorción es función de:

- a) Espesor.
- b) Densidad del material.
- c) Coeficiente de absorción de masa del mismo.

Esta ley de absorción encuentra una importantísima aplicación en el cálculo del espesor mínimo de los blindajes de protección (plomo, hormigón, acero, etc.) que deben usarse para proteger tanto a radiólogos, a otros trabajadores y al público en general de la exposición a las radiaciones ionizantes.

Además debe tenerse en cuenta que el coeficiente de absorción crece con el aumento de longitud de onda de la radiación incidente sobre el material.

Al considerar la formación de la imagen, y en la operación con rayos X, debemos tener en cuenta que el valor de la intensidad emergente se ve disminuido en los metales, por el efecto llamado **DIFUSIÓN**.

Aplicación de la ley de absorción al principio del método de radiografía industrial:

Como ya se ha indicado, la detección de discontinuidades por rayos X, se basa en la desigual absorción de rayos. Veamos las expresiones correspondientes de la ley antes enunciada en función de las discontinuidades de la figura:

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot d}$$

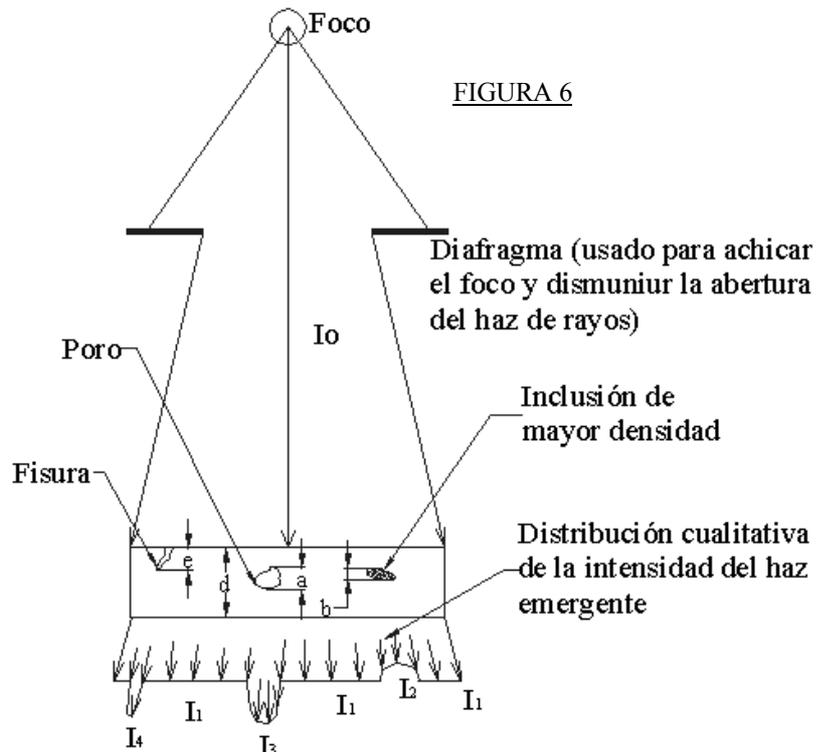
$$I_2 = I_0 \cdot (e^{-\mu \cdot \rho \cdot (d-b)} + e^{-\mu \cdot \rho \cdot b})$$

$$I_3 = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot (d-a)}$$

$$I_4 = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot \rho \cdot (d-e)}$$

La detección de estas variaciones de intensidad del haz emergente de rayos X se hará mediante las variaciones en el ennegrecimiento (o densidad) sufrido por la película radiográfica colocada debajo del objeto, que será proporcional a la intensidad incidente sobre ésta.

Mediante éstas expresiones es evidente y fácil de entender que las fisuras que pudieran existir en la pieza serán tanto más detectables y mejor detalladas cuanto más paralelo sea el plano de las mismas con el haz de rayos X. En cambio, si una fisura es oblicua respecto de los rayos, será poco probable su detección.



6°) Características de los aparatos de rayos X.

Cuando se especifica un equipo de rayos X es importante tener en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Rango de kV (kilo voltaje) de tubo, y el KV máximo.
- b) Rango de mA (mili amperaje) de tubo y el mA máximo.
- c) Tamaño del foco (ya veremos como esto afecta dramáticamente la calidad de la imagen).
- d) El tipo de sistema de enfriamiento y el ciclo de trabajo.
- e) Portabilidad.

Ejemplo: Equipo de rayos X portátil, 160 kV; 10 mA, ciclo continuo con refrigeración por agua; foco de 3mm x 4mm.

También es importante conocer el tipo de rectificación y filtrado de la fuente de alta tensión, ya que afectarán al “ripple” o “rizado” de la tensión de tubo. A menor “ripple”, mayor calidad (y mejor uniformidad) de rayo para un mismo KV.

7°) Principios geométricos de formación de imagen.

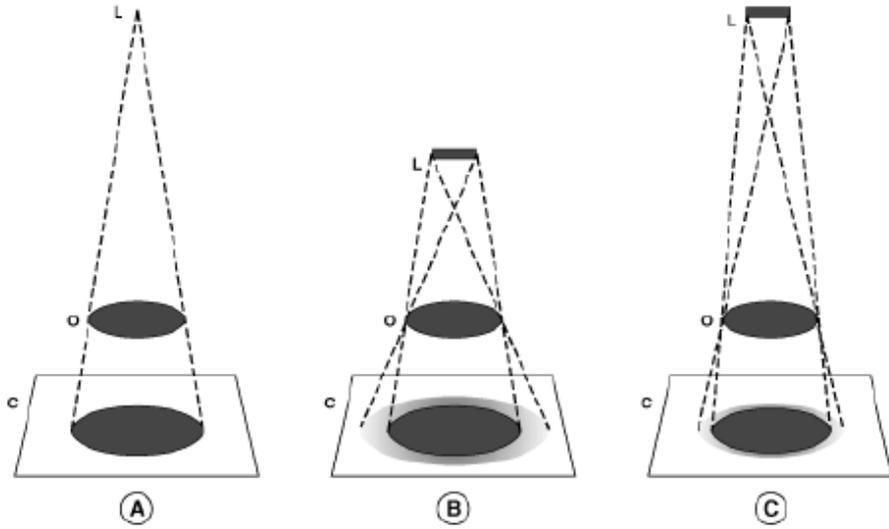
Para obtener imágenes nítidas y próximas a las formas y tamaño del objeto:

- a) Foco puntual o lo más aproximado posible.
- b) Foco lo más alejado posible del objeto.
(éstas dos primeras condiciones son con el fin de evitar la formación de penumbra alrededor de la imagen del objeto).
- c) Película (o film) lo más cercana posible al objeto.
- d) Los rayos deben ser lo más perpendiculares posibles a la película.
- e) El plano del objeto y de la película deben ser lo más paralelos posibles.
(éstas condiciones son a fin de evitar la deformación de la imagen).

Definimos DFP a la “distancia foco–película”; DFO a la “distancia foco–objeto”; DOP a la “distancia objeto–película”.

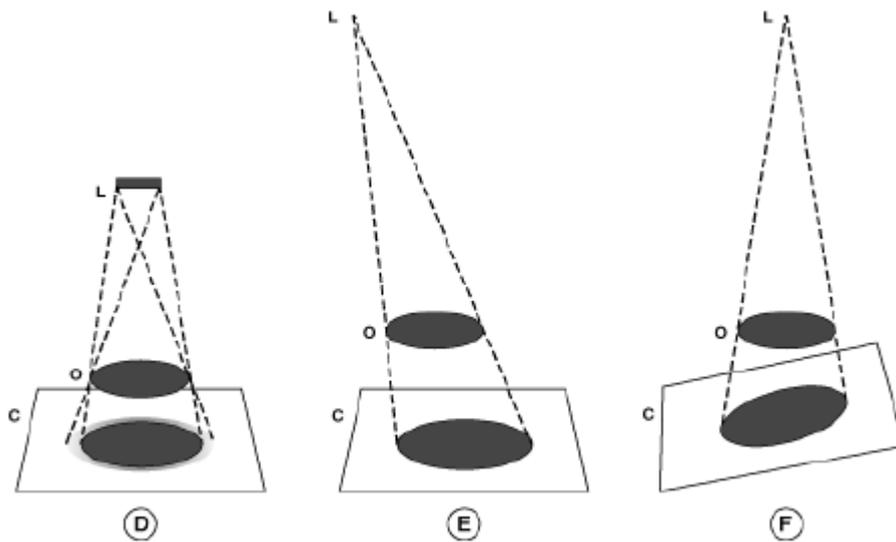
Efectos de la posición y el tamaño del foco: Una fuente perfectamente puntual (caso A de la figura 7) daría una imagen (sombra) nítida, con sus bordes muy claramente definidos. Pero las fuentes reales no son puntuales, sino que tienen un tamaño finito debido fundamentalmente al límite impuesto por la temperatura de fusión del ánodo que requiere de una superficie mínima que permita la disipación del calor (casos B y C) por lo que la imagen obtenida presentará cierto grado de borrosidad en los bordes, o **penumbra radiográfica**, que “diluye” el contraste en los bordes, empeorando la definición. Comparando los casos (B) y (C) de la figura siguiente, se puede comprender fácilmente los beneficios que se obtienen respecto de la reducción de las penumbras (y por ende sobre la mejora de la definición) al aumentar la DFO, a igualdad de DFP.

El caso (D) muestra el beneficio respecto de la reducción de las penumbras debido a una disminución de la DOP, con una DFO similar a la del caso (B). Los casos (E) y (F) muestran las posibles distorsiones en la imagen debidas a la falta de perpendicularidad de los rayos incidentes y a la mala alineación de la película respecto del objeto, respectivamente.



Notación: L = foco - O = objeto - C = película.

FIGURA 7



Los espesores de penumbra máximos admitidos se especifican en las normas o procedimientos aplicables y se debe efectuar la exposición con distancias DOP y DFO adecuadas, según al tamaño del foco del equipo usado. La determinación de la DFO mínima se hace por semejanza de triángulos, del siguiente modo:

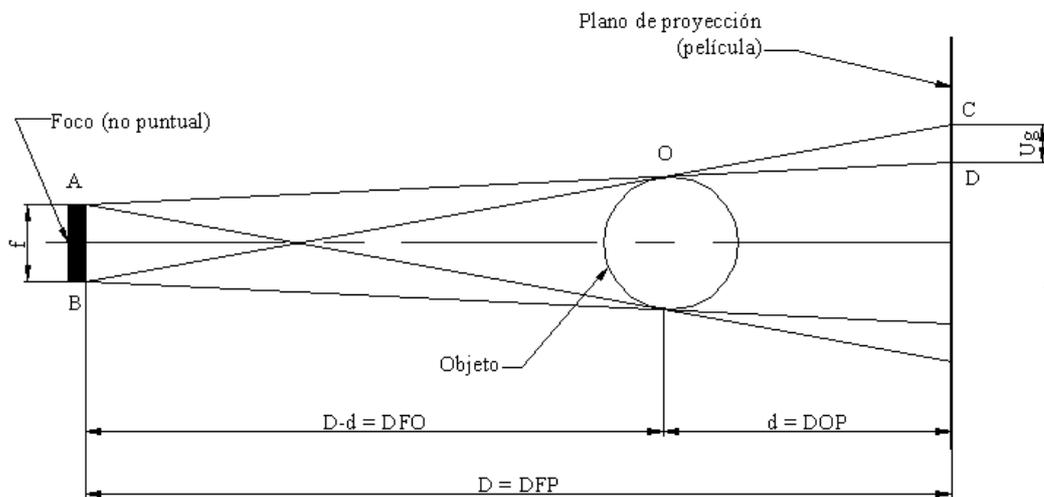


FIGURA 8

$$\frac{AB}{CD} = \frac{D-d}{d} = \frac{f}{U_g} \Rightarrow U_g = (f.d) / (D-d) ;$$

donde: f = dimensión del foco (si es rectangular => f es la diagonal).
 d = DOP
 D = DFP
 U_g = borrosidad o espesor de penumbra.

Ley de variación de la intensidad de radiación con las distancias

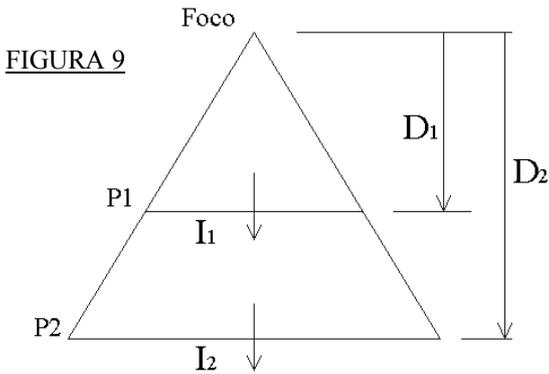


FIGURA 9

I_1	D_2^2
---	---
I_2	D_1^2

La intensidad o cantidad de radiación en un punto del espacio es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Esto se debe a que la energía que atraviesa la pieza P1 es igual a la que atraviesa a P2 pero su intensidad es menor.

Sabemos que la acción de los rayos X sobre la película depende de la energía que llega a cada unidad de área del film. Luego, la cantidad de radiación que llega al film es función de los siguientes factores:

- a) DFP.
- b) Factores inherentes al metal inspeccionado (tipo, densidad, espesor, discontinuidades, etc.).
- c) Difusión de rayos X.
- d) Radiación usada.

Efecto de la radiación sobre la película:

El ennegrecimiento de la película será proporcional a la cantidad de radiación recibida durante la exposición. Dijimos que el poder de penetración de los rayos X depende solo del kilovoltaje empleado en el tubo. Por su parte, la cantidad de rayos X emitidos desde el foco que llegarán a la película luego de atravesar la materia depende de la CORRIENTE DEL TUBO y del TIEMPO que dure la irradiación. La variación de la corriente no modifica del poder de penetración de los rayos.

Cantidad de rayos X = I . T ;

donde: I = intensidad de rayos X, proporcional al mili Amperaje a través del tubo; T = tiempo.

Una vez fijado el kilovoltaje adecuado (para el material y espesor dados), se calcula la corriente y el tiempo necesarios usando el parámetro llamado "EXPOSICIÓN", que es el producto de la intensidad de radiación por el tiempo. Para los rayos X es el producto de la corriente por el tiempo de exposición:

Exposición = k.M.T ;

donde: : k = cte. De proporcionalidad; M = mili amperaje de tubo; T = tiempo.

Por ejemplo:

E₁ = 8 mA x 10 min = 80mA.min

E₂ = 4 mA x 20 min = 80mA.min

E₃ = 2 mA x 40 min = 80mA.min

Vemos que $E_1 = E_2 = E_3$. El efecto fotoquímico que se producirá sobre la película será en los tres casos idéntico, ya que la exposición es la misma.

Nota: en el caso de los rayos gamma, la exposición es el producto de la actividad de la fuente por el tiempo de exposición. Se mide, por ejemplo, en **Curie por minuto**.

Ley de reciprocidad: $M_1.T_1 = M_2.T_2 = M_3.T_3$; de donde se desprende que:

$$\boxed{M_1/M_2 = T_2/T_1}$$

Ley de compensación de la exposición por variación de la distancia:
Al variar la DFP, la exposición necesaria para producir sobre la película el mismo efecto fotoquímico será directamente proporcional al cuadrado de la variación de la distancia. Esto es:

$$\boxed{\frac{M_1 \cdot T_1}{M_2 \cdot T_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2}}$$

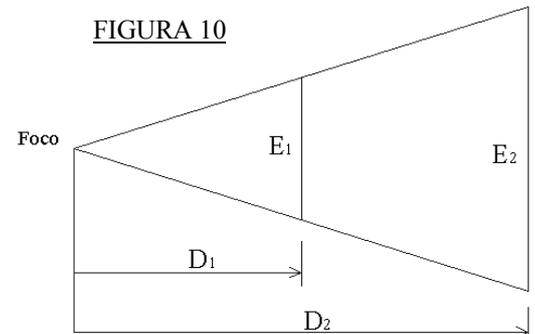


FIGURA 10

Ejemplo:

Supongamos que un film, a una DFP= D_1 recibe, para producir un determinado efecto fotoquímico (oscurecimiento o densidad), una exposición $E_1=M_1.T_1$. Supongamos ahora el mismo tipo de película a una distancia D_2 del foco. Para conseguir el mismo efecto fotoquímico; ¿cuál será el valor de la exposición E_2 ? Sean, por ejemplo: $D_1 = 50\text{cm}$; $E_1 = 10 \text{ mA.min}$; $D_2 = 100 \text{ cm}$; $E_2 = ?$

Aplicando la ley anterior: $E_2 = 10\text{mA.min} \cdot (100^2/50^2) = 40 \text{ mA.min}$

Se define el llamado FACTOR DE EXPOSICIÓN: →

$$\boxed{\frac{E_1}{D_1^2} \text{ o } \frac{E_2}{D_2^2}}$$

Este factor de exposición es una cantidad que combina el mili amperaje de un tubo de rayos X, con el tiempo de exposición y la distancia foco-película. Para un mismo equipo, a igualdad de factor de exposición se obtendrán sobre un mismo tipo de película efectos fotoquímicos iguales. Sin embargo, recordemos que en función de los principios geométricos de la formación de la imagen radiográfica, la DFP tiene efectos notables sobre la nitidez y los contrastes de la imagen, siendo preferible utilizar distancias tan grandes como sea posible. Para mantener el factor de exposición, será necesario entonces incrementar la corriente de tubo y/o el tiempo de exposición a medida que se incremente la distancia.

En la práctica, este factor de exposición es de gran utilidad, ya que las aplicaciones suelen especificarse en términos de kilovoltaje (que determina la longitud de onda de los rayos y por lo tanto su capacidad de penetración) y factor de exposición. Luego, se deberá multiplicar el factor de exposición especificado por el cuadrado de la distancia foco-película empleada y obtener así, por ejemplo los miliampere-minuto (exposición) requeridos.

Diagramas de exposición:

Al colocarse un objeto entre foco y película, la energía que llega a la película sufrirá dos efectos: **ABSORCIÓN** y **DIFUSIÓN** por el material interpuesto. En la práctica es difícil determinar estos valores, por lo que no se usan ecuaciones de absorción, sino que para cada material se preparan

diagramas, ábacos o tablas de EXPOSICIÓN propias del aparato, el material y la película a emplear, para una densidad (ennegrecimiento) de imagen dada.

ATENCIÓN: Los diagramas de exposición dados por los fabricantes de películas solo sirven en una primera aproximación en la determinación de la exposición. Las performances de equipos similares, de igual marca y modelo puede diferir notablemente, dependiendo de las tolerancias de fabricación e incluso del uso y desgaste que hayan tenido sus respectivos los tubos. Por esto, el operador deberá trazar sus propios diagramas.

Estos ábacos se preparan para una DFP y un montaje de película determinados (ver uso de pantallas reforzadoras). Si no es posible hacer la exposición a esa distancia, como ya hemos discutido anteriormente, se debe determinar la nueva exposición a través del “Factor de Exposición” (M.I/DFP²).

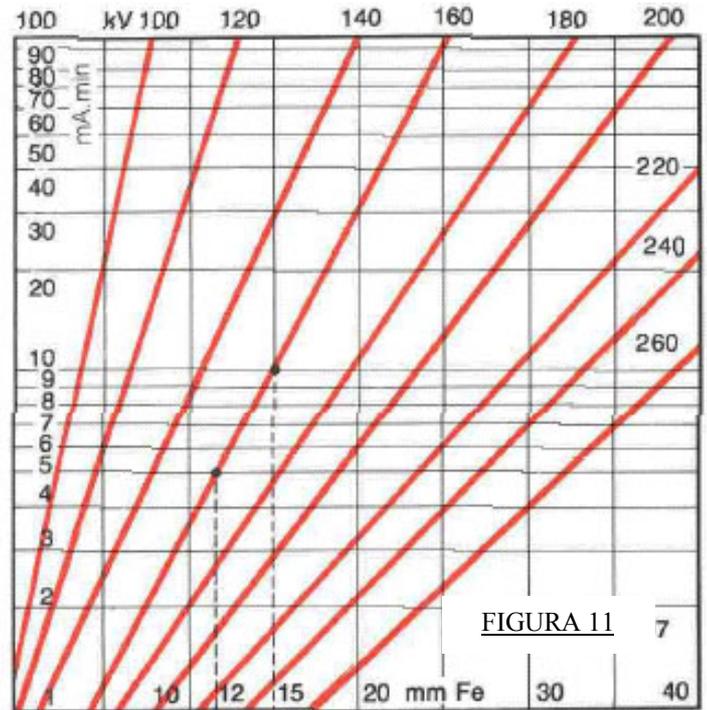


FIGURA 11 7

Ejemplo: Cálculo de la exposición.

Se debe inspeccionar por rayos X la soldadura de una pieza de acero 5 mm de espesor. La película a emplear responde al diagrama de exposición de la figura 11. El equipo de rayos X disponible admite tensiones de tubo de 50 a 200 kV y la corriente de tubo es fija, de 5 mA.

Película: Structurix D7 Pantalla anterior. Pb 0,1 mm
 Mat: acero Pantalla posterior. Pb 0,1 mm
 Densidad: 2 Proceso: G-135 – 30°C - 8 min.
 DFP: 70 cm.

Se pide: Elegir una tensión de tubo adecuada y determinar la exposición necesaria en miliamperes por minuto (mA.min), si se utiliza la DFP = 1m. Además, ¿Cuánto tiempo de exposición se requerirá?

Para obtener un buen contraste se suele elegir la mínima tensión de tubo posible, de acuerdo al material y el espesor de la pieza, siempre que el tiempo de exposición no resulte excesivo => **100kV** por ser el mínimo disponible en el diagrama.

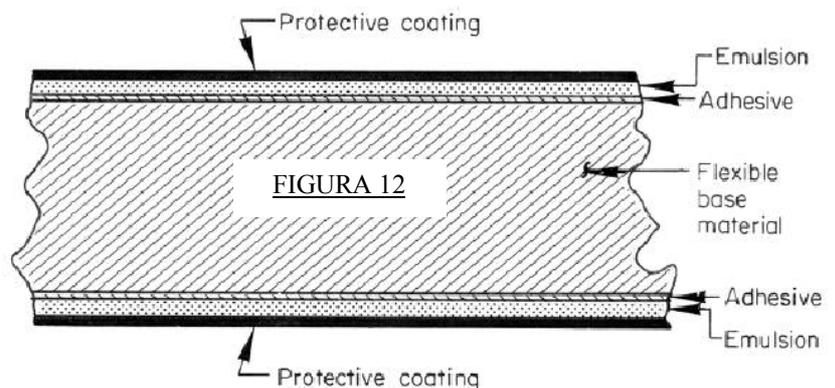
Para 100 kV y 5mm de espesor se requiere una exposición de $E_1 = M_1 \cdot T_1 = 20 \text{ mA}\cdot\text{min}$. Pero la DFP a utilizar es de 1 m y no de 0,7m como indica el diagrama. Luego:

$$E_2 = E_1 \cdot (D_2^2 / D_1^2) = 20 \text{ mA}\cdot\text{min} \cdot [(1\text{m})^2 / (0,7\text{m})^2] = 40,8 \text{ mA}\cdot\text{min}$$

Como $M_2 = 5\text{mA}$ (valor fijo del equipo), $T = E_2 / M_2 = 40,8 \text{ mA}\cdot\text{min} / 5\text{mA} = 8 \text{ minutos}$.

8º) PELÍCULAS RADIOGRÁFICAS

Las películas se utilizan como medio de registro puesto que sus emulsiones son sensibles a la cantidad de radiación electromagnética incidente sobre ellas, dentro de un amplio rango dentro del espectro electromagnético.



La película radiográfica es básicamente un material de base flexible de poliéster que es muy durable, no absorbe el agua ni los productos químicos usados para el revelado, es dimensionalmente estable, se seca con facilidad y es ignífugo. Esta base está recubierta por una delgadísima capa consistente en una emulsión que contiene cristales o granos sensibles a la radiación (generalmente bromuro de plata) distribuidos uniformemente sobre toda la superficie. La mayoría de las películas están recubiertas sobre ambas caras (requieren menor exposición), aunque pueden obtenerse películas con emulsión sobre una sola cara (brindan imágenes con mayores detalles).

Existen en el mercado diferentes tipos o clases de películas, caracterizadas por su sensibilidad (o velocidad) y resolución, según las aplicaciones para las cuales se las deba usar. La velocidad de una película indica la cantidad de radiación que una película debe recibir para producir un ennegrecimiento dado. En general, esta velocidad es inversamente proporcional al tamaño de grano de la película. Pero la resolución y a la relación señal/ruido del film son inversamente proporcionales a su velocidad (y al tamaño de grano).

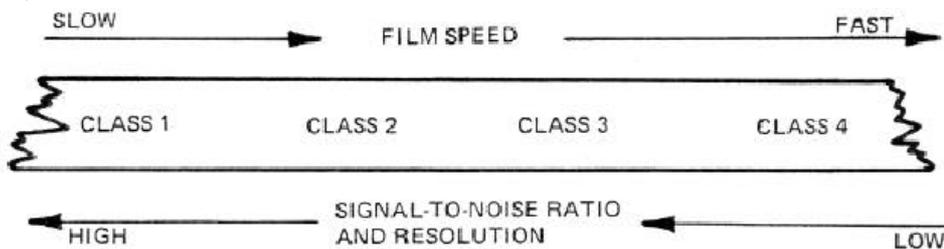


FIGURA 13

Los fabricantes (tales como Agfa, Kodak, Fuji y otros) brindan toda la información relacionada con la selección, uso, exposición requerida y proceso de revelado; por lo que no daremos aquí detalles al respecto.

9º) **Parámetros de la calidad de las imágenes radiográficas**

La calidad de una radiografía se evalúa a través de tres parámetros: DENSIDAD, DEFINICIÓN Y CONTRASTE (suponiendo que no presente ningún tipo de deterioros obvios, tales como manchas, ralladuras, quemaduras, etc).

Densidad: La medida del ennegrecimiento de una emulsión fotográfica expuesta a la radiación, revelada y fijada se mide en unidades de “densidad fotográfica por transmisión”, o “densidad óptica” o simplemente “densidad”. Esta magnitud se evalúa través del concepto de la siguiente expresión:

$$D = \log_{10} (L_0 / L_t); \text{ donde:}$$

- D = densidad,
- L₀ = intensidad de luz (visible) incidente sobre el film,
- L_t = intensidad de luz (visible) transmitida a través del film.

A mayor luz visible que atraviese la radiografía, menor será su densidad óptica (imagen más transparente). Por el contrario, mayor ennegrecimiento provocado por la exposición a la radiación, mayor densidad de la película. Este parámetro es de gran importancia para la técnica radiográfica y se ha encontrado que una buena radiografía debe presentar una densidad comprendida entre 2 y 3 en el área de interés de la imagen, aunque las normas o procedimientos particulares a aplicar en cada ensayo podrán especificar valores diferentes.

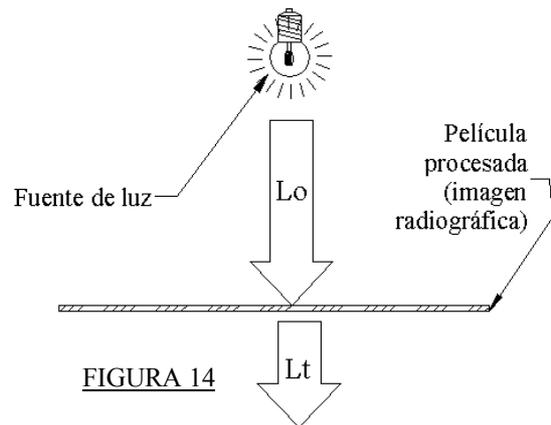


FIGURA 14

La forma más usual para la medición de la densidad consiste en el uso de “densitómetros” electrónicos, que mediante células fotoeléctricas miden las intensidades de la luz incidente y transmitida y calculan automáticamente el valor de la densidad de la imagen en los puntos deseadas.

Si la densidad obtenida es insuficiente, se deberá incrementar la exposición, y viceversa. Para calcular la corrección se utilizan las “curvas características” o “sensitométricas” dadas por los fabricantes de las películas.

Ejemplo: Supongamos que se ha realizado una radiografía usando una película Z (fig. 15) con una exposición de $E_1 = 12$ mA.min; la imagen obtenida presenta en la zona de mayor interés una densidad de $D_1 = 0,8$ (demasiado clara). Se desea incrementar la densidad en dicha zona a $D_2 = 2$ con el fin de incrementar el contraste. Entrando al gráfico con las densidades conocida y deseada, leemos los correspondientes valores del logaritmo de exposición relativos. La nueva exposición E_2 se obtiene a través de la expresión:

$$E_2 = E_1 \times \text{antlog}_{10}(\log_{\text{rel}2} - \log_{\text{rel}1}) \Rightarrow$$

$$E_2 = 12 \text{ mA.min} \times \text{antlog}_{10}(1,62 - 1) = 50 \text{ mA.min}$$

Definición:

Se denomina así a la nitidez que presentan los contornos de la imagen radiográfica. La falta de nitidez se corrige incrementando la DFP y reduciendo la DOP, con el fin de minimizar el espesor de penumbra o borrosidad geométrica (U_g).

Contraste:

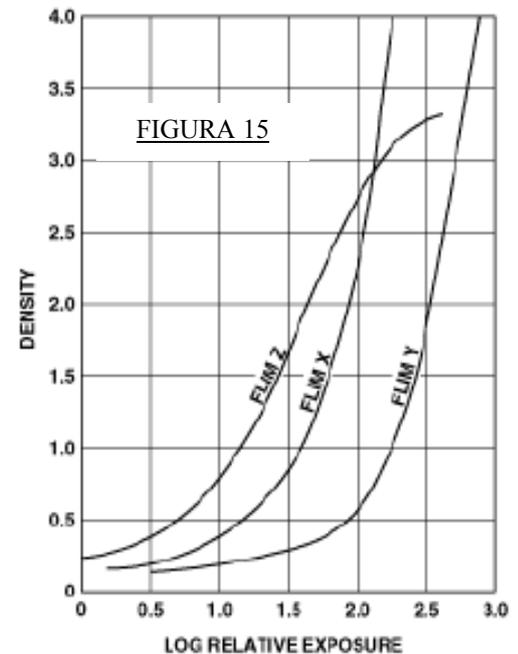
El contraste es una medida de la diferencia entre las densidades de dos zonas vecinas de una radiografía (debido obviamente a que recibieron diferentes cantidades de radiación).

La película tiene una importante influencia sobre el contraste. Observando las curvas características (Fig. 15) se deduce que a mayor pendiente de la curva, mayor es el contraste que permite la película. Por ejemplo, en una pieza con dos espesores diferentes (que implica diferentes exposiciones en correspondencia con cada región de la pieza), una mayor pendiente dará una mayor diferencia de las densidades correspondientes en la película.

El contraste es influenciado también por la calidad de las radiaciones empleadas. Una radiación de longitud de onda muy corta atravesará fácilmente el material y la cantidad de radiación incidente sobre el film será relativamente alta sobre toda su superficie, proporcionando contrastes pobres. Si se pretende un alto contraste (mayor diferenciación) se deben emplear radiaciones con la mayor longitud de onda (menor energía de radiación) que sea compatible con el poder de penetración requerido en cada caso.

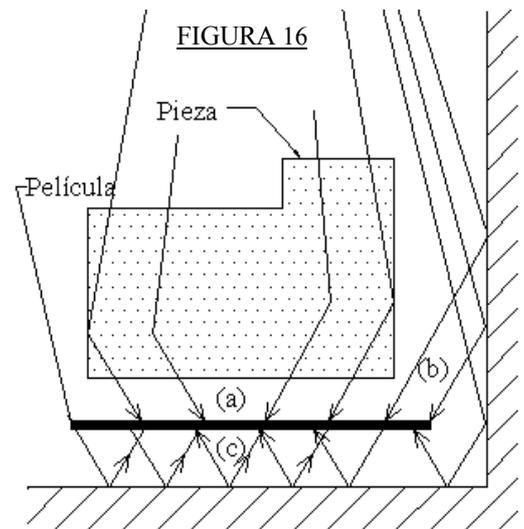
Las imágenes más contrastadas se obtienen con rayos X generados con el menor kilovoltaje posible. En el otro extremo, las fuentes de rayos gamma de cobalto o cesio dan los contrastes más pobres.

Además, el contraste se ve influenciado por las “RADIACIONES SECUNDARIAS” (por difusión, etc.) que deben ser eliminadas en la medida de las posibilidades. La principal fuente de dichas radiaciones secundarias es la propia pieza a inspeccionar. Todos los materiales, además de absorber y transmitir las radiaciones X y gamma, tienen la propiedad de dispersar radiaciones (de menor intensidad y longitud de onda mayor).



- a) Difusión por transmisión: aumenta con el espesor de la pieza y el número atómico del material.
- b) Difusión por reflexión: Incide sobre el film por su cara frontal. Crece con la DOP.
- c) Difusión por retroceso: Tras chocar contra otras superficies regresan para incidir sobre la cara trasera del film. Se mueven en sentido apuesto al haz incidente sobre la pieza.

Estas radiaciones secundarias no pueden evitarse. Sin embargo se dispone de recursos para minimizar sus efectos perjudiciales sobre los contrastes. Como puede advertirse, la difusión por reflexión podrá minimizarse mediante un cuidadoso montaje de la película, tan cerca del objeto como sea posible.



Para reducir el efecto de las restantes radiaciones difusas se utilizan los **filtros o las pantallas intensificadoras de contraste**.

Suelen usarse delgadas láminas de plomo de 0,01 a 0,1 mm de espesor (u otros metales, tales como acero o cobre) que se colocan en contacto directo con las películas, ya sea detrás de las mismas o a ambos lados. Estas, por un lado, actúan como filtros absorbiendo las radiaciones difusas que son de mayor longitud de onda que las directas y que por incidir con ángulos oblicuos respecto de la película deberán atravesar un mayor recorrido a través de la pantalla, sufriendo una mayor absorción. Por otro lado, las pantallas producen un efecto de intensificación de contrastes ya que cuando la radiación incide sobre ellas, arrancan electrones del metal que provocan un efecto fotográfico suplementario sobre las emulsiones sensibles de la película.

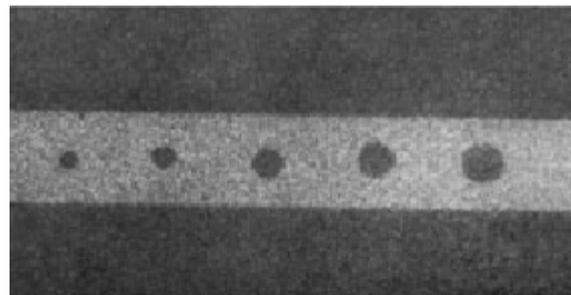
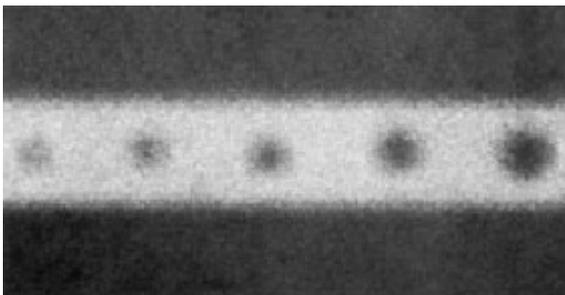
Así, estas delgadas láminas cumplen la doble función de intensificar la radiación generadora de la imagen que incide sobre el film, y de filtrar las radiaciones secundarias que de otra manera llegarían a incidir sobre la emulsión de la película.

Existe otro tipo de pantallas intensificadoras (muy poco usados) hechas de cristales de sales químicas que por fluorescencia emiten luz visible al ser bombardeadas con rayos X; es decir, convierten los rayos X en fotones dentro del espectro de los rayos ultravioleta que incide sobre la emulsión del film suplementando a la radiación X original. Sin embargo estas pantallas introducen ruido y distorsionan la imagen proporcionando imágenes radiográficas de inferior calidad. Solo se usan en aquellos casos en que la velocidad de la exposición es crítica y más importante que la calidad de la imagen.

Enmascaramiento: Es otro recurso usado para mejorar los contrastes. Su finalidad es reducir las emisiones provenientes de la pieza. Consisten en revestir ciertas partes de la pieza que no se desean inspeccionar mediante el uso de materiales altamente absorbentes. Por ejemplo, relleno de huecos de grandes dimensiones con granallas de plomo.

Evaluación de la calidad de la imagen:

Las dos fotos siguientes son las radiografías de una misma pieza obtenidas bajo diferentes condiciones.



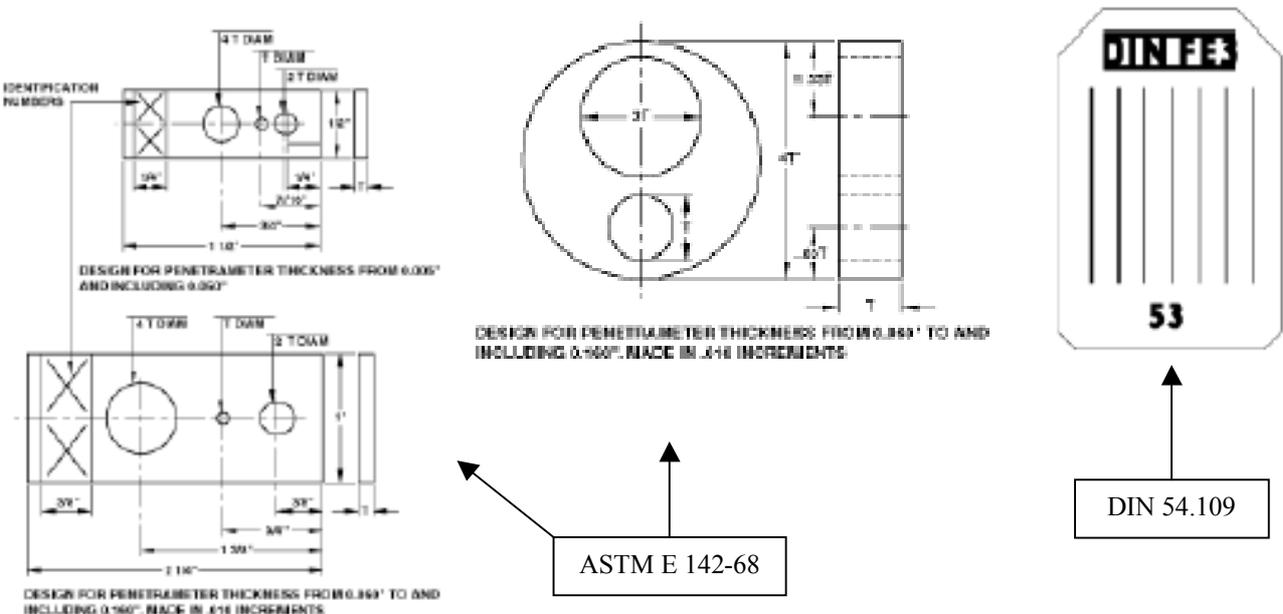
La primera de ellas presenta mayores contraste, pero una definición muy pobre. En cambio la segunda, de menor contraste brinda una mucho mejor definición. Para obtener las mejores calidades de imagen será necesario elegir correctamente la película, las pantallas, el kilovoltaje, las distancias (DFP, DFO, DOP), y la exposición, que en conjunto permitan optimizar los resultados. No es un trabajo sencillo y suelen ser necesarias varias pruebas y reajustes antes de lograr un resultado satisfactorio. Para ayudar al operador en esta tarea existen elementos normalizados llamados **Penetrómetros (o indicadores de calidad de imagen)**.

Los penetrómetros consisten en formas geométricas simples (alambres, escalerillas, placas con orificios, etc.) y están fabricados de un material similar al del objeto a inspeccionar. Su finalidad es la introducir en la radiografía la presencia de discontinuidades ficticias. El tamaño de estas formas se determina en función del espesor del objeto a radiografiar y eventualmente con el tamaño de las discontinuidades que se pretenden detectar. Al efectuarse la exposición del objeto bajo estudio, los penetrómetros se colocan de tal manera que aparezcan junto a la imagen de la pieza en la zona a inspeccionar. La presencia de imágenes nítidas de los penetrómetros en la radiografía será una evidencia indeleble de que la técnica radiográfica se ha realizado en condiciones adecuadas para los fines buscados.

Estos elementos se utilizan para determinar la “**sensibilidad radiográfica**” (o simplemente sensibilidad) de una radiografía que es una magnitud representativa del menor detalle que puede ser visto en una radiografía; expresada como porcentaje del espesor de la pieza en la zona de interés. Un valor adecuado para la mayoría de las normas deberá ser de menos de un 2%. La sensibilidad radiográfica depende del efecto combinado de dos factores independientes entre si y que ya hemos explicado más arriba: el contraste (o sea, la diferencia de densidad óptica entre un detalle pequeño y su entorno) y la definición (forma de transición entre las distintas densidades en la imagen).

$$\text{Sensibilidad} \rightarrow S = \{(\text{espesor del menor penetrómetro visible})/(\text{espesor de la pieza})\} \cdot 100\%$$

Algunos tipos de penetrómetros usados en la industria:



10°) El procesado de la película:

Luego de la exposición la película debe ser procesada para obtener la radiografía final. El procesado puede ser automático (en máquinas procesadoras) o manual. La elección de un sistema u otro dependerá de la producción diaria de películas. En ambos casos se siguen los mismos pasos, siendo el tiempo de cada uno de ellos de vital importancia para un correcto resultado. La temperatura influye notablemente sobre estos tiempos. Los pasos del proceso son:

- 1°) Revelado (en revelador líquido básico).
- 2°) Detenido, para neutralizar al revelador (en solución acuosa de ácido acético al 3%).
- 3°) Fijado (en fijador ácido).
- 4°) Lavado para eliminar el fijador ácido, que deterioraría rápidamente la radiografía (en agua).
- 5°) Humectado en agua jabonosa (solo en revelado manual, para evitar chorreaduras).
- 6°) Secado.

11°) Detalles sobre la manipulación de la película:

La película es sensible al luz, por lo que su manipulación debe realizarse en cuarto oscuro, donde la única iluminación admisible es la provista por las denominadas “lámparas de seguridad”, de baja potencia (15W) y con filtros de color rojo-marrón.

No lo hemos mencionado anteriormente, pero es evidente que las películas deben protegerse de toda exposición a la luz y a las radiaciones ionizantes durante todo el tiempo que se las tenga almacenadas y durante el manipuleo previo a la exposición y al revelado.

Las películas destinadas a la exposición se sacan de su envase y se colocan junto a las pantallas dentro de fundas especiales denominadas “chasis”, de color negro y diseñadas para evitar cualquier ingreso accidental de la luz y solo se las saca de allí luego de la exposición en el instante previo al revelado. Todo este manipuleo de carga y descarga de las películas en los chasis debe ser rigurosamente realizado en cuarto oscuro.

-----X-----

Bibliografía:

De la edición original:

- Curso de Ensaio Nao-Destutivos dos Metais – Setembro/Outubro 1966 – Eng. P. G. De Paula Leite.
- Non destructive Testing Handbook – R. C. Manchester.
- Classroom Training Handbook – General Dynamics, Convair Division (CT-6-6).

De la presente reedición:

- Ley Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo - N° 19.587 y su decreto reglamentario N° 351 más disposiciones complementarias – Editorial Ghaem – 1993.
- AC 43-3; “Nondestructive Testing in Aircraft” – DOT – FAA – May 1973.
- AC 43.13-1B; – DOT – FAA - Sep. 98.
- T.O.33B-1-1; “Nondestructive Inspection Methods” – USAF – Chg.3 (MAR-2000).
- “Radiography in Modern Industry – 4th Edition” – Eastman Kodak Company – 1980.
- “Manual de Radiografía Industrial Nivel 1” – INTI – mayo de 2006.
- “Radiografía Industrial” – AGFA Gevaert NV – 1989.