

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

**PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE METALURGIA**

**LOS RAYOS X EN SU APLICACION
INDUSTRIAL;**

PRACTICA Y AVANCES RECIENTES

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE
INGENIERO METALURGISTA**

SOMETIDA POR:

ANTONIO DENNIS KOCCHIU YI

**LIMA - PERU
1978**

**Dedicado a quienes, que, con su
sincera amistad y estima personal
han sembrado en mi camino una se-
milla de constante aliento y eter-
na esperanza.**

**EL IDEAL ES LA MEDIDA DEL
SER : SOMOS LO QUE SEA
NUESTRO IDEAL.**

INDICE

Capítulo I

" INTRODUCCION "

- 1.1 Motivación del estudio**
- 1.2 Los rayos X en el campo de la Metalurgia**
 - 1.2.1 Aspecto científico; Cristalografía de rayos X**
 - 1.2.2 Aspecto industrial; Inspección No Destructiva**
- 1.3 Otras Aplicaciones**
 - 1.3.1 Espectrometría**
 - 1.3.2 Microradiografía**

Capítulo II

" TECNOLOGIA DE LA FORMACION DE LA IMAGEN RADIOGRAFICA "

- 2.1 Naturaleza y propiedades de los rayos X**
 - 2.1.1 Origen de los rayos X**
 - 2.1.2 Naturaleza de los rayos X**
 - 2.1.3 Espectro de rayos X de un elemento**
 - 2.1.4 El fenómeno de Absorción**
- 2.2 Formación de imágenes radiográficas**
 - 2.2.1 Consideraciones geométricas**
 - 2.2.1.1 Geometría de la formación de una imagen**
 - 2.2.1.2 Imágenes radiográficas**
 - 2.2.1.3 Extensión de la penumbra**
 - 2.2.1.4 Tamaño focal verdadero y efectivo**
 - 2.2.1.5 Medida del tamaño focal**
 - 2.2.2 Factores de exposición**
 - 2.2.2.1 Generalidades**
 - 2.2.2.2 Cantidad y calidad de la radiación emitida por el tubo**
 - 2.2.2.3 Cantidad e intensidad de la radiación que llega al objeto**
 - 2.2.2.4 Clase y espesor de la pieza**
 - 2.2.2.5 Efecto de talón**

- 2.2.2.6 Exposición
- 2.2.2.7 Cartas de exposición y su determinación experimental
- 2.2.3 Radiaciones secundarias y pantallas radiográficas
 - 2.2.3.1 Radiaciones secundarias y su efecto en la imagen
 - 2.2.3.2 Métodos de atenuación
 - 2.2.3.3 Moteado por difracción de rayos X
 - 2.2.3.4 Las pantallas radiográficas
- 2.2.4 Factores fotográficos
 - 2.2.4.1 Películas radiográficas
 - 2.2.4.2 Densidad radiográfica
 - 2.2.4.3 Curva característica de una película radiográfica
 - 2.2.4.4 Granulado
 - 2.2.4.5 Sensibilidad espectral
 - 2.2.4.6 Fallos de la ley de reciprocidad
 - 2.2.4.7 Proceso fotográfico de las películas de rayos X
- 2.3 La calidad radiográfica
 - 2.3.1 Sensibilidad radiográfica
 - 2.3.2 Penetrímetros
 - 2.3.3 Contraste radiográfico
 - 2.3.4 Definición radiográfica
 - 2.3.5 Latitud radiográfica

Capítulo III

" INGENIERIA GENERAL "

- 3.1 Equipos generadores de rayos X
 - 3.1.1 Elementos fundamentales de un generador de rayos X
 - 3.1.2 Tubos de rayos X
 - 3.1.3 Equipos transformadores
 - 3.1.4 Equipos industriales de rayos x
 - 3.1.5 Circuitos básicos en equipos de medio voltaje
- 3.2 La interpretación radiográfica
 - 3.2.1 Consideraciones generales
 - 3.2.2 Normas radiográficas

- 3.2.3 Consideración y localización de algunos defectos en piezas fundidas y sus imágenes radiográficas**
- 3.2.4 Consideración y localización de algunos defectos en cordones de soldadura**
- 3.3 Observación de radiografías**
 - 3.3.1 Generalidades**
 - 3.3.2 Radiografías defectuosas; causa y manera de evitarlas**
- 3.4 Consideraciones básicas para la instalación de un laboratorio de inspección y control de calidad por rayos X**
 - 3.4.1 Consideraciones generales**
 - 3.4.2 Consideraciones técnicas**
 - 3.4.2.1 Selección del equipo**
 - 3.4.2.2 Ubicación y distribución del laboratorio**
 - 3.4.2.3 Protección**
 - 3.4.2 Consideraciones económicas**

Capítulo IV

" XERORADIOGRAFIA "

- 4.1 Fundamentos de la xerorradiografía**
- 4.2 Las placas xerorradiográficas**
- 4.3 Técnica operatoria**

Capítulo V

" FLUOROSCOPIA "

- 5.1 Generalidades**
- 5.2 Brillo y contraste**
- 5.3 Pantallas fluorescentes**
- 5.4 Sistemas fluorescentes**
- 5.5 Fluorografía**
- 5.6 Intensificación de imágenes fluorescentes**
- 5.7 Tubos intensificadores de imagen**

Capítulo VI

" RADIOGRAFIA DE ALTO VOLTAJE "

6.1 Generalidades

6.2 Características

6.3 Técnica experimental

6.4 Aplicación de la radiografía de alto voltaje

Capítulo VII

" PROTECCION CONTRA LOS RAYOS X "

7.1 Generalidades

7.2 dosis de radiación permisibles

7.3 Control de radiaciones

7.4 Protección contra las radiaciones

Capítulo VIII

" CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES "

Capítulo IX

" APENDICES Y BIBLIOGRAFIA "

- Apéndices :**
- (1) Traducción de la norma DIN-54110**
 - (2) Equipos industriales de Rayos X**
 - (3) Traducción de la norma DIN-54111**
 - (4) Breve referencia de los ensayos con rayos Gamma.**

Capítulo I

" INTRODUCCION "

1.1 MOTIVACION E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

La creciente necesidad de control en la producción industrial ha permitido que se realicen grandes avances en el campo de los Ensayos No Destructivos.

Gran parte de dichos estudios se han realizado en el área del ensayo de materiales por rayos X. La aparición de nuevas técnicas y equipo, se ha visto favorecida por la necesidad de controlar diversos materiales, algunos de gran espesor y en distintas condiciones, con unidades que se adecuen a las distintas necesidades de cada industria.

En nuestro medio; el uso de la técnica radiográfica se ha visto incrementada en las dos últimas décadas, debido a las nuevas necesidades de control dentro de la industria pesada. Sin embargo, debo señalar, que no se han realizado trabajos de divulgación sobre estos aspectos.

Esencialmente, esta última labor, es la que pretendo realizar al elaborar el presente trabajo. Se proporciona una base teórica, más o menos completa, del fundamento de la radiografía industrial, como del equipo y de las distintas técnicas básicas utilizadas en la actualidad.

Asimismo, se proporciona información referente a los equipos y sistemas industriales de rayos X, que se pueden adquirir en el mercado nacional. Se incluye también un apéndice sobre la utilización de los rayos Gamma, como método, en el ensayo de materiales.

1.2 LOS RAYOS X EN EL CAMPO DE LA METALURGIA

La utilización de los rayos X por el hombre se origina durante los inicios del presente siglo. Inicialmente se consideró su utilización sólo en el campo de la investigación. Los primeros trabajos realizados en este sentido, fueron los que se realizaron en el campo de la cristalografía, los que se desarrollaron con el uso de las técnicas de difracción. En la actualidad, el fenómeno de difracción de los rayos X, es utilizado ampliamente en la investigación de la estructura de los materiales.

La Metalurgia, indudablemente, fue impulsada por la aplicación de estas técnicas; especialmente en el campo referente al estudio de la estructura y propiedades de los distintos metales y aleaciones.

La necesidad del estudio de la continuidad cristalina; permitió que la aplicación de los rayos X, constituya una de las armas más efectivas, en el campo de los ensayos no destructivos. Es decir, los rayos X, tomaron también un lugar en el desarrollo de la industria.

En la actualidad, la aplicación de las técnicas de difracción se han difundido ampliamente en todas las disciplinas científicas, por lo que considero oportuno hacer una breve exposición de la aplicación de la difracción de los rayos X en la Cristalografía.

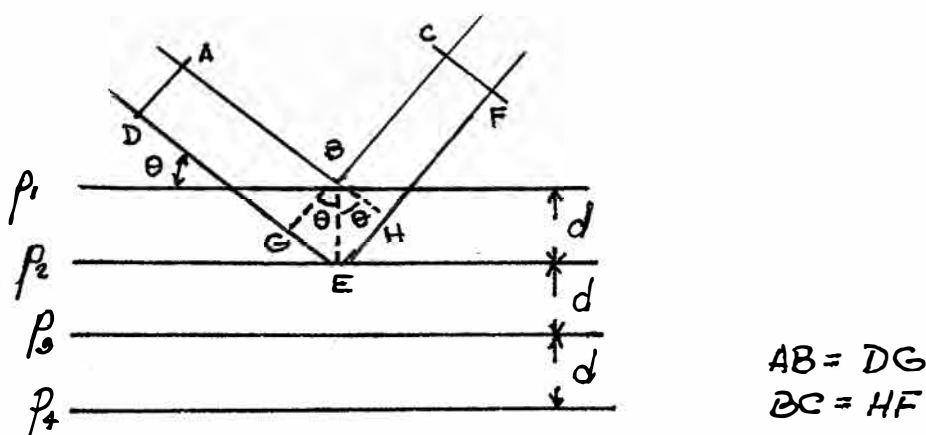
1.2.1 Cristalografía de rayos X

En 1912, diecisiete años después del descubrimiento de los rayos X y por una sugerencia de Max Von Laue, los rayos X fueron usados en el estudio de los cristales. En este año Paul Ewald que estaba realizando un trabajo sobre la difracción de ondas luminosas al pasar por un cristal; por lo que Von Laue asoció esto con la idea de utilizar un cristal como red de difracción tridimensional de ondas electromagnéticas con la misma longitud de onda que la distancia interatómica del cristal. Después de varios intentos, al hacer pasar un delgado haz de rayos X por una lámina de exfoliación de Blenda SZn , haciendo que el haz incidiera en una placa fotográfica, Al revelarse dicha placa, ésta mostró una serie de pequeñas manchas distribuidas geoméricamente alrededor de una mancha central grande producida por el haz directo de los rayos X. Esta figura reciente, era idéntica con la predicción de la difracción de los rayos X, por un conjunto regular de puntos difusores en el cristal. De esta manera se demostró

la distribución regular de las partículas atómicas en el cristal y que los rayos X tenían una longitud de onda del orden espacio cristalino.

Deducción de la ecuación de BRAGG.-

Los cristales están formados por átomos o grupos de átomos con una repetición periódica en puntos reticulares, y las caras que van a aparecer en el cristal son las paralelas a los planos atómicos que tienen mayor densidad de puntos reticulares. Paralelamente a cada uno de estos planos existe una familia de planos idénticos equidistantes. Cuando un haz de rayos X incide sobre un cristal, penetra en él y la reflexión que resulta no se produce en un solo plano sino en una serie casi infinita de planos paralelos, cada uno de ellos contribuyendo un poco a la "reflexión total". Con el fin de que la reflexión sea suficientemente intensa las reflexiones individuales deben estar en fase entre sí. Las siguientes condiciones necesarias para reforzar la intensidad reflejadas fueron demostradas por W.L. Bragg.



En la figura; p_1 , p_2 y p_3 representan la traza de una familia de planos de espaciado d . Los rayos X que inciden en cualquiera de estos planos serían reflejados a un ángulo igual al de incidencia θ , cualquiera sea el valor de θ . Sin embargo para reforzarse entre sí para dar una reflexión que pueda registrarse los rayos reflejados deben estar en fase. El camino DEF de las ondas reflejadas en E es más largo que el camino ABC de

las ondas que se reflejan en B. Si los dos conjuntos de ondas deben de estar en fase, la diferencia entre los caminos ABC y DEF debe ser un número entero de longitudes de onda ($n \lambda$). Para satisfacer las condiciones de que las dos ondas están en fase, se debe cumplir que : $GB + EH = n \lambda$

$$\begin{array}{rcl} \text{En el triángulo GBE;} & d \cdot \text{sen} \theta & = GB \\ \text{MBE;} & d \cdot \text{sen} \theta & = EH \\ \hline & 2 d \cdot \text{sen} \theta & = GB + EH = n \lambda \end{array}$$

de donde :

$$2d \text{sen} \theta = n \lambda \quad (\text{ecuación de Bragg})$$

Para un espaciado dado d y una λ dada, las reflexiones sólo se producen para aquellos ángulos que satisfacen la ecuación. Supongamos, un haz monocromático de rayos X es paralelo a una cara de exfoliación de halita y la placa se monta de tal manera que pueda girarse alrededor de un eje normal al haz de rayos X. Al girar la halita lentamente no hay reflexión hasta que el haz incidente hace un ángulo θ que satisface la ecuación de Bragg, con $n=1$. Si se continúa girando, aparecen nuevas reflexiones cuando la ecuación satisface ciertos ángulos con $n=2,3,4,\dots$. Estas se conocen como reflexiones de primer, segundo, tercer orden, etc.

Existen varios métodos de difracción:

- Método de Laue
- Método del cristal giratorio
- Método del polvo

El método del polvo encuentra su principal aplicación en Mineralogía, como una técnica de identificación. Se puede utilizar en este caso sin conocimiento de la estructura o simetría. Cada sustancia cristalina da lugar a su propia foto de polvo, que, al depender de su estructura interna, es característica de la sustancia dada.

1.2.2 Inspección No Destructiva

Los ensayos no destructivos constituyen una disciplina tecnológica que comprende una serie de métodos reunidos en torno a una filosofía determinada por el concepto fundamental de asegurar la calidad tecnológica de materiales, piezas o productos y condicionada por los factores inherentes a toda actividad industrial y por aquellos que hacen a la seguridad humana.

Si bien desde épocas remotas se conocen algunos métodos para ensayar materiales o productos sin modificar sus condiciones de uso; el desarrollo de los ensayos no destructivos como disciplina tecnológica es muy reciente. Se inicia a principios del si glo con la incorporación de métodos basados en la aplicación de conocimientos elaborados, fundamentalmente de la física.

En las dos últimas décadas la aceleración del desarrollo tecnológico, automatización industrial, transporte aéreo masivo industria nuclear, navegación espacial, modifican dramáticamente los conceptos de rentabilidad, seguridad y confiabilidad planteando una infinidad de nuevos problemas en torno de los ensayos no destructivos transformados entonces en una verdadera disciplina con una filosofía definida que la ubica como el principal elemento para asegurar el control de calidad tecnológica.

En las actuales circunstancias el campo de aplicación de los ensayos no destructivos aparece tan sorprendentemente amplio y su influencia en el control de calidad tecnológica tan decisiva que asistimos a un verdadero desarrollo explosivo de los mismos.

El ensayo no destructivo como disciplina tecnológica comprende todos los métodos que permiten la inspección o ensayo de materiales, piezas e productos sin modificar sus condiciones de uso o capacidad de servicio. Una característica distintiva del ensayo no destructivo es que usualmente determina las condiciones de aptitud del material o pieza ensayada mediante la evaluación de características e propiedades que no están relacionadas en forma directa a aquellas que determinan su aptitud de servicio.

Desde el punto de vista general de objetivos perseguidos por el ensayo no destructivo, se puede agrupar en la siguiente forma:

- Asegurar la calidad tecnológica de productos, materiales o equipos aumentando su confiabilidad.
 - Prevenir accidentes y asegurar vidas humanas
 - Producir beneficios económicos a sus usuarios
- Contribuir en la investigación y desarrollo tecnológico

Tipos de ensayos.-

- Ensayos con líquidos penetrantes
- Ensayos por medio de radiaciones
 - Rayos X
 - Rayos Gamma
- Ensayos con partículas magnéticas
- Ensayos con partículas electrificadas
- Ensayos con corriente eléctrica
- Ensayos con corriente Eddy
- Ensayos Ultrasónicos

Aplicación de los ensayos no destructivos.-

Para lograr una aplicación eficiente de los ensayos no destructivos se debe establecer una correlación entre las propiedades medidas y la capacidad de uso de dicho objeto. En esta relación se deben considerar los siguientes aspectos.

- Para cada material
- Para cada método de fabricación o de tratamiento del material
- Para cada método de ensayo
- Para cada tipo de uso del material

En general los ensayos no destructivos son generalmente cualitativos, mientras que los ensayos destructivos son cuantitativos.

Elementos básicos en el Ensayo No Destructivo.-

- 1.- Una fuente; que proporcione en forma adecuada una distribución apropiada de la prueba a realizarse.
- 2.- Un detector sensible; que detecte todo cambio con respecto a un patrón de respuesta medio.
- 3.- Un significado de las indicaciones o registro de las señales del detector en forma que sea sencillo, para su posterior interpretación.
- 4.- Un observador, capaz de interpretar las señales o indicaciones registradas, en términos del material ensayado, vale decir, de sus propiedades.

1.3 OTRAS APLICACIONES

La investigación tecnológica ofrece un vasto campo de posibilidades en cuanto a la aplicación no industrial de los rayos X .

Sería casi imposible tratar de enumerar los estudios que se están realizando con la ayuda de la radiación X; gran porcentaje de estos estudios se refieren al campo de la medicina y de la química.

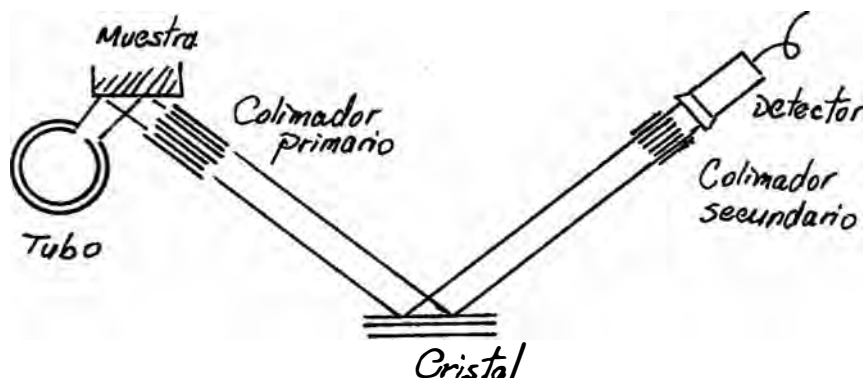
A continuación se presentan algunas aplicaciones específicas de interés.

1.3.1 Espectrometría de rayos X

En el área que nos interesa debemos señalar, como un gran campo de aplicación, los ensayos y análisis por espectrometría de rayos X y espectrometría por fluorescencia de rayos X, esta última técnica se viene aplicando ampliamente en la industria del fierro y del acero.

La espectrometría por rayos X es una rápida, no destructiva, cualitativa y cuantitativa técnica de determinación de elementos que se presentan en una muestra de material. Puede ser usada en la determinación de todos los elementos de la tabla periódica, desde el más pesado hasta el fluor de número atómico 9. Recientes trabajos indican que se pueden efectuar análisis de elementos aun menos pesados.

La técnica se basa en el hecho de que usando un haz de rayos X, dirigido sobre la superficie de una muestra, radiación secundaria o fluorescente es emitida por la muestra, dicha radiación contiene longitudes de onda, las cuales son características, cualitativamente y cuantitativamente de cada elemento presente. Mediante un colimador, un haz paralelo de la radiación secundaria es dirigido sobre un cristal, el cual, separa las ondas de acuerdo a su longitud. A su vez son reflejadas dentro de un explorador o detector de radiación montado en un goniómetro de alta precisión.



Desde que la posición angular del cristal y del goniómetro, es una función de la longitud de onda, los elementos que constituyen la muestra, pueden ser identificadas y, desde que la intensidad de la radiación de cada longitud de onda es proporcional a la concentración de un elemento al cual le corresponde, la cantidad de cada elemento presente puede ser determinada.

Las ventajas de esta técnica sobre el análisis químico tradicional, es su selectividad, versatilidad, exactitud y rapidez.

1.3.2 Microrradiografía por Rayos X

Esta técnica consiste en radiografiar con rayos X de características definidas una sección muy delgada de un material, utilizando para el registro de la imagen película o placas fotográficas de grano muy fino. Aunque está basada en los mismos principios que la macrorradiografía, su realización requiere atenciones especiales; tanto en lo que se refiere a las características de la radiación utilizada, como en la preparación y disposición de la muestra. Como en la macrorradiografía, deben buscarse las condiciones para obtener un buen contraste y una buena definición. Debido a que las longitudes de onda largas, por su mayor selectividad, proporcionan mejor contraste, parece lo ideal usar rayos X de muy pequeña energía; sin embargo el uso de tales radiaciones supone una gran dificultad cuando el material que se estudia contiene elementos cuyos coeficientes de absorción son grandes. La microrradiografía fue dada a conocer en 1898 por Heycock y Neville, quienes la aplicaron al estudio de estructuras dendríticas de aleaciones binarias enfriadas lentamente. Esta técnica se fue desarrollando progresivamente y han sido numerosos los investigadores que lo han aplicado en estudios muy diversos. Así, en 1913, Geby estudió minerales y fósiles empleando radiaciones de muy poca energía. En 1930 Dauvillier, y en 1936 Lamarque obtuvieron microrradiografías de células animales y vegetales. Ya en años más recientes, son innumerables los trabajos que aplican la microrradiografía para estudiar aleaciones y minerales.

Capítulo II

" TECNOLOGIA DE LA FORMACION DE LA IMAGEN RADIOGRAFICA "

2.1 NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LOS RAYOS X

2.1.1 Origen de los Rayos X

Los rayos X fueron accidentalmente descubiertos por Wilhelm Conrad Roentgen en 1895 mientras estaba experimentando en la producción de rayos catódicos en tubos de descarga cubiertos con papel negro. El haz de electrones en el tubo de descarga, incidiendo en el vidrio del mismo, producía una radiación X de pequeña intensidad que provocaba la fluorescencia de un material fluorescente próximo. Roentgen dedujo correctamente que había producido un nuevo tipo de radiación electromagnética penetrante, denominándola Rayos X por una serie de misterios conectados con ella.

Los rayos X se originan por la interacción de electrones suficientemente acelerados con la materia. Como consecuencia de esta interacción, la materia emite dos tipos de radiación X: radiación característica y radiación continua. La radiación característica se produce cuando un electrón acelerado choca con un electrón de un piso interno del átomo y lo desplaza de él; el átomo queda ionizado y entonces otro electrón de un piso más externo del mismo cae en el lugar que dejó vacante el electrón expulsado, con el resultado de la emisión de un cuanto de energía, cuya frecuencia es característica del átomo excitado.

Un electrón acelerado también puede perder energía si en vez de chocar con un electrón de un piso próximo al núcleo, es frenado al atravesar el fuerte campo existente alrededor de él. Esta pérdida de energía aparece entonces también en forma de un cuanto de rayos X, pero cuya frecuencia es independiente de la naturaleza del átomo causante del fenómeno. La radiación que de esta forma se emite aparece como una banda de longitudes de onda que varían de forma continuada.

2.1.2 Naturaleza de los Rayos X

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas de la misma naturaleza que la luz ordinaria, pero de longitudes de onda mucho más cortas que las de ésta. En el espectro de radiaciones electromagnéticas ocupan una región situada entre los rayos gamma y los ultravioleta. Lo mismo que ocurre con las radiaciones ultravioleta, visible e infraroja, al estudiar los rayos X se supo la dualidad de su naturaleza, pues para explicar los distintos fenómenos a que dan lugar, unas veces hay que considerarlas como ondas y otras como partículas.

Para medir las longitudes de onda de los rayos X se utiliza como unidad el Angstrom (\AA) que es igual a 10^{-8} cm.; algunas veces se expresan estas longitudes de onda en unidades de KX, siendo $1 \text{ KX } 1,00202 \text{ \AA}$

2.1.3 Espectro de rayos X de un elemento

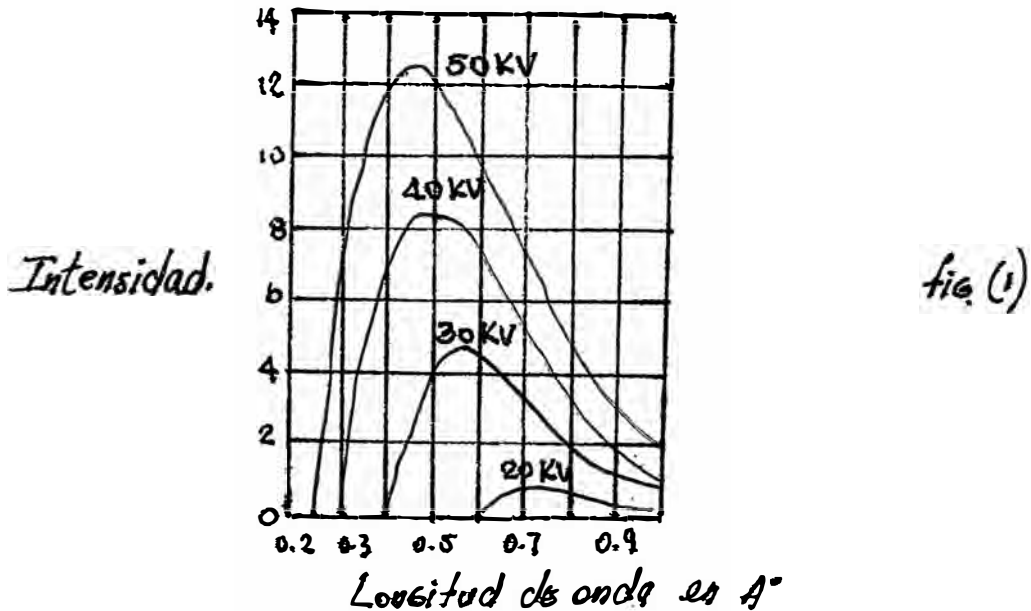
Como ya se indicó anteriormente, el espectro de rayos X de un elemento está constituido por dos partes: un espectro continuo formado por una extensa banda de longitudes de onda y un espectro de líneas intenso, que corresponde a longitudes de onda determinadas; y que aparecen superpuestas al espectro continuo. Esto se comprueba fácilmente por análisis de la radiación mediante una red natural de difracción (cristal natural) y fotografiando o registrando electrónicamente el espectro producido.

Si se usan electrones para la producción de rayos X, se les proporciona la energía cinética necesaria para la emisión, sometiendo a un tubo de rayos X a una diferencia de potencial apropiada. Los electrones producidos en el cátodo son así acelerados y llegan al ánodo o anticátodo que es donde tiene lugar la emisión. Si e es la carga del electrón, m su masa, V la diferencia de potencial en el tubo y v la velocidad del electrón en el momento del impacto, la energía cinética E que posee en dicho momento, viene dada por la ecuación:

$$E = e \cdot V = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

La mayor parte de la energía cinética de los electrones en el impacto se convierte en calor, y solo menos del 1% se transforma en rayos X.

El espectro continuo o radiación blanca está formado por una sucesión continua de longitudes de onda y, por tanto, de energías. Estudiando la distribución de esta energía en función de la intensidad de la radiación y del voltaje aplicado al tubo, se obtiene una gráfica como la de la figura (1), que corresponde al espectro del Volframio.



Se observa que los límites de longitudes de onda dependen del voltaje aplicado al tubo y que el límite en el extremo de las longitudes cortas se desplaza progresivamente hacia la izquierda, es decir, a valores más bajos, a medida que se va elevando el potencial del tubo. Las intensidades crecen con este potencial y en todos los casos aumentan con la longitud de onda, hasta llegar a un valor máximo para luego decrecer. Estos máximos se desplazan hacia la región de longitudes de ondas cortas al aumentar el voltaje.

La emisión del espectro continuo se explica teniendo en cuenta lo indicado anteriormente; este espectro se produce cuando los electrones son frenados por el campo eléctrico de los núcleos de los átomos del elemento anticátodo. Este frenamiento, o lo que es lo mismo, esta pérdida de energía cinética, no es igual para todos los electrones, pudiendo ocurrir desde que en el frenamiento pierdan toda su energía cinética (límite definido de la región izquierda de las curvas de la figura 1) hasta que dicha pérdida sea muy pequeña (límite no definido de la región izquierda de dichas curvas), además, los electrones pueden ir perdiendo poco a poco

su energía cinética por frenamientos sucesivos. Cada pérdida, sucesiva o no, de energía, supone un proceso cuántico, y, por tanto la emisión de un fotón de energía $h \nu$.

Se puede calcular el límite de la curva de distribución de energía del espectro continuo en la región de longitudes de ondas cortas, considerando lo anteriormente dicho en el sentido de que este límite corresponde a la emisión producida por los electrones que han perdido toda su energía cinética. Para tales electrones se verifica :

$$E = V \cdot e = h \cdot \nu_{\max} \quad (2)$$

donde V es el potencial aplicado, e la carga del electrón (4.802×10^{-10} u.e.s. 1.602×10^{-20} u.e.m.), h la constante de Plank (6.62×10^{-27} erg.seg) y ν la frecuencia de la radiación excitada. Per otra parte :

$$\nu_{\max} = c / \lambda_{\min} \quad (3)$$

siendo c la velocidad de la luz (2.998×10^{10} cm/seg) y λ la longitud de la onda de la radiación. Sustituyendo este valor de ν en la ecuación (2) y despejando λ , se tiene :

$$\lambda_{\min} = h \cdot c / V \cdot e \quad (4)$$

y teniendo en cuenta los valores correspondientes :

$$\lambda_{\min} = \frac{6.624 \times 10^{-27} \times 2.998 \times 10^{10}}{V \times 1.602 \times 10^{-20}} = \frac{12,400}{V} \quad (5)$$

donde, V se expresa en voltios, con lo que λ_{\min} vendrá dada en unidades angstrom.

La razón de que los máximos de las curvas de la figura (1) se desplace hacia la izquierda y tengan un valor mayor a medida que aumenta el voltaje del tubo, es que el número de fotones producidos por segundo y la energía media del fotón también aumentan con dicho voltaje. La energía total de rayos X emitida por segundo, representada por el área bajo las curvas intensidad -, longitud de onda de la figura (1), también depende del número atómico Z , del anticátodo y de la corriente electrónica i del tubo de rayos X, por lo que esta energía total viene da-

da por :

$$I_{\text{espec. cont.}} = A \cdot i \cdot Z \cdot V^m \quad (6)$$

donde A es una constante de proporcionalidad y m otra constante cuyo valor es aproximadamente, 2. De esta ecuación se deduce que para obtener una radiación con gran proporción de espectro continuo, debe operarse al voltaje más alto posible y utilizar un anticátodo de un metal de número atómico elevado, por ejemplo, Volfranio. Conviene señalar que si bien la intensidad de la radiación continua depende del metal del anticátodo, no así la distribución de longitudes de onda.

Ya se ha mencionado que el espectro característico de rayos X se origina si un electrón desplaza de su posición a un electrón de un piso interno del átomo, próximo al núcleo, quedando el átomo excitado y ocupando entonces la vacante un electrón de un piso más externo. Para que esta excitación se produzca, es preciso que la energía del electrón que llega al átomo tenga un valor crítico (ec. 1) para poder expulsar un electrón de un determinado piso que, como se ve, depende del voltaje del tubo. Por ello, cuando este voltaje supera un valor crítico, característico del material del anticátodo aparecen superpuestas al espectro continuo unas rayas intensas, de longitudes de onda definidas, que constituyen el espectro característico del elemento anticátodo. Este espectro tiene pocas rayas, las cuales se agrupan en "conjuntos" o series como las K, L, M, N en sentido creciente de longitudes de onda. Las series K y L fueron descubiertas por Barkla e identificadas por W. H. Bragg. Las series M y N se descubrieron posteriormente utilizando espectrógrafos de vacío. Las series K y L fueron estudiadas sistemáticamente por Moseley, usando como anticátodo 38 elementos diferentes; observó que cada serie consistía de unas pocas líneas y que estas mismas líneas aparecían siempre en el espectro de los distintos elementos estudiados, aunque con longitudes de onda diferentes, encontrando que la longitud de onda de cada línea en particular decrecía cuando el número atómico del elemento emisor aumentaba, y estableció su famosa ley que relaciona la frecuencia $\sqrt{\nu}$ con el número atómico :

$$\sqrt{\nu} = c (Z - \sigma) \quad (7)$$

donde c y \sqrt{L} son constantes.

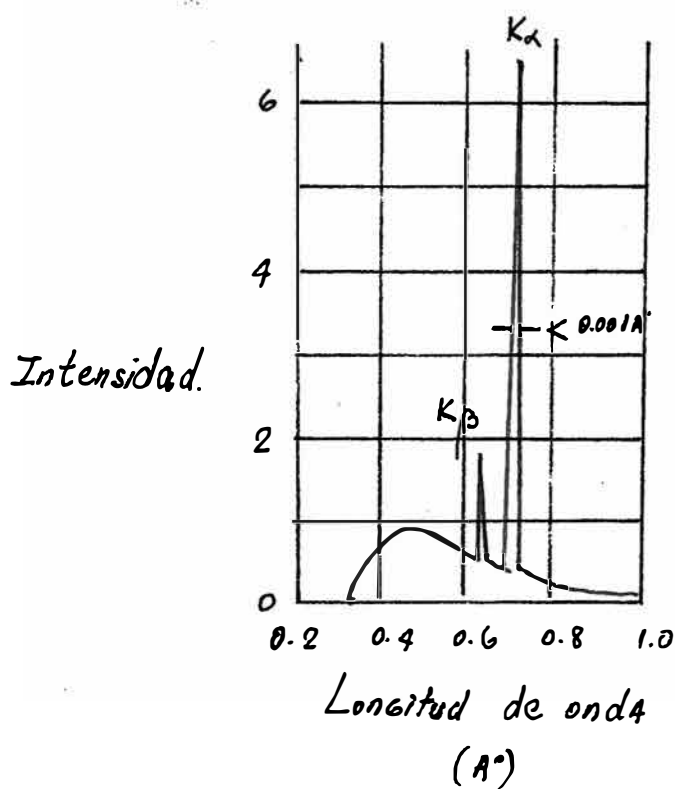
Las líneas de la serie K se emiten cuando las vacantes del piso K son ocupadas por electrones de pisos más externos; si el electrón procede del piso L, se emite radiación K_{α} ; si lo es del piso M, la radiación emitida es la K_{β} . Si tales transiciones son a vacantes del piso L, se emiten radiaciones L, etc.

La figura (2) muestra una representación esquemática del espectro del Melibdeno a 35 Kv. La radiación K no se excita hasta los 20,1 Kv de forma que esta curva para voltajes superiores a este valor, no mostrarán los máximos correspondientes a las radiaciones K_{β} y K_{α} .

Al elevar el voltaje por encima del valor crítico, aumenta la intensidad relativa de las líneas características con respecto a la intensidad del espectro continuo, pero sin cambiar sus correspondientes longitudes de onda. La intensidad de cualquier línea característica, medida por encima de la del espectro continuo depende de la corriente electrónica del tubo i , y del incremento del voltaje a partir del crítico de excitación de la línea considerada. Por ejemplo, para una línea K, la intensidad viene dada por :

$$I_k = B \cdot i (V - V_k)^n \quad (8)$$

donde B es una constante de proporcionalidad, V_k el voltaje de excitación K y n una constante aproximadamente igual a 1.5



2.1.4 El fenómeno de Absorción

La propiedad más importante de los rayos X desde el punto de vista de su aplicabilidad a la radiografía, es la de penetrar sustancias o cuerpos opacos a la luz ordinaria. Sin embargo existe una interacción entre los átomos de un material y los rayos X que llegan a ellos. Debido a esto, parte de los rayos atraviesan la materia y parte son absorbidos. Lo mismo que para la luz ordinaria cuando atraviesa un medio imperfectamente cristalino o transparente, se ha comprobado para los rayos X que la fracción de la intensidad incidente que se absorbe cuando dichos rayos atraviesan un medio homogéneo, es proporcional al espesor atravesado, lo que en forma diferencial se expresa por :

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (9)$$

ecuación en la que μ es el coeficiente de absorción lineal, que depende de la clase de material atravesado, de su densidad y de la longitud de onda de los rayos X. Integrando la ecuación anterior, adquiere la forma :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (10)$$

en la que I representa la intensidad transmitida a través del espesor x , e I_0 la intensidad incidente. Es más lógico expresar la ecuación (10) en función del coeficiente másico de absorción, en vez del lineal, ya que éste es proporcional a la densidad ρ , llamando μ_m al coeficiente másico de absorción:

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (11)$$

Esta relación es una constante del material e independiente de su estado físico. La ecuación (10) se convierte entonces en :

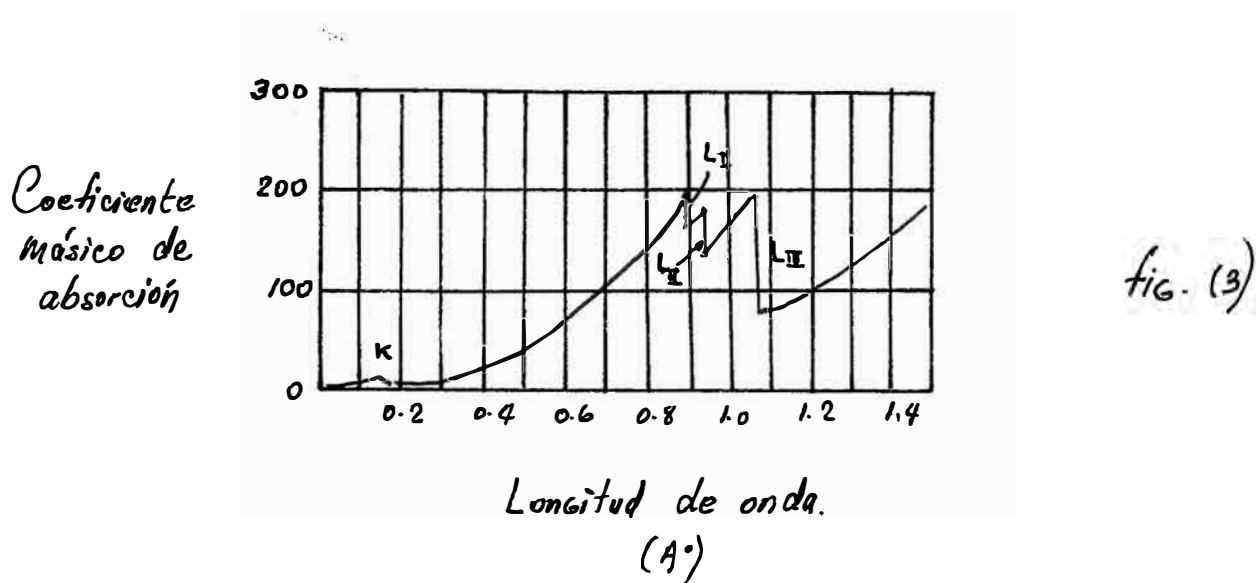
$$I = I_0 \cdot e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho x} \quad (12)$$

Cuando el material absorbente a los rayos X no está constituido por un elemento simple, sino que es una aleación, un compuesto químico, etc. su coeficiente másico de absorción se calcula fácilmente a partir de los constituyentes y de la composición. Por ejemplo si se trata de determinar el coeficiente másico de absorción del Fe_2O_3 , para una longitud de onda $K\alpha$ del Ni 1.6591 el Fe_2O_3 contiene 70% de Fe y 30% de O_2 , y los coeficientes másicos de absorción del hierro y del oxígeno para dicha longitud de onda son 392 y 16.2 respectivamente.

El coeficiente másico de absorción para el Fe_2O_3 es entonces :

$$\begin{aligned} (u/\rho)_{\text{Fe}_2\text{O}_3} &= 0.7 (u/\rho)_{\text{Fe}} + 0.3 (u/\rho)_{\text{O}_2} \\ &= (0.7 \times 392) + (0.3 \times 16.2) = 279.26 \end{aligned}$$

Estudiando cómo varía el coeficiente de absorción de un elemento con la longitud de onda, se observa que dicho coeficiente disminuye rápidamente al decrecer dicha longitud de onda, pero que esta disminución no es continua, sino que la curva correspondiente presenta discontinuidades bruscas cuando la longitud de onda llega a ciertos valores críticos llamados bordes de absorción. Así, en la figura (3), se ha dibujado la curva que representa la variación del coeficiente másico de absorción del Platino con la longitud de onda; se puede observar que entre 1.5 y 1.07 Å, la absorción del platino decrece rápidamente para aumentar en forma brusca en el borde de absorción L_{III} ; vuelve a disminuir y de nuevo aparecen otros dos máximos en los límites L_{II} y L_{I} ; otra vez la absorción disminuye hasta 0.16 Å, donde hay un nuevo aumento brusco de la absorción (borde de absorción K).



Estos aumentos o discontinuidades de la curva de absorción se explican teniendo en cuenta que al ir disminuyendo la longitud de onda y, por tanto, aumentando la frecuencia, se llega a un punto en el que la energía del fotón de rayos X es suficiente para expulsar un electrón de un piso electrónico próximo al núcleo y entonces gasta toda su energía, siendo absorbido. Así en la figura (3) todas las longitudes de onda más cortas que el borde de absorción K (0.16 Å) poseen suficiente energía para expulsar electrones K, y aquellas más próximas a 0.16 Å son fuertemente absorbidas.

En radiografía, son aprovechados los rayos que después de atravesar el material a radiografiar llegan, por ejemplo, a una placa fotográfica y han sido absorbidos diferencialmente de acuerdo con la heterogeneidad de dicho material, debido a diferencias fuertes en el espesor o en la composición. Pero también llegan a la placa radiaciones secundarias que no contribuyen a la formación de la imagen, sino a interferir su calidad. Estas radiaciones dadas, se producen por la difusión de la radiación incidente sin cambio de longitud de onda y a modificaciones de dicha radiación; esto último da lugar a radiaciones de menor energía (efecto Compton) y a radiaciones de fluorescencia (efecto fotoeléctrico) que, por tener su origen en el mismo material que se ensaya, no siguen la geometría de haz incidente que procede de un foco único y puntual.

Realmente, la pérdida de intensidad de un haz de rayos X es el resultado de los efectos de la verdadera absorción y de la difusión, de forma que el coeficiente μ/ρ es una suma de dos términos: el coeficiente verdadero de absorción τ/ρ y el coeficiente de difusión

El coeficiente de absorción verdadero; está relacionado con la longitud de onda λ , de la radiación primaria y con el número atómico Z del elemento absorbente por la ley de Bragg y Pierce.

$$\frac{\tau}{\rho} = K \cdot Z^4 \cdot \lambda^3 \quad (13)$$

donde K es una constante. Como se deduce de la ecuación, este coeficiente varía mucho con λ y Z; por ello, una longitud de onda larga tiene un poder de penetración mucho más pequeño que una

corta, y un elemento de número atómico elevado es mucho más absorbente que uno de número atómico bajo.

El coeficiente de difusión contribuye mucho menos que a la absorción total. Representa la difusión no modificada y modificada. Aunque también varía con la longitud de onda, lo hace en mucho menor escala; para los elementos muy ligeros (Be o Li) prácticamente es constante e independiente de la longitud de onda, siempre que ésta sea $0,2 \text{ \AA}$ e más; para elementos más pesados que el Be, hasta el número atómico 20, este coeficiente es casi proporcional al producto del número atómico por la longitud de onda, cuando ésta es mayor de $0,1 \text{ \AA}$. Tratándose de elementos pesados, el coeficiente de difusión varía ya de forma compleja y aumenta con relativa rapidez si la longitud de onda es superior a $0,2 \text{ \AA}$.

2.2 FORMACION DE IMAGENES RADIOGRAFICAS

2.2.1 Consideraciones Geométricas

2.2.1.1 Geometría de la formación de imágenes

La calidad de una imagen radiográfica, independientemente de su método de registro o de observación está condicionada en gran parte por factores de tipo geométrico, teniendo en cuenta que la radiación X se propaga en línea recta, lo mismo que la luz ordinaria. Exclusivamente desde este punto de vista geométrico son comparables en cuanto a su formación las imágenes ópticas y las radiográficas: son la consecuencia de la producción de sombras más o menos intensas o nítidas, al atravesar la radiación cuerpos más o menos opacos o con opacidades diversas. El efecto perjudicial de la radiación secundaria, que tanto afecta a la calidad de la radiografías, no se considera en esta sección, ya que interviene de un modo secundario y su origen es diferente del de la radiación directa o aprovechable.

Supongámselo un foco ideal (puntual) emisor de rayos X y que en el haz emitido se interpone un objeto opaco a esta radiación, si se coloca debajo del objeto una película fotográfica, esta quedará impresionada con una sombra o ennegrecimiento debido al objeto, que se denomina imagen radiográfica del objeto.

Más fácilmente se comprende esto si, teniendo en cuenta la analogía entre la propagación de los rayos X y de la luz ordinaria se considera en la figura (4), en la que F representa un foco de luz, O la sección de un objeto y C una cartulina blanca; la sombra

que produce este objeto queda patente en la cartulina. Dicha sonbra o imagen del objeto, tal como se aprecia en la figura,,es de mayor tamaño que éste. Es fácil deducir que de la observación de dicha figura que la imagen en cuanto a dimensiones, será más real cuanto más próxima se encuentre el objeto de la cartulina y cuanto más alejado esté el foco de luz.

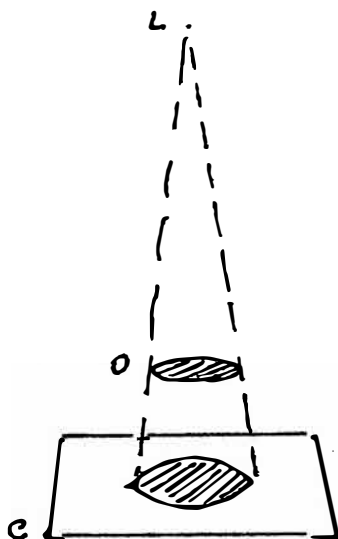


fig. (4)

Desde el punto de vista cuantitativo, puede decirse que la magnitud de una dimensión del objeto proyectada en la imagen es a su valor real, como la distancia del foco a la cartulina es a la distancia de dicho foco al objeto.

Si el foco de luz no es puntual, en la figura (5), entonces se produce una penumbra o difusión de contornos, que es más extensa cuanto más próximo está al objeto y cuando mayor es la separación entre el objeto y la cartulina.

Cuando el haz de luz no es perpendicular al objeto, la imagen que se obtiene aparece distorsionada, en mayor o menor grado, de acuerdo con la falta de perpendicularidad como se observa en la figura (6). También se produce la distorsión si el plano del objeto y el de la cartulina no son paralelos.

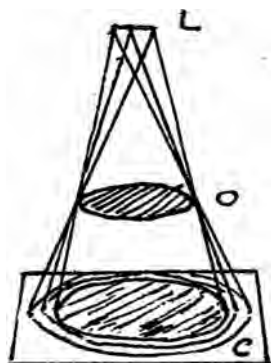


fig (5)

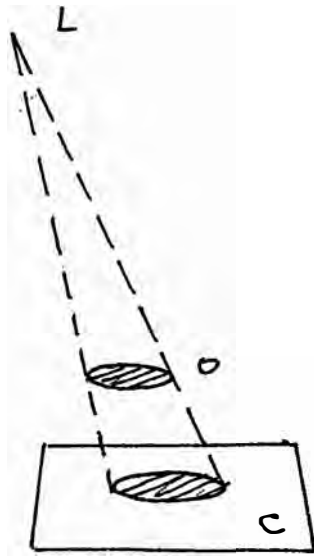


fig. (6)

2.2.1.2 Imágenes Radiográficas

Al aplicar las consideraciones geométricas de formación de imágenes ópticas a la formación de imágenes radiográficas, y como ya se indicó anteriormente, se prescinde ahora de los efectos de difusión que originan las radiaciones secundarias. Además a los motivos de distorsión de imagen debido a tamaño del foco y posiciones relativas del objeto e imagen, hay que sumar las que se derivan de la consideración de que, en la práctica, los objetos que se radiografían tienen espesores grandes o pequeños, pero en todo caso apreciables; ocurre entonces que unas partes están más próximas que otras a la película fotográfica y, por ello, más alejadas del foco de rayos X, y también puede suceder que los planos de algunos de los defectos o irregularidades no se encuentran en posición perpendicular con respecto a los rayos que reciben. Se comprende que por estas causas siempre aparecen distorsionadas las imágenes radiográficas y aunque esta distorsión no puede eliminarse totalmente, si es posible disminuirla hasta un grado que no interfiera la interpretación, alejando el foco de rayos X todo lo posible dentro de los límites razonables y procurando la mayor proximidad y paralelismo entre el objeto y la película radiográfica.

Basándose en estas consideraciones de tipo geométrico al hacer una radiografía se deben seguir las siguientes reglas:

- 1.- Los rayos X deben proceder de un foco lo más puntal posible. Con ello se consigue mayor detalle o definición en las imágenes. Cuando un tubo de rayos X ha de soportar energías elevadas, un foco de dimensiones pequeñas no resiste sin deterioro la gran cantidad de calor generado en él; en estos casos, las mayores dimensiones del foco se compensan aumentando la distancia foco-película. Los tubos modernos de rayos X se clasifican de acuerdo con el tamaño del foco y, normalmente estos tamaños oscilan entre 0.5 a 10 mm. Por efecto del calor desarrollado en el ánodo y de las "picaduras" que en él se producen con el uso prolongado de un tubo de rayos X, se puede alterar el tamaño del foco adquiriendo además una superficie irregular en la que cada punto actúa como una fuente de rayos X.

- 2.- La distancia entre el foco de rayos X y la película debe ser la mayor, que dentro de lo práctico, sea posible; de esta forma se mejora la definición de la imagen y su tamaño es más real.

Esto es particularmente importante, cuando se radiografían piezas de relativo gran espesor, para disminuir las diferencias de definición y de amplificación entre las imágenes producidas por las partes más alejadas y por las más próximas a la película.

3.- La distancia entre el objeto y la película fotográfica debe ser la mínima. Esta distancia también afecta a la definición y al tamaño de la imagen. Cuando el objeto que se radiografía presenta una superficie curvada, la película debe adaptarse a esta superficie, utilizando un chasis flexible para conseguir la mayor proximidad entre todas las partes del objeto y la película.

4.- Se debe procurar que el haz central de radiaciones X sea perpendicular al objeto y, simultáneamente, cuando la forma del objeto lo permita, hay que mantener un paralelismo entre el objeto y la película. Se disminuye así la distorsión de la imagen.

5.- Es preciso que durante la exposición permanezca inmóvil el sistema feñco-película-, evitando cualquier movimiento o vibración que tienda a alterar este reposo.

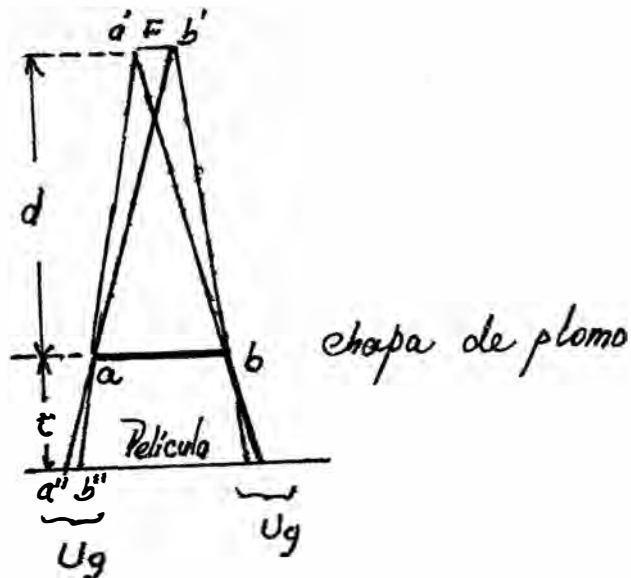


fig. (7)

2.2.1.3 Extensión de la Penumbra

De acuerdo con la figura (7) se puede calcular la intensidad de la penumbra o difusión debida a factores geométricos. En esta figura, la imagen que registra la película fotográfica es la silueta de la chapa de plomo que se encuentra a una distancia t de dicha película; F representa la dimensión máxima proyectada de la superficie focal, d es su distancia a la película fotográfica y P la penumbra geométrica.

Puesto que los triángulos $aa'b'$ y $aa''b''$ son semejantes se puede escribir:

$$\frac{a''b''}{a'b'} = \frac{P}{F} = \frac{t}{d} \quad (14)$$

$$\text{de donde} \quad P = F \cdot t / d \quad (15)$$

La relación (15) se resuelve por medio de un monograma conociendo t , F y d es posible conocer la extensión de la penumbra.

2.2.1.4 Tamaño focal Verdadero y Efectivo

Para los efectos de emisión de rayos X, el tamaño focal es toda la extensión del anticátodo que recibe el bombardeo del haz de electrones procedentes del cátodo; esta extensión es por tanto el tamaño verdadero o real del foco. Por las posiciones relativas usuales del cátodo y anticátodo en un tubo de rayos X, la proyección del foco tiene unas dimensiones menores y forma distinta de las reales, dimensiones que representan el tamaño efectivo del foco. Por lo tanto, el haz de rayos X que sale del tubo lo hace como si procediera, en cuanto a tamaño, de un foco cuyas dimensiones fueran las de su proyección en la ventana de salida del tubo. En la figura (8) se muestra un esquema explicativo de esto, haciéndose notar que el rectángulo que representa el tamaño real del foco, se reduce en la proyección a un cuadrado representativo de su tamaño efectivo.

Esta disposición del ánodo y del cátodo tiene la notable ventaja de que, con un foco de suficiente tamaño para absorber y disipar el calor generado durante el bombardeo electrónico, se obtiene un haz de rayos X más intenso y de características de formación de imagen mejores que el que correspondería al tamaño real.

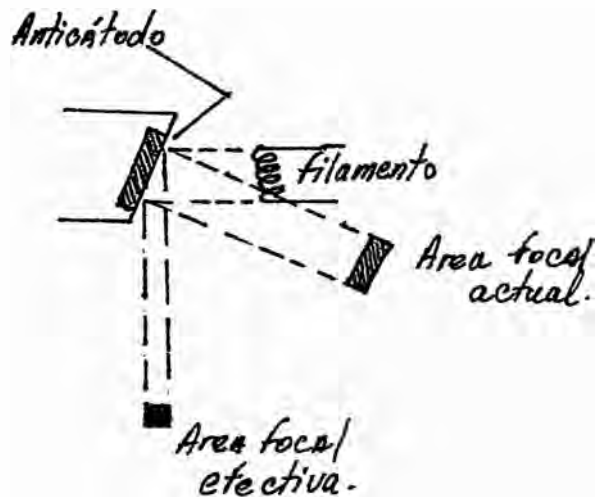


fig. (8)

2.2.1.5 Medida del tamaño focal

Debido al deterioro del foco de un tubo de rayos X con su uso prolongado, es conveniente conocer periódicamente las dimensiones efectivas del mismo. Un sencillo método fotográfico -- que se describe a continuación, dá resultados prácticamente suficientes.

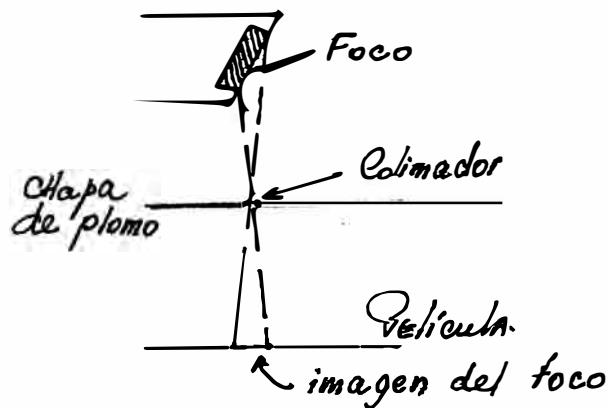


fig. (9)

Siguiendo el esquema de la figura (9), exactamente en el punto medio de la distancia foco-película, se coloca una chapa de plomo de unos 4 mm de espesor, en la cual se ha practicado un orificio de unas décimas de milímetro de diámetro, lo más perfecto -- posible y para lo cual sirve una aguja. Después de atravesar el orificio, los rayos X impresionan en la película fotográfica la imagen del foco efectivo del tubo, el tamaño de la cual es el de éste multiplicado por dos veces el diámetro del orificio. No deben emplearse distancias foco-película grandes, para evitar las -- prolongadas

exposiciones que se requieren en el método, no tampoco debe ser excesiva la densidad de imagen para que ésta no resulte borrosa.

2.2.2 Factores de Exposición

2.2.2.1 Generalidades

La imagen registrada por una película radiográfica es consecuencia de la acción fotoquímica de los rayos X, que después de atravesar el objeto que se ensaya; llegan a ella. Aparte de la película (sus características), el intervalo de densidades radiográficas correcto que se requiere para que la interpretación - sea satisfactoria, depende de las cantidades de radiación que llegan a la película. Esta radiación es la suma de la directa o primaria, es decir, la que procede directamente del tubo de rayos X y de la difundida por el objeto u otras partes del material afectadas por la radiación primaria. Esta radiación primaria es la- que hay que aprovechar y, por tanto, considerar, mientras que la secundaria es la que hay que evitar. Las consideraciones que se hagan deberán serle en este sentido.

A la formación de imágenes radiográficas también pueden contribuir otros agentes adicionales, como lo son la luz visible - emitida por la fluorescencia provocada en pantallas por los rayos X, y los fotoelectrones procedentes de las pantallas metálicas, también por la acción de los rayos X, pero estos fenómenos son igualmente consecuencia de radiaciones que llegan a la película.

La cantidad de radiación directa que llega a la película depende de los siguientes factores :

- a.- Cantidad de la radiación que sale del tubo, al igual que la calidad de la misma (Kilovoltaje, miliamperaje y tiempo de emisión)
- b.-- Cantidad e intensidad de radiación que llega al objeto (dis- tancia foco-objeto, e, aproximadamente, distancia foco-película)
- c.- Clase y espesor de la pieza

2.2.2.2 Cantidad y calidad de la radiación emitida por el tubo

La cantidad de radiación emitida por un tubo de rayos X es proporcional a la intensidad de la radiación y la tiempo durante el cual ésta se emite, si otros factores permanecen constantes; por lo tanto, también le es a su producto

$$Q = i \cdot t \quad (14)$$

donde Q es la cantidad de radiación, i la intensidad y t el tiempo, entendiéndose por intensidad la cantidad de energía de rayos X que llega

a la superficie en la unidad de tiempo. Tal intensidad depende - del kilovoltaje aplicado al tubo, de la corriente electrónica que pasa por el mismo, y del número atómico del elemento anticátodo.- Sin embargo, no puede establecerse una relación cuantitativa sencilla de estas magnitudes, pues existen otros factores tales como los que son consecuencia del circuito del equipo de rayos X, que también afectan a la intensidad de la radiación emitida. No obstante, si se suponen constantes las demás condiciones operatorias la intensidad es aproximadamente proporcional al miliamperaje del tubo. Esta proporcionalidad es exacta si la forma de la curva de voltaje no varía con la carga. La variación de la intensidad con el miliamperaje para un mismo intervalo de longitudes de onda se muestra en la figura (10).

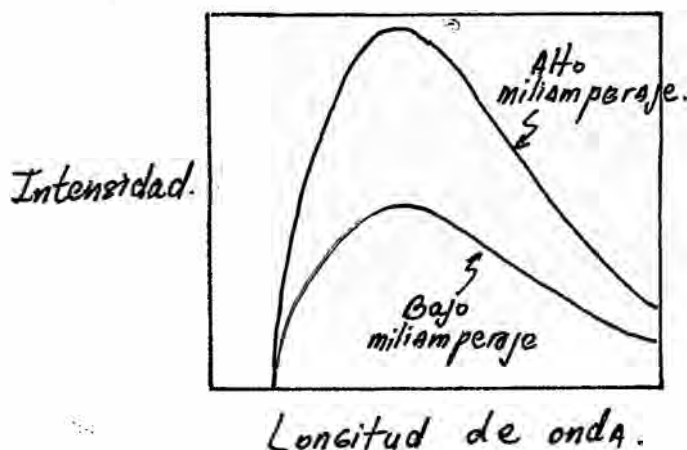


Fig (10)

Si el miliamperaje no varía y las demás condiciones permanecen constantes, la intensidad aumenta al hacerlo el kilovoltaje, ya que la tensión aplicada al tubo no solo afecta a la calidad de la radiación sino también a la intensidad. En la figura (11) puede verse un ejemplo de esta variación y en ella se representan dos curvas espectrales emitidas con la misma intensidad de corriente pero con dos kilovoltajes distintos; en la curva correspondiente al kilovoltaje mayor están presentes todas las longitudes de onda de la curva de kilovoltaje menor, pero con mayores intensidades que en éstas, mientras que aquella contiene longitudes de onda, en el extremo de las cortas, que no están en la curva de kilovoltaje inferior.

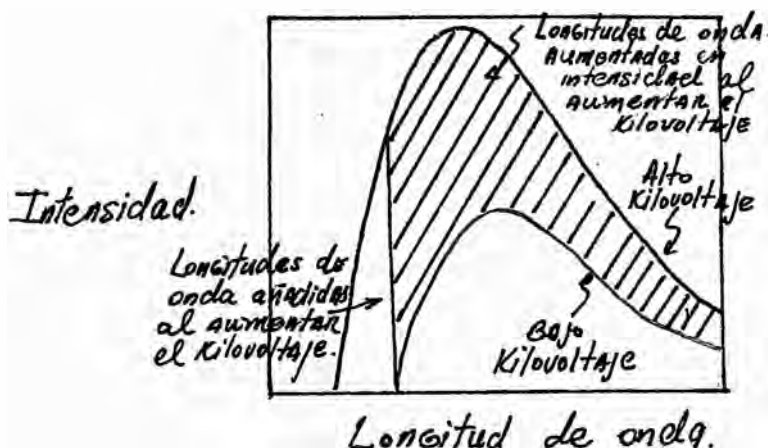


fig. (14)

Resumiendo, el aumento de miliamperaje, permaneciendo constantes todas las demás condiciones, determina un aumento de la cantidad de radiación, mientras que una radiación con variación de kilovoltaje, con los demás factores constantes, lleva consigo una variación de la cantidad y calidad de la radiación, aumentando la intensidad y la proporción de longitudes de ondas cortas al ser mayor dicho kilovoltaje.

2.2.2.3 Cantidad e intensidad de radiación que llega al objeto

Cuando un tubo de rayos X está emitiendo con kilovoltaje y miliamperaje constantes, o más propiamente a un plano que incluya todo el haz de radiación, no depende de la distancia a que éste se encuentre del tubo (si se considera despreciable la absorción del aire), pero no le ocurre lo mismo a la intensidad; ésta se hace menor al incrementar dicha distancia, la cual se comprende teniendo en cuenta el carácter divergente del haz de rayos X (le mismo que le ocurre a la luz vivible) y al estar más alejado el objeto que recibe aquél, toda la energía se reparte en una superficie mayor. La variación de la intensidad con la distancia viene dada por la siguiente expresión :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad (15)$$

Siendo I_1 la intensidad a la distancia D_1 del ánodo o foco, e I_2 la intensidad a la distancia D_2 . En rigor estas distancias deben ser las que existen entre la pieza que se radiografía

y el foco, pero en la práctica se considera casi siempre la distancia foco-película, pues la longitud que representa el espesor de la pieza suele ser despreciable en sus efectos, frente a la longitud que expresa dicha distancia .

2.2.2.4 Clase y espesor de la pieza

Al considerar las leyes de absorción en la radiografía industrial, hay que tener en cuenta que la radiación que se utiliza está constituida por un intervalo amplio de longitudes de onda, lo que dificulta la aplicación de dichas leyes, ya que como se indicó, el coeficiente verdadero de absorción es proporcional a la tercera potencia de la longitud de onda, en contraposición con el coeficiente de difusión que está mucho menos afectado por dicha característica, sobre todo con elementos ligeros. Pero es un hecho evidente que se puede aplicar o no con exactitud las leyes de absorción; ésta aumenta con la densidad y con el espesor del material, y con la magnitud que se expresa en la fórmula (13). En todo caso, la cantidad de radiación que debe llegar a la película fotográfica, teniendo en cuenta el factor clase y espesor del material, se controla por el miliaperaje y el tiempo de exposición y el kilovoltaje o poder de penetración.

2.2.2.5 Efecto de Talón

Anteriormente se consideró que la energía de los rayos X que emite un tubo se repartía por igual sobre una superficie receptora y, en consecuencia, la intensidad era la misma en todos los puntos de ella, Pero esto en la realidad no es así, ya que los rayos que constituyen el haz no todos se emiten con el mismo ángulo desde la superficie del anticátodo, y la intensidad está influenciada por el valor de este ángulo. Por tanto, dentro del haz hay rayos más intensos que otros y en una película radiográfica que se impresionara directamente, habría zonas con densidades distintas. En la figura (12) se representa un esquema que muestra cómo y cuando el plano del anticátodo forma un ángulo de 20° con la vertical.

Se observa que en la parte central del haz se aproxima a la intensidad máxima; para ángulos mayores, la intensidad crece hasta llegar a un máximo, en cambio, disminuye progresivamente con ángulos menores de 20° . Este debilitamiento de los rayos X con el ángulo de emergencia bajos se conoce con el nombre de efecto de talón (efecto Hell). Como puede verse en la figura, el efecto-

de talón se hace menor ha medida que se incrementa la distancia foco-película, para una superficie dada.

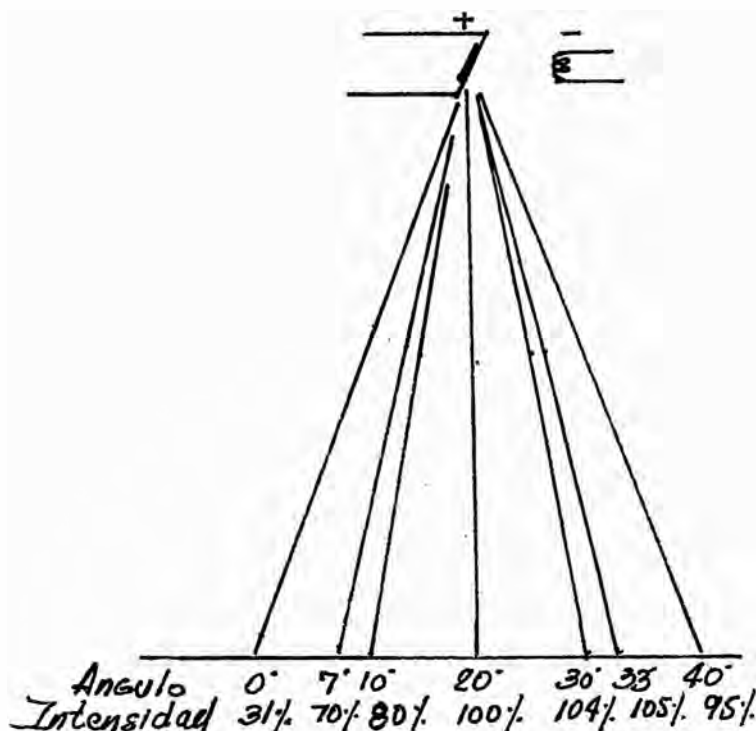


fig. (12)

2.2.2.6 Exposición

Como ya se indicó, la proporcionalidad que existe entre la cantidad de radiación y la intensidad y el tiempo de exposición También se ha dicho allí que, para un kilovoltaje constante, la intensidad es practicamente proporcional a la corriente del tubo. Per lo tanto, puede considerarse que la cantidad de radiación emitida por el tubo es proporcional al producto del millamperaje por el tiempo de exposición, entonces :

$$E = M \cdot T \quad (16)$$

siendo E la exposición, M la corriente del tubo en miliamperios y T el tiempo de exposición. Vemos pues, que la cantidad de radiación que sale del tubo viene determinada por el producto de dos factores.

Una vez que se han establecido y fijado todas las restantes condiciones operatorias, distinta de estos factores, las densidades radiográficas dependen de la exposición; la exposición puede variarse al modificar cualquiera de los factores o los dos simultáneamente, pero también, una vez establecida una esposición es posible variar dichos factores de forma que el producto permanez--ca constante, de acuerdo con la llamada ley de reciprocidad.

$$E = M_1 \cdot T_1 = M_2 \cdot T_2 \quad (17)$$

Esta ley, en la práctica, resulta muy útil, ya que permite acertar o alargar las exposiciones con una determinada cantidad de radiación. Es exactamente aplicable siempre que no se trabaje con pantallas reformatoras fluorescentes.

Como la intensidad de radiación que llega al objeto, está en razón inversa al cuadrado de la distancia foco-objeto, o aproximando de la distancia foco-objeto, Entonces si para obtener en la película una determinada densidad radiográfica se ha calculado una exposición, y se desea variar la distancia foco-película, será preciso variar la intensidad para que la cantidad de radiación sea la misma; como la cantidad de radiación la determina la exposición y la intensidad el miliamperaje, se llega a la conclusión de que la exposición está en razón directa del cuadrado de la distancia. Per lo tanto :

$$E_1 / E_2 = D_1^2 / D_2^2 \quad (18)$$

Siendo las E exposiciones y las D distancias. Esta última ley tampoco se emplea exactamente cuando se utilizan pantallas reforzadoras.

Muchas veces conviene expresar la exposición en términos de factor de exposición por el cuadrado de la distancia foco-película:

$$\text{Factor de exposición} = E / D^2 \quad (19)$$

Si se relacionan los factores que condicionan la energía radiográfica en un punto determinado del haz de rayos X, se llega a la siguiente ecuación :

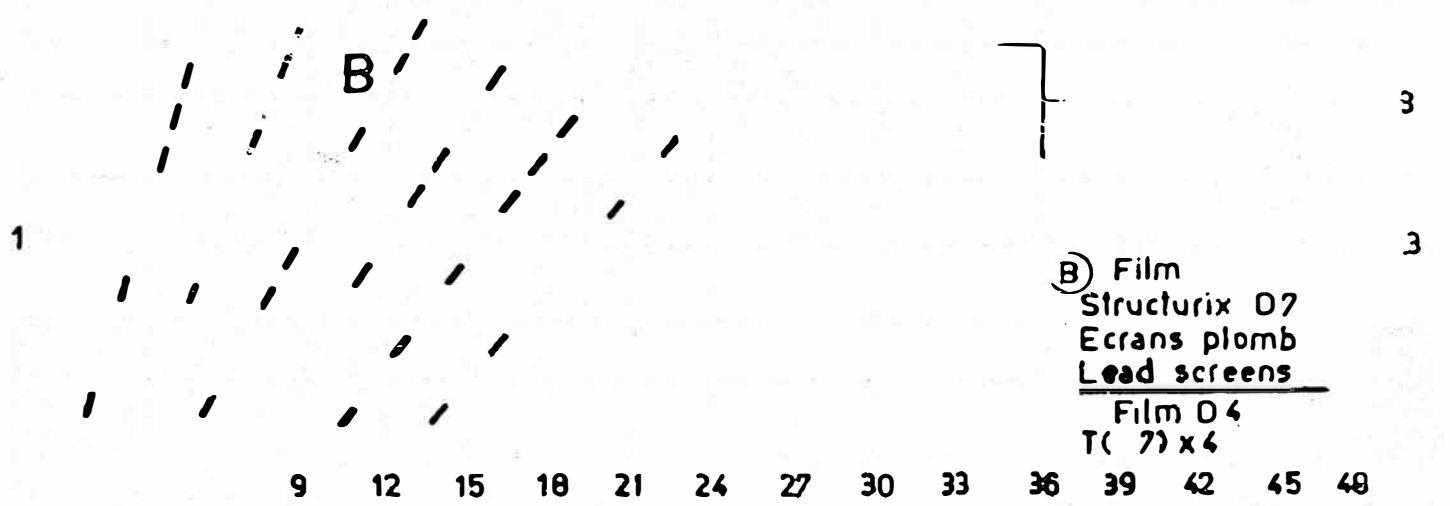
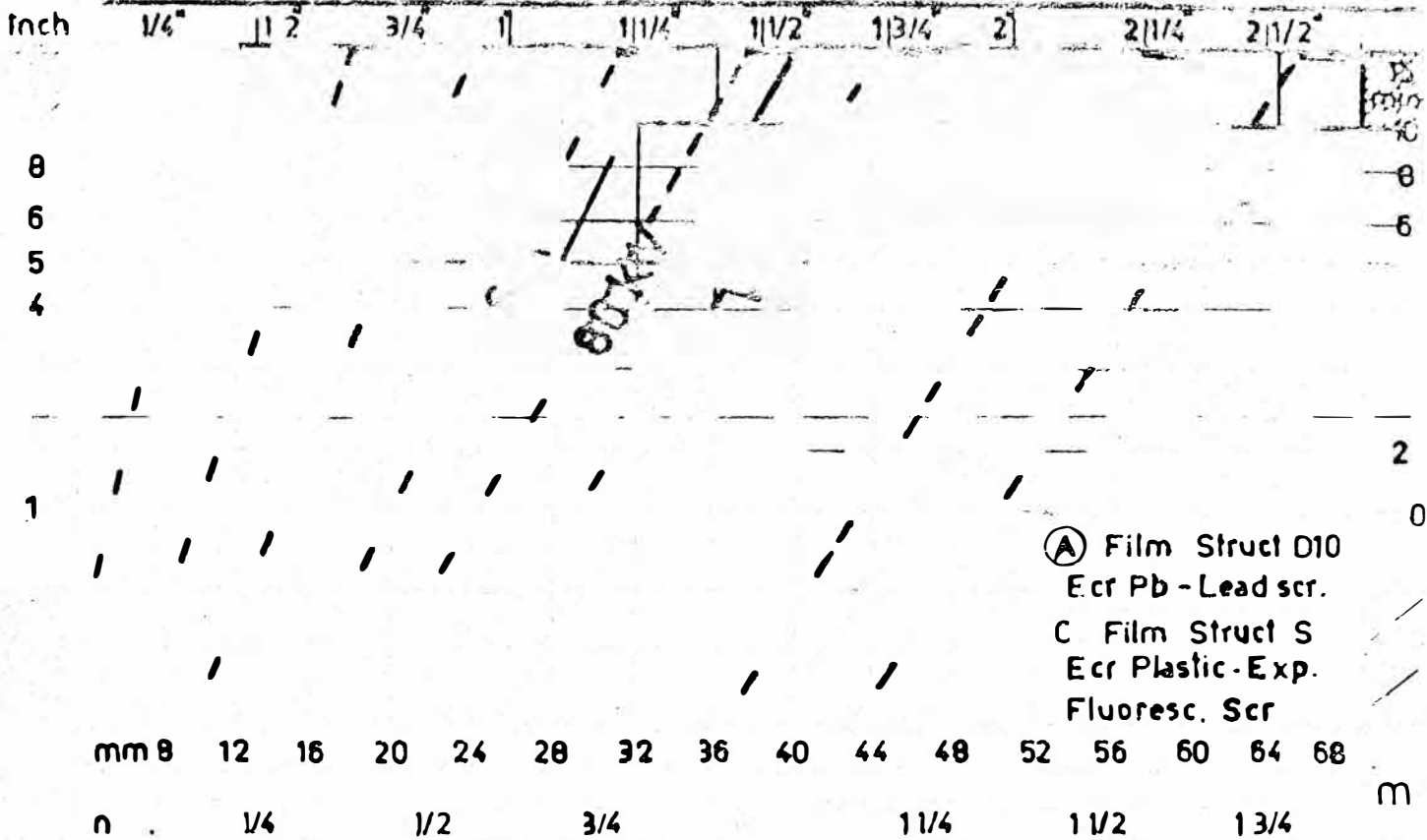
$$E_{\text{rad.}} = k \frac{K^x \cdot M \cdot T \cdot Z}{D^2} \quad (20)$$

Donde K es el kilovoltaje, x un exponente que depende del valor de la tensión y de las condiciones de operación, k una constante de proporcionalidad, M el miliamperaje, T el tiempo de exposición, D la distancia del foco al punto considerado y Z el número atómico del elemento anticátodo.

2.2.2.7 Cartas de exposición y su determinación experimental

En las secciones precedentes se han estudiado los factores de los que depende el intervalo de densidades radiográficas - que debe tener una radiografía. A primera vista parece que, mediante cálculo o experimentalmente, sería posible relacionar estos factores en tablas o gráficos, de forma que para cualquier problema determinado, se tuviera datos de la exposición y kilovoltaje precisos para realizar la radiografía. Sin embargo, en la realidad esto no es posible de forma universal, ya que las características y particularidades de cada unidad de rayos X condicionan el que dichos datos sólo pueden relacionarse correctamente en cada caso particular, es decir, que las tablas o gráficos - que se obtienen experimentalmente con un equipo, no pueden aplicarse con exactitud cuando se opera con un equipo distinto, e incluso con otro equipo del mismo diseño y potencias. Teniendo en cuenta esta salvedad, para conocer los datos operatorios en radiografía industrial se utilizan las llamadas cartas de exposición que son unas gráficas que relacionan la exposición, el kilovoltaje y espesor de material que se ensaya, para las condiciones determinantes: equipo de rayos X, tipo de película, clase de material y espesor del filtro si se utiliza, distancia foco-película, temperatura y tiempo de revelado y densidad radiográfica que se obtiene.

En la figura (13) se representa una carta de exposición típica, en la que aparecen curvas para distintos kilovoltajes, es conveniente expresar las exposiciones en escala logarítmica, ya que de otra forma dicho eje sería muy grande, además en dicha escala el kilovoltaje viene entonces representado por líneas rectas. Se usan también cartas de exposición en las que, con un kilovoltaje determinado, se relacionan la exposición y el espesor para variar densidades radiográficas. En otras cartas, la exposición viene dada en factores de exposición. Es posible construir también, - cartas en las que la tercera variable sea la distancia foco-película, la densidad del material, las pantallas, etc., pero no están generalizadas. Las cartas de exposición más usuales son las citadas inicialmente. Sin embargo, se comprende la imposibilidad práctica de tener cartas para distintos valores de cada una de las condiciones prefijadas y que se han indicado anteriormente. Ello se soluciona utilizando ciertos factores de corrección.



Fe - disj. FF = 700 mm
 Noir^r total N1
 Total density N15
 N1 = T
 -Tx1



dist. FF 350 mm Tx0.25
 500 " "x0.50
 700 " "x1
 1000 " "x2
 40 " "x3

pas pour
not for

Indications de pose
 Exposure data

BR200/5mA

USINES BALTEAU
 LIEGE - BELGIOUE

3-12-63

5800939

B34 3

Tixhon R.

Determinación experimental de las cartas de exposición

Los distintos medios experimentales utilizados para la elaboración y obtención de datos que permitan construir una carta de exposición, se basan en el empleo de una escalera metálica, con espesores escalenados. El material con que se hace la escalera es aquél para el cual se construye la carta.

Un esquema general del procedimiento básico es el siguiente : una vez fijadas todas las condiciones operatorias que son constantes y están determinadas para la carta, se hacen radiografías independientes de la escalera con exposiciones progresivas y operando siempre con el mismo kilovoltaje. Estas radiografías presentan un determinado intervalo de densidades radiográficas escalenadas. Per medio de un densitómetro se localizan los escalones que correspondan a la densidad radiográfica prefijada para la carta, y entonces, en función del espesor de estos escalones y de la respectiva exposición, se representan gráficamente los puntos correspondientes. Utilizando papel semilogarítmico -- estos puntos caen dentro de una línea recta, cuya posición y pendiente definen el kilovoltaje con el cual se ha operado.

Esta técnica general que se ha descrito es susceptible de particularidades y modificaciones que tiendan a simplificar el método operatorio y a que los resultados sean lo más preciso posibles, por ejemplo, se puede utilizar una misma película para registrar todas las exposiciones con un mismo kilovoltaje, en distintas áreas de la misma, por una limitación adecuada del haz activo de rayos X; esto ofrece la principal ventaja de eliminar errores debido al revelado. Pero, en todos los casos, es fundamental, además, un enmascaramiento conveniente de los bordes de la escalera para evitar los efectos aditivos, no formadores de imagen, de la radiografía difusa provocada por éstos, etc.

2.2.3 Radiaciones Secundarias y Pantallas Radiográficas

2.2.3.1 Radiaciones secundarias y su efecto en la imagen

Cuando un haz primario de rayos X llega a un objeto material, una parte del mismo se absorbe, otra se difunde, y otra atraviesa el objeto sin difusión, es decir, siguiendo su trayectoria inicial; esta última, parte es la que se aprovecha en radiografía industrial. Los rayos que se difunden sin cambio de longitud de onda, por tanto sin haber perdido energía o radiación no modificada, le hacen en todas direcciones y al alcanzar de esta forma la película radiográfica, sin seguir la geometría del haz primario, tienen una acción interferente en la formación de imagen. Por otra parte y como consecuencia de la absorción, se producen radiaciones modificadas al perder parte de su energía los rayos primarios y radiaciones de fluorescencia al provocar los rayos primarios la emisión de rayos X en el propio objeto. Estas otras radiaciones, consecuencia de la absorción, se emiten también en todas direcciones y tienen el mismo efecto perjudicial que la radiación no modificada en la formación de imágenes radiográficas. Al conjunto de todas las radiaciones secundarias se le suele llamar radiación difusa. En consecuencia, cuando se realiza una radiografía se tienen que procurar los medios que tiendan a eliminar o atenuar el efecto de estas radiaciones secundarias.

Las radiaciones secundarias, al alcanzar la película radiográfica, producen en ella un velo, por lo cual las partes de la imagen, o la totalidad de ella, que están afectadas por las mismas, experimentan una pérdida de contraste y en consecuencia de calidad.

La proporción de radiaciones secundarias que llegan a la película suelen ser muy importantes, dependiendo entre otros factores, del espesor y de la clase de material que se ensaya. Así, al radiografiar un espesor de 2 mm de acero, se produce una radiación difusa dos veces más intensa que la primaria que llega a la película, y en el caso de 50 mm de aluminio dicha radiación es 2.5 veces más intensa.

Las radiaciones secundarias no sólo proceden del objeto que se radiografía sino también de cualquier parte material bañada por el haz primario, por ejemplo, el chasis metálico, el suelo, las paredes etc. Las partes de una imagen radiográfica más afectadas por la radiación difusa suelen ser las que corresponden-

a áreas adyacentes a los bordes de la pieza y a las secciones más delgadas de ésta, parte de la difusión producida en los bordes se transmite directamente, a través del aire, a la película radiográfica que las gruesas no solo las radiaciones secundarias que en ellas se producen, sino también las procedentes de zonas circundantes del objeto.

2.2.3.2 Métodos de atenuación

Si bien es cierto que el efecto perjudicial de la radiación no puede anularse totalmente, existen varios métodos de atenuación en mayor o menor grado. Estos pueden resumirse en :

a.- Pantallas de plomo

b.- Protección contra la difusión de "retroceso" y la producida en objetos externos.

c.- Enmascaramiento y diafragma

d.- Filtración

a.- Pantallas de plomo

Cuando la película radiográfica se aloja en el chasis - entre dos hojas de plomo de muy pequeño espesor (entre 0,1 y 0,2 mm) se consigue que durante la exposición llegue a ella una menor cantidad de radiaciones secundarias, debido al efecto absorbente del plomo. Las radiaciones secundarias, de menores longitudes de onda que las primarias, son más absorbidas por el plomo que éstas ; si bien es cierto que por absorción de radiaciones primarias es preciso aumentar la exposición, esta pérdida de radiación puede compensarse, y aun superarse, por la acción intensificadora de las pantallas, cuando la energía de los rayos X que llegan a ella sobrepasan un valor determinado.

Estas pantallas de plomo se conocen con el calificativo de "intensificadoras" ; sin embargo, ambas acciones proporcionan beneficios de igual importancia. Aun cuando al operar con rayos X de insuficiente voltaje para provocar la acción intensificadora de las pantallas, se necesita aumentar la exposición por el efecto absorbente de ellas, no deben desecharse si se desea una buena calidad de imagen; la limitación de esta norma se produce si la energía de los rayos primarios que llegan al chasis después de atravesar el objeto, es tan baja que la fuerte absorción producida en la pantalla superior perjudica la calidad de dicha imagen.

b.- Protección contra la difusión de retroceso

La difusión de retroceso tiene lugar cuando la radiación primaria alcanza objetos materiales que se encuentran detrás o de baje del objeto que se radiografía. La acción perjudicial de tal difusión puede llegar a efectos tan perturbadores como el de producir una imagen del fondo del chasis superpuesta a la imagen del objeto. La primera medida que debe tomarse para evitar la difusión de retroceso es limitar el haz de rayos X en la extensión que sea posible, dentro de lo práctico. En segundo lugar, se procura que tales radiaciones secundarias de retroceso no alcancen la película, interponiende entre el fondo del chasis y la película una lámina de plomo, cuyo espesor depende de la calidad de dichas radiaciones. Esta protección que es suficiente, por regla general, con voltajes inferiores a 100 Kv debe suplementarse cuando se opera con tensiones mayores, colocando sobre la misma mesa de trabajo chapas de plomo de espesores variables; por ejemplo, operando a 250 Kv la chapa debe tener un espesor de 3.5 mm; con 1 MeV, el espesor será de unos 7 mm.

En cuanto a la cantidad de radiación de retroceso que se produce para una energía dada, la propia pieza que se ensaya es quien principalmente la determina; su forma, las partes de ella que hay que radiografiar etc. contribuyen a que llegue más o menos radiación primaria a zonas exteriores. Por ejemplo, si se radiografía un área pequeña de una sección uniforme y extensa, se puede restringir el haz de forma que todo él caiga dentro de la pieza, con lo cual; al no ir radiación directa a zonas exteriores a la misma se reduce considerablemente la difusión.

c.- Enmascaramiento y diafragmas

La radiación difusa originada en las partes materiales distintas del objeto que se ensaya, a las que llega el haz primario de los rayos X, puede perjudicar considerablemente la calidad de imagen, sobre todo cuando el objeto es muy absorbente a los rayos X; en este caso, la cantidad de radiación formadora de imagen es muy pequeña comparada con la radiación difusa que se forma y que puede llegar a la película radiográfica. Por lo general, los métodos más satisfactorios en atenuar este efecto, consisten en la colocación sobre el objeto de diafragmas que absorban el haz primario, montados sobre o alrededor del objeto, o bien colocando a la salida del tubo un lomo de plomo ^{o un} diafragma de tal suerte

que limite la extensión del haz. La elección de cualquiera de éstos métodos depende de la facilidad y economía de su aplicación, - lo que es a su vez consecuencia de la forma del objeto, número de ellos que se tienen que radiografiar etc. Por otra parte, y siempre que sea posible, se debe procurar que el haz de rayos X sólo-ba^{ñe} la parte de la pieza que tenga interés de estudiarse, teniendo en cuenta que la propia pieza es la fuente importante de ra--diaciones secundarias.

En piezas muy irregulares, resulta fácil conseguir un enmascaramiento satisfactorio, moldeando alrededor de ellas partes constituidas por compuestos de Bario o Bismuto, con suficiente espesor para que la densidad radiográfica de la película bajo la --pasta sea considerablemente menor que bajo la pieza, ya que, de otra forma, la propia pasta tendría un efecto aditivo en la radiación difusa que llega a la película.

d.- Filtración

Una chapa metálica interpuesta en la trayectoria de un haz de rayos X pesea una acción filtrante; como tal filtro retiene o deja pasar más fácilmente a unos componentes de la radiación (longitud de onda) que a otros. Las longitudes de onda más largas son absorbidas más fácilmente por el filtro que las cortas. En --radiografía industrial, estos filtros pueden colocarse entre el objeto y la película, o a la salida del haz primario, es decir, en las proximidades de la ventana del tubo de rayos X. Cuando el filtro se coloca entre el objeto y la película, lo que se consigue es reducir la radiación difusa, pues ésta es más blanda que la primaria formadora de imagen y se absorbe preferentemente. De ahí - el efecto antidifusor de las pantallas de plomo antes citadas. Si la acción filtrante de estas pantallas fueran insuficiente puede aumentarse el espesor, pero siempre teniendo en cuenta que su labor beneficiosa no se neutralice o perjudique por la difusión - originada en la propia pantalla, lo que para una energía dada viene determinada por el espesor de ella. Es preciso el íntimo en-lace o contacto entre película y pantalla para que los efectos - sean positivos, puesto que cuando en la pantalla se producen radiaciones secundarias o electrones, no deben tener "trayectos" suficiente para propagarse en dirección al azar; si el espesor de la pantalla es grande, la distancia entre las capas superiores de la misma y la pantalla es ya apreciable para que se produzca esta difusión.

La cantidad de filtración que se obtiene depende del metal que constituye el filtro y de su espesor, ya que la absorción crece con el número atómico y con el espesor. No se pueden dar reglas concretas en cuanto a la elección de un filtro, pues el material de que esté constituido dependen del material y espesor del objeto que se radiografía y de la clase y cantidad de filtración requerida. Los metales o aleaciones que más frecuentemente se utilizan para filtros, son el plomo, el aluminio, el cobre, el latón, el antimonio, el plomo antimoniado, el cadmio y el circonio, usados solos o en combinación. En la radiografía de piezas de acero suele emplearse cobre o plomo, con espesores, respectivamente, de 0.2 y 0.03 veces el de la sección más gruesa de la pieza, y para objetos de aluminio, filtros de cobre de espesor de 0.04 veces el mayor del objeto.

2.2.2.3 Moteado por Difracción de Rayos X

Las radiaciones no modificadas que se originan en la interacción del haz primario de rayos X con el objeto que se radiografía y que se difunde de acuerdo con las leyes de difracción de rayos X, pueden originar perturbaciones en las radiografías de piezas metálicas delgadas, cuando su tamaño de grano es lo suficientemente grande para constituir una fracción apreciable del espesor ensayado. Esta perturbación origina en la radiografía un moteado que tiene el aspecto del que a veces se debe a porosidad o segregaciones. Para comprobar la realidad de la causa, basta con hacer dos radiografías sucesivas, girando el objeto entre ellas de 1 a 5° alrededor de un eje perpendicular al haz central de rayos X. Si el moteado se debe a defectos internos, el aspecto variará de una radiografía a otra, lo que no ocurre cuando lo han producido fenómenos de difracción. Este moteado debido a difracción puede reducirse, y en algunos casos eliminarse, elevando el kilovoltaje de operación o usando pantallas de plomo, aunque a veces es interesante tener una indicación del tamaño de grano por este medio, para juzgar sobre la calidad de la pieza.

2.2.3.4 Las Pantallas Radiográficas

Las pantallas radiográficas son artificios que se utilizan para reforzar la acción de la energía de los rayos X para reforzar la formación de imágenes. Hay que tener en cuenta que, de

la energía que llega a la película, por lo general, sólo es absorbida por ella menos del 1%, y que es precisamente la que produce el efecto fotográfico, de forma que cualquier medio que utilice parte de la energía no absorbida, coadyuvando a la formación de la imagen, debe aprovecharse. Se conocen dos tipos de pantallas cuya acción reforzadora se debe a motivos físicos diferentes :

Pantallas metálicas

- Pantallas salinas

Pantallas Metálicas.-

Están formadas por hojas de metales pesados, de espesor muy pequeño, y que van montadas sobre soportes de cartulina. Las más usadas son de plomo o de una aleación de plomo y estaño, con espesores de 0.1 a 0.2 mm. Generalmente se utilizan dos, entre las cuales y en íntimo contacto, se aloja la película radiográfica. Con esta disposición se consiguen los siguientes efectos :

- a.- Refuerzan la acción fotográfica de los rayos X primarios
- b.- La intensificación del efecto fotográfico es mayor para la radiación primaria que para la secundaria.
- c.- Absorben más fácilmente la radiación secundaria que la primaria.

La acción intensificadora se debe a los electrones y, en menor proporción, a los rayos X secundarios, que se emiten por la interacción de los rayos primarios con el metal de la pantalla. Sin embargo, para que tenga lugar esta acción intensificadora, la energía de los rayos X debe sobrepasar un cierto valor, aproximadamente a la que corresponde a la emitida a 120 KV; puede ocurrir que si la radiación primaria no tiene suficiente poder de penetración, sea preciso aumentar la exposición radiográfica con respecto a la calculada sin pantallas, aun teniendo que aumentar la exposición, se debe a que mejoran la calidad de la imagen por su propiedad antidifusora.

La calidad de la radiación, necesaria para conseguir una intensificación apreciable con las pantallas de plomo, depende del tipo de película que se use, del kilovoltaje y del espesor y clase de material que atraviesan los rayos primarios.

Pantallas Salinas.-

Las pantallas salinas o fluorescentes, transforman la energía de rayos X que absorben, en luz visible o ultravioleta, a

las cuales es sensible la emulsión fotográfica que en estos casos se usa a diferencia de los rayos X que tienen poco efecto sobre tales emulsiones.

Una pantalla fluorescente está constituida por un soporte, generalmente de cartulina, de unos 0.4 mm de espesor, sobre el cual se deposita un recubrimiento de una sustancia química fluorescente, dispersa en un aglomerante plástico; este recubrimiento suele tener un espesor de unos 0.2 mm y se protege contra la abrasión por medio de una capa protectora adecuada muy fina.

Además, para evitar la absorción de humedad y el que la cartulina se dañe, la otra cara de ésta se recubre con una capa celulósica protectora.

La sustancia química que más se utiliza en la fabricación de pantallas, es el volframio cálcico; no obstante, recientemente se han usado con ventaja el resultado del uso del sulfato de bario y el plomo.

2.2.4. Factores Fotográficos

2.2.4.1 Películas Radiográficas

El procedimiento más generalizado de registro permanente de imágenes fotográficas es por medio de emulsiones depositadas sobre un soporte apropiado, cuyo conjunto consiste una película radiográfica. Dicho soporte es de un material plástico, derivado de la celulosa, no inflamable (acetato de celulosa), y la emulsión consiste en un halogenuro de plata disperso en gelatina; esta emulsión se deposita en ambas caras del soporte, con un espesor de capa de unos 0.025 mm, siendo el espesor total de la película de unos 0.25, incluyendo los respectivos recubrimientos superiores de gelatina que protegen la emulsión. El halogenuro de plata está disperso en la gelatina en agrupaciones cristalinas imperfectas por la presencia de sulfuro de plata (los iones S los suministra el aceite de mostaza que se añade a la gelatina) que activa de esta forma la reacción fotoquímica de los mismos.

De los halogenuros de plata, el cloruro es el menos sensible a la reacción fotoquímica, siendo el bromuro el más sensible; no se utiliza el fluoruro por ser soluble en agua. De acuerdo con la sensibilidad requerida, se puede emplear mezclas de halogenuros en diversas proporciones.

Cuando los rayos X, gamma, luz o electrones, llegan a una emulsión de este tipo, tiene lugar una reacción por la cual quedan en libertad los electrones procedentes de los aniones del halogenuro, los cuales son captados por los iones plata, originan-

dose así plata metálica. De acuerdo con la intensidad de la reacción se forma una imagen que bajo las condiciones de exposición usuales no es visible, por lo que se denomina latente. Aunque la naturaleza de las imágenes latentes es la misma para las distintas clases de radiaciones que puedan formarlas, los agregados de plata metálica pueden variar de forma, tamaño y distribución y otras características, de acuerdo con la radiación causante del fenómeno. Por ello, las emulsiones radiográficas son distintas a las fotográficas usuales.

El hecho de que por la acción de una solución reductora apropiada la imagen latente se convierte en visible, se debe a que los cristales de halogenuro expuestos se reducen mucho más rápidamente que los no expuestos, de forma que la reducción química, que es intensa, está de acuerdo con la reducción fotoquímica.

Clase de películas radiográficas industriales.-

Las películas radiográficas que se utilizan en radiografía industrial, pueden dividirse en 4 grupos, de acuerdo con sus características :

Clase I .- Las películas de esta clase poseen grano fino y proporcionan elevado contraste. Se usan para obtener la máxima calidad radiográfica cuando se opera a kilovoltajes elevados o para radiografiar metales o aleaciones ligeros. Se recomiendan cuando hay que realizar radiografías muy críticas. Para usar directamente o con pantallas de plomo.

Clase II .- Son películas de grano fino y elevado contraste. Apropriadadas para radiografías de metales o aleaciones ligeras a bajos voltajes, y para radiografías a 1 MeV o más, de secciones gruesas de acero, su grano no es tan fino como el de la clase I, pero su mayor rapidez hace que su aplicabilidad sea más extensa. Se usan directamente o con pantallas de plomo.

Clase III .- Proporcionan la mayor rapidez posible cuando se usan rayos X de alto voltaje o rayos gamma, y se emplean directamente o con pantallas de plomo.

Clase IV .- Proporcionan la mayor rapidez y el más alto contraste posible cuando se utilizan pantallas fluorescentes. Son apropiadas para radiografiar acero, latón etc. Su contraste es bajo cuando se usan directamente o con pantallas de plomo. Registran un intervalo amplio de espesores, con un intervalo relativamente reducido de densidades radiográficas. En la tabla # 1 se detalla

Espesor del material en milímetros	Tensión alcanzada y tipo de film sugerido							
	50-80KV	80-120KV	120-150KV	150-250KV	250-400KV	1000 KV	2000 KV	10 MeV
0 - 6	D10	D7-D10	D7	D4	D4	D4		
6 - 12	S	D10	D7	D7	D4	D4	D4	
BRONCE	12 - 25	S	D10-S	D10	D7	D4	D4	
	25 - 50		S	S	D10	D4	D4	D4
50 -100					S	D7	D4-D7	D4
100 -200						D10	D7	D4-D7
200							D10	D7-D10

STRUCTURAIX	D2	D4	D7	D10	S
Sensibilidad	BAJA	MEDIA	BASTANTE RAPIDA	RAPIDA	MUY RAPIDA
Factor de Exposición relativa	60	15	4	1	0.1
Poder Resolutivo	Excepcionalmente elevado	Extra elevado	Muy elevado	elevado	Bastante elevado
Contraste	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto	Alto

D : Tomas con o sin pantallas metálicas

S : Exposiciones fluorescentes

algunas de las películas radiográficas industriales que se pueden adquirir en el mercado, así como su rango de aplicación en distintos materiales.

2.2.4.2 Densidad Radiográfica

Los ennegrecimientos de la película radiográfica que se producen por la reducción de los iones de plata por la acción fotoquímica de la radiación y del posterior revelado, se miden en términos de densidad radiográfica, la cual es consecuencia de la luz que se transmite a través de la parte de la radiografía que se considera. La densidad radiográfica se define por la ecuación

$$D = \log (I_0 / I) \quad (20)$$

en la cual, D es la densidad radiográfica, I_0 la intensidad de la luz que incide en la película e I la intensidad de la luz transmitida. La relación :

$$T = I / I_0 \quad (21)$$

se denomina transmitancia y su valor recíproco $1/T$ se llama opacidad. De la expresión (20) se deduce que la cantidad de luz que se transmite la radiografía aumenta cuando la densidad radiográfica disminuye.

Las densidades radiográficas se miden con instrumentos llamados densitómetros, de los cuales existen muchos tipos comerciales, pero agrupados en dos clases : visuales y fotoeléctricos; estos últimos suelen ser más precisos, aunque, en radiografía industrial más que un densitómetro muy preciso se requiere que el aparato dé resultados reproducibles de una medida a otra.

2.2.4.3 Curva característica de una película radiográfica

La curva que expresa la relación entre la exposición aplicada a una película radiográfica y la densidad de imagen que se obtiene, se denomina curva característica de la misma. Estas curvas que también se llaman sensitométricas o curvas H y D (en recuerdo de Hurter y Driffield, que las construyeron en 1890), ayudan a resolver muchos de los problemas radiográficos, por la información que proporcionan.

En la figura (14) se muestran las curvas características de dos películas radiográficas típicas. La escala de exposiciones es logarítmica, puesto que ello ofrece ventajas : en radiografía,

las relaciones de exposiciones o las relaciones de intensidades son más significativas que las propias exposiciones o intensidades;] si la relación de dos exposiciones es igual a la relación de otras dos, en la escala logarítmica de exposiciones estarán separadas por el mismo intervalo, no importando cuáles sean sus valores absolutos. Por otra parte, el uso de logaritmos condensa lo que de otra forma sería una escala grande .

Como se observa en la mencionada figura, las pendientes de las curvas cambian continuamente a lo largo de su longitud. Esta pendiente que se denomina gamma (γ), influye en el contraste radiográfico o diferencia de densidades que se obtiene en un intervalo de exposiciones, lo que afecta a la visibilidad de un detalle.

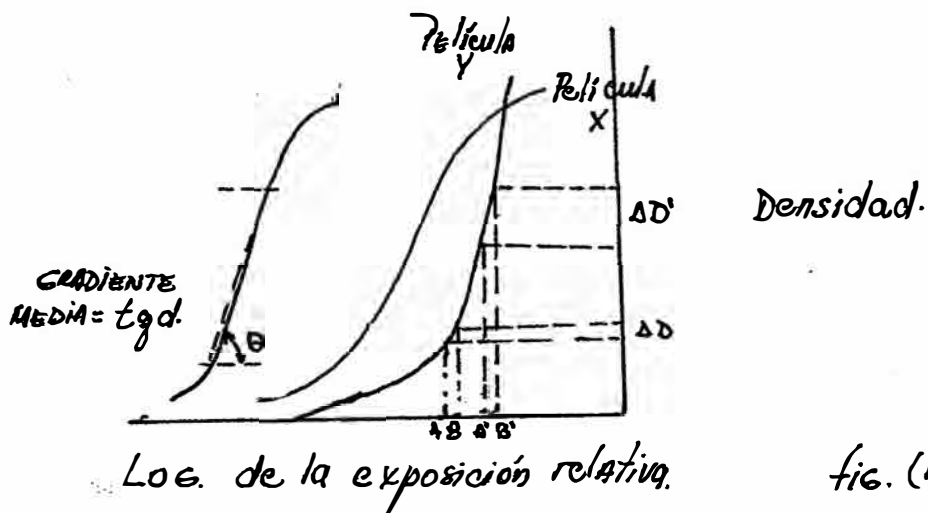


fig. (14)

Así dos espesores ligeramente diferentes de la pieza que se radiografía, transmiten a la película cantidades de radiación también ligeramente diferentes y, por tanto de exposiciones. Siempre que la calidad de la radiación siga siendo la misma, la relación entre estas dos exposiciones será constante e independiente de sus valores absolutos. Entonces, las exposiciones tendrán pequeños intervalos de \log de B (logaritmo de la exposición relativa) que son constantes. Si en la curva de la figura que corresponde a la película X se consideran dos de estos intervalos AB y A'B', se observa que la diferencia de densidades es mayor para la parte de la curva de más pendiente; es decir $\Delta D'$, que corresponde a A'B', es mayor que ΔD que corresponde a AB; por lo tanto con esta película se conseguirá mayor visibilidad de detalle si se emplean

exposiciones que produzcan densidades elevadas dentro de los límites prácticos. La pendiente de las curvas características vuelve a disminuir a partir de un cierto valor de la exposición y llega incluso a decrecer con ella en una región, llamada zona de solarización donde la acción que se produce es una inversión de imagen.

La película Y es más rápida que la X, por lo que el máximo contraste se obtiene a una densidad intermedia. La pendiente en un punto cualquiera de la curva se denomina gradiente y se obtiene trazando la tangente a la curva en ese punto y midiendo su valor. En la práctica, las propiedades de contraste de una película se expresan en función del gradiente medio, que es la pendiente de una línea recta trazada entre dos densidades escogidas.

2.2.4.4 Granulado

Se define como la impresión subjetiva de falta de uniformidad del depósito de plata, que se percibe al examinar visualmente una película o placa fotográfica revelada. Se debe a la distribución irregular dentro de la emulsión de granos o grupos de granos cristalinos, y que aparecen proyectados en un plano único en visión normal, al solaparse tales granos o conjunto de granos. En la mayor parte de las películas radiográficas expuestas directamente o con pantallas de plomo, puede elevarse el granulado a simple vista o con pequeños aumentos. El granulado se intensifica con la energía de la radiación hasta que la calidad de ésta es aproximadamente la que corresponde a la de 250 KV muy filtrada; por encima de esta energía, un aumento de la misma tiene poco efecto. El granulado está directamente relacionado con el proceso fotográfico del revelado; al aumentar el tiempo de éste el granulado se hace mayor e inversamente.

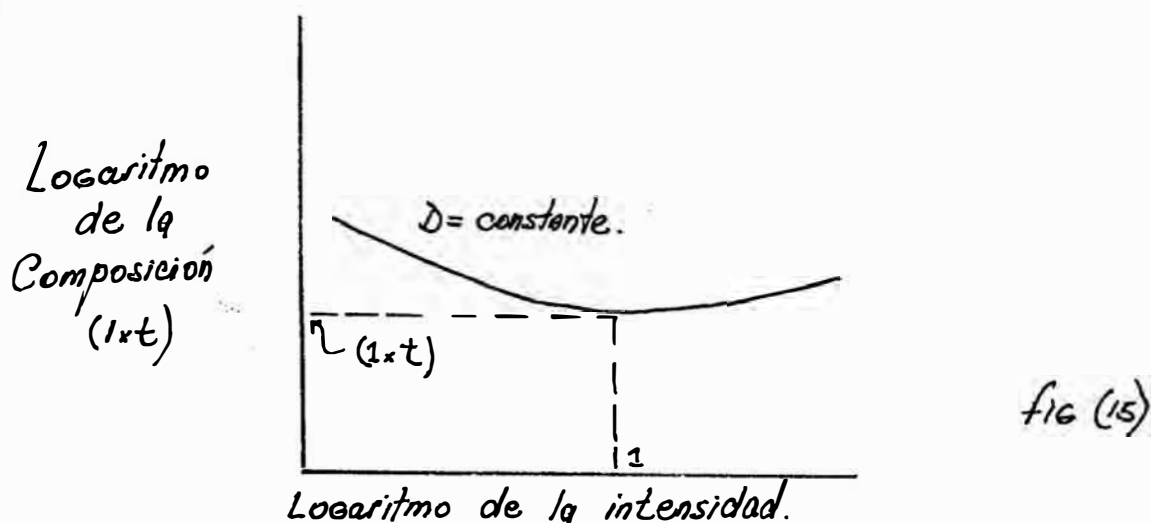
2.2.4.5 Sensibilidad Espectral

Como ya se indicó anteriormente la forma de una curva característica depende algo de la calidad de la radiación utilizada en la exposición. Sin embargo, la sensibilidad de la película en términos de número de roentgens requeridos para producir una determinada densidad, está muy influenciada por la calidad de la radiación. Probablemente la sensibilidad espectral de todos los materiales fotográficos es la misma, pero algunos detalles, como la relación de máxima a mínima sensibilidad, difieren de una película a otra. En radiografía, pocas veces es necesario conside-

rar la sensibilidad espectral de una película, o la diferencia de sensibilidad entre dos películas, en cambio, es muy importante cuando la película que se usa como monitor de radiación, puesto que hay que valorar el número de roentgens que llegan a ella.

2.2.4.6 Fallos en la Ley de Reciprocidad

La ley de reciprocidad de Bunsen-Roscoe, es válida únicamente cuando las exposiciones con rayos X o gamma, se hacen directamente con éstos o cuando se emplean pantallas de plomo, dentro de un intervalo de densidades e intensidades cuyo límite superior excede en mucho a las intensidades utilizadas normalmente en la práctica. Pero dicha ley falla con exposiciones a la luz ordinaria con pantallas intensificadoras fluorescentes. En la figura (15) se ha trazado una curva que representa las variaciones de los logaritmos de las exposiciones ($I \cdot t$) en función de los logaritmos de las intensidades individuales (I), cuando las exposiciones se hacen con luz visible.



De la observación de la curva se deduce que, para una determinada intensidad I , la exposición ($I \cdot t$) que se requiere para poder una densidad radiográfica dada, tiene un valor mínimo. Las intensidades mayores o menores que I_1 , requieren una exposición mayor para producir el mismo efecto fotográfico, es decir, la misma densidad. En la radiografía con pantallas fluorescentes, los fallos debidos a la ley de reciprocidad dan resultados, a veces, que tienen la apariencia de ser motivados por la ley que relaciona la intensidad con la distancia foco-película.

2.2.4.7 Proceso fotográfico de las películas de rayos X

La imagen latente que se ha formado en la película radiográfica durante la exposición a los rayos X, se hace visible y permanente por el proceso a que se somete en la cámara oscura. Este proceso consta fundamentalmente del revelado y del fijado se guido de los correspondientes lavados para eliminar los productos químicos de los reactivos y detener la acción de los mismos.

Las distintas etapas que hay que seguir durante el proceso de la cámara oscura son :

1.- Revelado; esta operación se realiza haciendo actuar, sobre la película impresionada, una solución reductora que lleva a un grado de reducción mayor los cristales de halogenuro de plata, que, por la acción fotoquímica de la radiación, habían sido ya reducidos, pero no lo suficiente para hacerlos visibles. La acción reductora de la solución se extiende también a los demás cristales, pero su acción es mucho más intensa para los activados previamente. Una solución de revelado común consta esencialmente de un agente reductor (metal o hidroquinina), de un preservativo (sulfito sódico) cuya acción es prolongar la vida del reactivo revelador, puesto que con el oxígeno del aire se oxida fácilmente de un álcali débil (carbonato sódico) que actúa de acelerador al combinarse con el hidrácido que se libera en la reducción, desplazando, por tanto, el equilibrio químico de la reacción y por último, de un moderador (un bromuro soluble), para disminuir la acción reductora del baño sobre los cristales de halogenuro (AgBr) no impresionados, al intervenir también en el equilibrio químico, evitándose así que el velo de fondo sea intenso.

Existen muchas fórmulas de soluciones de revelado adecuados para cada tipo de película, que se recomiendan o indican por los fabricantes de las emulsiones y que se pueden adquirir en el comercio, bien en soluciones concentradas o en forma de polvo.

En el proceso de revelado, los principales factores que hay que considerar son :

- Tipo o naturaleza del revelador
- Temperatura del revelador
- Tiempo de revelado
- Grado de desgaste del revelador
- Agitación de la solución
- Tipo de película que se revela

2.- Detención del revelado; cuando el revelado es completo, debe destruirse la actividad del revelador que queda en la emulsión, lo que se consigue en el baño de detención o por un lavado prolongado con agua corriente. Si este se omite, el revelador continua hasta aproximadamente el primer minuto del fijado posterior; además, el álcali del revelador destruye parte del ácido del fijador, descompensando la formulación de éste y perdiendo la acción endurecedora, por lo que hay la posibilidad de que se produzcan manchas en la radiografía.

Un baño de detención se puede preparar diluyendo a un litro, de lo siguiente : 125 cc. de ácido acético al 28% , o 35 cc del glacial. Las películas deben mantenerse en este baño durante 30 a 60 segundos, después de lo cual ya puede llevarse al fijador. Si la solución de revelado contenía carbonato de sodio, hay que considerar que la temperatura del baño de detención sea de unos 20° para evitar la formación de pequeñas ampollas en la emulsión debido al desprendimiento de anhídrido carbónico.

3.- Fijado; tiene como objetivo principal eliminar las sales de plata no reducidas y estabilizar las reducidas, haciendo de esta forma permanente la imagen. Además este baño tiene la función de detener la acción del revelador, de neutralizar el álcali y de endurecer la gelatina de la emulsión para que resista el subsiguiente lavado. La operación puede considerarse como dividida en dos etapas; en la primera, se disuelven las sales de plata y desaparece el aspecto lechoso de la película, en la segunda, se difunden las sales disueltas y se endurece la gelatina. El tiempo total de fijado debe ser, por lo menos, el doble del que se requiere para que desaparezca el aspecto lechoso. Por lo general con un fijador relativamente reciente, el fijado se realiza en 5 minutos, no debiendo prolongarse más de 15, pues pueden originarse pérdidas de densidad radiográfica. Al introducir la película en el baño hay que agitarla vigorosamente y después cada unos dos minutos. La temperatura debe ser la del revelador.

Una solución de fijado consta de los siguientes reactivos :

- Un disolvente de los halogenuros de plata (tiosulfato sódico o aniónico)

un endurecedor (alumbre potásico)

- un preservador (sulfito sódico)

- un neutralizante moderado (ácido orgánico)

- un amortiguador

El fijador va perdiendo actividad con su uso, acumulando sales de plata solubles y su vida puede medirse por la capacidad para neutralizar el álcali de la emulsión revelada.

4.- Lavado; después de retirar la película del baño de fijado es preciso eliminar de la emulsión los reactivos del mismo, pues, de otra manera, con el tiempo se estropearía la imagen, decolorándose. Mediante lavado con agua corriente se consigue esta eliminación.

5.- Secado; esta operación se realiza en el aire ambiente o en aire caliente. En todos los casos hay que tener en cuenta precauciones para evitar que se adhiera polvo, que se peguen unas a las otras películas, salpicaduras de agua, etc. La gelatina, durante el secado, pasa por un estado en que está sumamente pegajosa y por ello es muy susceptible de alterarse físicamente.

2.3 La Calidad Radiográfica

Para que una radiografía pueda considerarse aceptable, tiene que tener, de acuerdo con el problema que se plantea, un mínimo de calidad, es decir, debe satisfacer las especificaciones radiográficas de cada caso en cuanto a la percepción de defectos y discontinuidades, y que éstos aparezcan con suficiente claridad, fidelidad u detalle, para poder determinar su clase y magnitud. La calidad de una radiografía está directamente relacionada con las condiciones operatorias tanto de exposición como de tipo geométrico, pero también depende de gran manera de la clase de películas, de las pantallas y del proceso fotográfico.

2.3.1 Sensibilidad Radiográfica

Al no existir una fórmula que exprese cuantitativamente la sensibilidad radiográfica, su definición es un poco ambigua e imprecisa y se refiere más bien a la claridad con que aparecen las imágenes en una radiografía o a la visibilidad de detalles, ello es frecuente, y es una función del contraste y de la definición, que se estudia en las secciones siguientes. No obstante en la práctica corriente y aunque ello no signifique un concepto puro de sensibilidad, se suele expresar cuantitativamente la misma como la relación entre la diferencia de espesores más pequeña que es visible en la radiografía, y el espesor de material que atraviesa la radiación. Si e es la diferencia más pequeña de espesores que se detecta y E el espesor total de la parte correspondiente a esta diferencia S viene dada por la ecuación :

$$S = \frac{e}{E} \times 100 \quad (22)$$

expresándola en tanto por ciento. De esta manera se deduce que cuanto más pequeño sea el valor numérico de S, mejor es la sensibilidad.

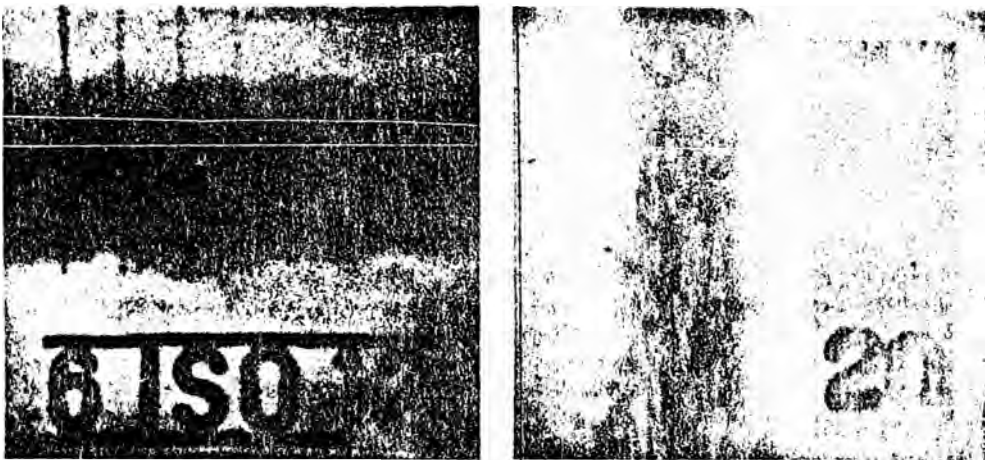
Esta expresión de la sensibilidad no tiene en cuenta algunos factores que influyen en la medida. Así la percepción de un detalle radiográfico por el ojo humano es posible por las diferencias de densidad en dicho detalle; sin embargo no todos los ojos poseen la misma sensibilidad para apreciar estas diferencias. Debido a ello, se toma una diferencia de densidades de 0.02 como valor medio de la mínima que puede apreciar el hombre. Otro factor que hay que tener en cuenta es la diferencia de detalle, pues una misma diferencia de densidades se aprecia más fácilmente cuando la transición de una a otra es brusca, que cuando es gradual, en la práctica, los defectos suelen tener contornos irregulares y espesores no uniformes, y por ello, la nitidez de sus imágenes es muy variable, aunque equivalgan a diferencias de espesores iguales.

2.3.2 Penetrámetros

Los penetrámetros son unos artificios que se utilizan para comprobar si una radiografía ha sido hecha adecuadamente. Consisten en formas geométricas bien definidas y sencillas, hechas de materiales que se comporten radiográficamente de manera similar al objeto que se ensaya, y cuyo espesor o escala de espesores depende del de dicho objeto. La imagen del penetrámetro debe aparecer en la radiografía con suficiente claridad y detalle, lo cual es una medida de la sensibilidad radiográfica en función de este artificioso, por lo que se denomina sensibilidad de penetrámetros que definida de forma más precisa; es el espesor del penetrámetro expresado en tanto por ciento del espesor total del objeto que produce una imagen radiográfica correctamente visible del detalle geométrico del penetrámetro.

El espesor del penetrámetro representa un tanto por ciento del espesor del objeto y la magnitud de este tanto por ciento viene determinada por las especificaciones de cada caso particular, aunque, generalmente y en trabajos de rutina, se considera una radiografía como aceptable, cuando se aprecia un espesor de penetrámetro que equivale a un dos por ciento del espesor total del objeto o, lo que es lo mismo, cuando la sensibilidad del penetrámetro es del 2%.

PENETRAMETROS DIN y ASME



Photograph above (taken directly from an image intensifier) show radiographic representations of the DIN (left) and ASME (right) penetrameters. Photograph below pictorially shows two similar penetrameters.

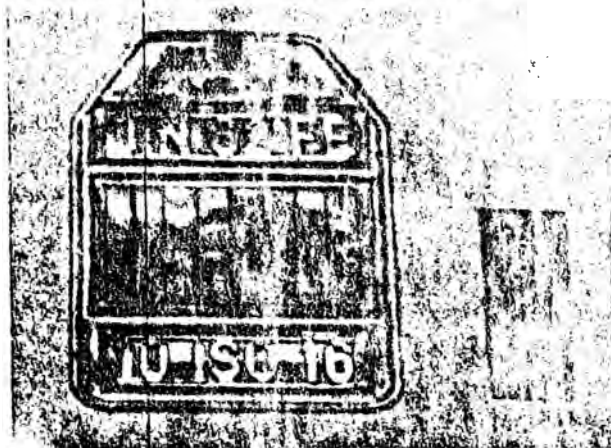


fig. (16)

Existen varios tipos de penetrómetros de uso en radiografía industrial y que se suelen clasificar en dos grupos : penetrómetros americanos y los europeos, clasificación que se hace de acuerdo con la frecuencia de su empleo en los países que respectivamente representan.

Entre los penetrómetros americanos, uno de los que más se usan en los estados unidos consiste en una placa de metal en la que se han hecho tres taladros circulares de diámetros progresivos y crecientes; existiendo tipos de esta clase de penetrómetros; el especificado por el A.S.M.E., para el control de calderas, y el de las fuerzas Armadas, en ambos tipos, los diámetros de los agujeros son respectivamente, 2T, 3T y 4T, siendo T el espesor de la placa, y la única diferencia consiste en que el diámetro mínimo de agujero es de 1/16 de pulgada para el penetrómetro A.S.M.E. y de 1/32 para el penetrómetro de las fuerzas armadas. En la mayor parte de las inspecciones radiográficas americanas se requiere que el espesor de placa represente un 2% del espesor del objeto y la radiografía debe considerarse satisfactoria cuando con ésta condición, puede distinguirse en la radiografía el agujero más pequeño; en casos especiales, como en el ensayo de reactores nucleares, se utilizan penetrómetros cuyo espesor es del 1% del total de la parte radiografiada. También existe en Estados Unidos la tendencia de usar penetrómetros de placa cuyos agujeros tengan 1T, 2T y 3T de diámetro, en vez de 2T, 3T y 4T, y juzgar la radiografía sobre la base del agujero más pequeño que se pueda detectar en la radiografía. Puesto que la detección de uno de estos agujeros depende de su diámetro y del espesor de la placa, cabe la posibilidad de relacionar ambas variables; entonces, si un agujero de diámetro 1T en un penetrómetro del 2% se distingue en una radiografía, con un penetrómetro de menor espesor podrá distinguirse el agujero 2T, usando la misma técnica radiográfica.

En Europa, el penetrómetro más generalizado es el DIN (ver Apéndice I), que consiste en una serie de alambres de diámetros especificados y progresivamente mayores, del mismo material que el que se ensaya, o que se comporta radiográficamente de la misma manera, y que separados convenientemente, van dispuestos en un soporte plástico o de un material poco absorbente a los rayos

X, de pequeño espesor. La sensibilidad se determina a partir del alambre más delgado que es visible en la radiografía. Así, como el penetrómetro americano tipo ASME sólo indica si una determinada sensibilidad ha sido alcanzada, el penetrómetro DIN permite establecer el valor de la sensibilidad bajo condiciones, con las que se opera; por otra parte, una imagen estrecha y alargada como la que produce un alambre, es más fácilmente detectable que un pequeño agujero, por lo que las determinaciones con un penetrómetro DIN puede ser menos rigurosas que las realizadas con un penetrómetro tipo ASME; sin embargo, esto no representa un inconveniente grande, puesto que las especificaciones suelen indicar no sólo la sensibilidad sino también el tipo de penetrómetro que define la mis-

Otro tipo de penetrómetro, usado principalmente en Europa, consiste en una escalera metálica, en cuyos escalones se han taladrado agujeros; la sensibilidad se determina dividiendo el escalón cuyo agujero justamente se empieza a ver con claridad en la radiografía, por el espesor de la parte que se ensaya. También existen penetrómetros que llevan entallas a profundidades escalonadas, que se han practicado en un bloque rectangular de espesor uniforme. En Inglaterra se utiliza mucho el penetrómetro de escalones de la B.W.R.A. que en cada escalón lleva una serie de perforaciones de 1/40 pulgadas, cuyo conjunto da lugar a una cifra distinta para cada uno de ellos.

A veces, cuando el objeto que se radiografía es muy pequeño, tiene la forma muy complicada, no es posible colocar sobre él un penetrámetro; en estos casos, se puede vencer tal dificultad - disponiendo el penetrámetro sobre un bloque uniforme del mismo material que el objeto que se ensaya y radiografiando ambos simultáneamente o, si el objeto posee grandes diferencias de espesor, utilizando una escalera metálica del mismo material, en cuyos escalones se colocan los penetrámetros adecuados.

Como final de esta sección, conviene recalcar, que, aun cuando se perciba en la radiografía un detalle de un penetrámetro, no tendrán que verse necesariamente el correspondiente a una heterogeneidad en la pieza que tenga las mismas dimensiones y naturaleza, puesto que en un penetrámetro las formas del detalle son bien definidas o constituyen un cambio brusco de espesores, mientras que un defecto natural de una pieza (por ejemplo una grieta, una cavidad, una inclusión, etc.) suelen tener formas menos definidas y poseen espesores que varían gradualmente. Por lo tanto un penetrámetro se usa para indicar la calidad de la técnica radiográfica, pero no para determinar aunque sea aproximadamente, la magnitud de un defecto.

2.3.3 Contraste Radiográfico

El contraste radiográfico puede definirse como la diferencia de densidades entre dos áreas adyacentes de una radiografía. El contraste influye notablemente en la calidad de una radiografía dentro de ciertos límites, cuanto mayor sea tal diferencia entre la parte que corresponda a un defecto y la del área que la rodea, mejor se podrá percibir aquél. El contraste radiográfico es consecuencia, a su vez, del contraste subjetivo y del contraste de película.

El contraste subjetivo se refiere a la relación de intensidades de rayos X transmitidas por las partes de un objeto, que se considera. Por lo tanto, este contraste depende de la naturaleza y espesores del objeto, de la distribución de la radiación difusa, pero es independiente del tiempo de exposición, del miliamperaje, del tipo de película y del proceso de cámara oscura de la misma.

Un objeto que constituye un bloque de espesor uniforme transmite a través de todos sus puntos la misma intensidad, por lo que no da lugar a contraste subjetivo, lo que no ocurre si el objeto presenta deficiencias de espesor; por otra parte, las propie-

dades absorbentes del material con respecto a la radiación son función de su naturaleza, por lo que dos objetos de la misma forma y diferencias de espesores pero de distinto material, no dan lugar a un mismo contraste subjetivo.

El contraste de película viene definido por la pendiente de la curva característica de la misma, por lo que depende de su tipo, de su proceso fotográfico y del grado de reducción (densidad), siendo independiente de la calidad y distribución de la radiación que llega a la película. De dos películas diferentes que han recibido la misma exposición, dará una imagen más contrastada aquella cuya pendiente de su curva característica, para dicha exposición, sea más acusada. Con películas de las clase I, II y III el contraste se mejora trabajando en zonas de densidad alta, ya que los gradientes de los puntos de las curvas características presentan valores mayores a densidades altas.

El proceso de revelado influye en el contraste de la película, dependiendo del tiempo y de la temperatura de operación y dentro de ciertos límites, aumenta con el tiempo y, a veces, con la temperatura del revelado.

2.3.4 Definición Radiográfica

La definición radiográfica se refiere a la nitidez con que se muestran los contrones de una imagen en la radiografía, o las diferencias de densidad entre zonas contiguas. La definición radiográfica depende del tipo de película y de pantallas utilizadas, del buen contacto entre ellas, de los factores de tipo geométrico que controlan la formación de imagen y de la calidad de radiación con que se opera.

2.3.5 Latitud Radiográfica

En la técnica radiográfica industrial, razones de economía de tiempo y dinero impulsan a que con el menor número de radiografías se obtenga la información necesaria para determinar sobre el problema de calidad planteado. Cuando se radiografía una pieza con grandes diferencias de espesores, solo tienen buena calidad para la interpretación aquellas partes de la radiografía que son visibles con los iluminadores de que se dispone y las que tienen la mínima densidad requerida. En estos casos, es preciso realizar, para las partes que no son útiles, otra u otras radiografías con distintas exposiciones. Se denomina latitud de una radiografía, el intervalo de espesores sobre el cual las densidades

que se obtienen son satisfactorias para la interpretación. La latitud está en razón inversa que al contraste, por lo que la latitud se mejora al aumentar el kilovoltaje.

Capítulo III

" INGENIERIA GENERAL "

3.1 Equipos Generadores de Rayos X

El conjunto de elementos, que convenientemente acoplados, permite la producción y utilización de rayos X, constituye un equipo generador de rayos X, el cual poseerá determinadas características que lo capacitarán para un determinado campo de aplicación. Estas características se refieren fundamentalmente a la intensidad y longitud de onda generadas, a las dimensiones del foco emisor y al tiempo de funcionamiento ininterrumpido. Las necesidades o requerimientos del ensayo no destructivo condicionan, además, otras características del equipo distintas de las anteriores, como forma, tamaño, peso, movilidad, accesibilidad a la pieza o zona que se radiografía, etc.

Existe una extensa variedad de equipos comerciales que cubren satisfactoriamente las necesidades actuales de la industria, siendo posible realizar desde microrradiografías hasta la radiografía de grandes espesores de material; es decir, se fabrican hoy desde equipos industriales que generan rayos X con tensiones de menos de 50 KV, hasta equipos que operan a 60 MeV y aun más.

3.1.1 Elementos Fundamentales de un Generador de Rayos X

Un equipo generador de rayos X posee tres componentes fundamentales que son :

- tubo productor de rayos X
- equipo transformador o generador de alta tensión
- y unidad de control y mandos.

3.1.2 Tubos de rayos X

Los tubos de rayos X se clasifican, según el método utilizado en la generación de electrones, en dos grupos : tubos de gas y de alto vacío.

En los tubos de gas los electrones se producen por el bombardeo de los iones positivos del gas sobre el cátodo frío, que suele ser una superficie plana de aluminio. En efecto, cuando la presión del tubo de gas se reduce a una pequeña fracción de milímetro de mercurio, y se aplica a los electrodos una diferencia de po

tencial apropiada, tiene lugar una ionización del gas residual, - produciéndose electrones e iones positivos. Debido a la diferencia de potencial, los iones positivos chocan contra el cátodo, que emite entonces electrones, los cuales son proyectados de éste perpendicularmente y en trayectorias rectilíneas; cuando estos electrones, acelerados por la diferencia de potencial, chocan contra las paredes del tubo o contra el ánodo, se emiten rayos X. Este tipo de tubo, que es el original de Roentgen y que previamente lo empleó Crookes en sus estudios de descargas eléctricas, presenta dificultades operatorias, ya que las características de la radiación emitida dependen en parte de la presión del gas en el tubo; cuando esta presión cambia, es necesario efectuar ajustes. Se han hecho muchas modificaciones en estos tubos para conseguir regular la presión del gas y prolongar la vida útil de los mismos. El carácter de los rayos X también depende del voltaje aplicado, ya que al variar éste, también varía el número de iones formados y, en consecuencia, la corriente electrónica. Hay, pues una imposibilidad de variar el voltaje y la corriente independientemente.

Aunque en difracción de rayos X los tubos de gas puedan presentar alguna ventaja; como la de conseguirse gran pureza espectral, la radiografía industrial no se beneficia de estas ventajas y sí se perjudica por los inconvenientes antes señalados, por lo que hoy, casi exclusivamente, se utilizan los tubos de alto vacío.

En los tubos de vacío, así llamados, por el alto grado de vacío en ellos, los electrones proceden del cátodo, donde se emiten por la acción del calor o por el empleo de un gradiente de potencial suficientemente elevado para la emisión. Como en los tubos de gas, en el ánodo está incluido el anticátodo, que generalmente se fabrica con un material de alto punto de fusión y elevado peso atómico para que resista lo mejor posible el calor generado en el bombardeo electrónico y al mismo tiempo para que posea buena conductividad térmica y su presión de vapor sea baja. El número atómico elevado contribuye a un mejor rendimiento en la emisión de rayos X; el punto de fusión y conductividad térmica elevados, permite un máximo de energía para un determinado tamaño focal, y una presión de vapor baja permite reducir la cantidad de metal sublimado sobre las paredes del tubo.

Los tubos de rayos X de alto vacío, basados en la emisión de electrones por cátodo caliente, aprovechan el efecto termoeléct

trico; por otra parte, los estudios de Langmuir demostraron que la emisión de electrones no solo persiste en alto vacío, sino que se favorecen al eliminarse las últimas trazas de gas en el filamento y otras partes del tubo. En 1913, Coolidge de la General Electric Co., animado por los estudios de Langmuir, fabricó el primer tubo de rayos X con cátodo caliente.

Existen numerosos diseños y disposiciones de tubos de este tipo, pero esencialmente consisten en una ampolla de vidrio en la que se ha hecho el vacío más alto posible, provista de un ánodo (generalmente de cobre) en el que se inserta un anticátodo (de Wolframio en la mayoría de los tubos industriales), y de un cátodo consistente en un foco o filamento de wolframio que se calienta por una corriente auxiliar; este filamento suele estar situado en el centro de un alejamiento cóncavo, para focalizar el haz de electrones justamente sobre el anticátodo. El ánodo se refrigera mediante un radiador acoplado o por circulación de agua o aceite, consiguiéndose en este caso un funcionamiento más continuado del tubo.

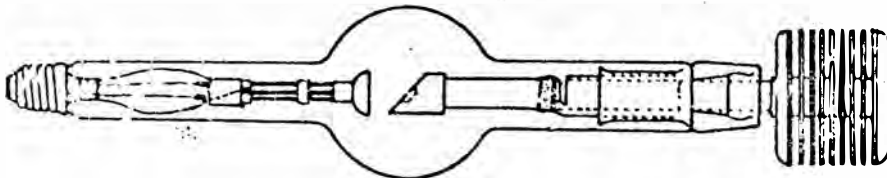


Fig. 17.- Esquema de un tubo de rayos X con cátodo caliente. (De «Nondestructive Testing Handbook»).

Si se compara un tubo de gas con otro de cátodo caliente, las principales ventajas que ofrece éste son :

- a.- El voltaje y la corriente pueden variarse independientemente.
- b.- permite una mayor reproductibilidad de resultados
- c.- el tamaño del tubo puede ser mucho menor
- d.- se simplifica el equipo de rayos X, al ser posible que funcione directamente con un transformador.
- e.- mayor duración del tubo.

La principal limitación de voltaje en los tubos de rayos X se debe al efecto del campo eléctrico de la corriente. Este efecto puede reducirse por una construcción y separación adecuadas de los electrodos, eliminando toda partícula desprendida del tubo y por una completa degasificación de aquellos. El empleo de ánodos cóncavos también permite utilizar mayores potenciales sobre todo si la corriente electrónica del tubo es elevada ya que así se consigue que alcancen las paredes del tubo o el soporte del ánodo un número menor de electrones reflejados por el anticátodo; igualmente es ventajoso que las paredes del tubo sean gruesas y que éste se encuentre sumergido en aceite. Según estas condiciones, es posible aplicar a los tubos de alto vacío, del tipo antes descrito, potenciales de hasta 400 KV sin peligro alguno.

En los tubos de cátodo caliente además de la disposición general de sus elementos indicada antes, existen modificaciones de ésta que permiten aplicaciones más específicas o mejores rendimientos. Así, con los tubos de ánodo radial es posible hacer radiografías en panorámica o en cuerpos cilíndricos, ya que la emisión, que se efectúa desde una prolongación del tubo, tiene una apertura de 360° . También se fabrican tubos con doble foco que proporcionan un foco grande y otro pequeño. Los inconvenientes que, en cuanto a funcionamiento, resultan de la utilización de un foco muy fino, se evitan en parte mediante el empleo de ánodo rotatorio, el cual está constituido por un ánodo circular de wolframio, de dimensiones grandes, que gira a unos 3,000 rpm., con lo que el haz electrónico siempre hace impacto en un anticátodo "fresco", puesto que el calor generado se disipa rápidamente en una masa grande. Este dispositivo se usa principalmente en aplicaciones médicas. Por último, se construyen tubos de foco fino que focalizan magnéticamente el haz de electrones sobre un punto del anticátodo el cual se refrigera por inyección.

Para aplicar a los tubos de rayos X voltajes superiores a 400 KV, se utilizan tubos cuya construcción está basada en el principio de secciones múltiples o de cascada, por el cual el potencial se aumenta en escalones progresivos de voltaje relativamente pequeño. Este tipo de tubo está construido con secciones de tubo de vidrio de borosilicato unidas mediante anillos Fernico, y en cuyo conjunto se hace el vacío. A estos tubos se les puede aplicar potenciales máximos comprendidos entre 1 y 2 millones de voltios. En un tubo de 2 millones de voltios suele haber 24 secciones

por lo que los electrones se aceleran en etapas de 83,500 voltios. Los electrones se emiten por un cátodo caliente, y el ánodo que es cóncavo, se construye con cobre, en el cual se inserta un anticátodo de wolframio. El cátodo y el ánodo se encuentran situados, respectivamente, en los extremos opuestos del tubo. Debido a la gran distancia que separa a estos electrodos, suele ser necesario focalizar y controlar el haz de electrones para que alcance correctamente el anticátodo máxime teniendo en cuenta que el ánodo es hueco. Aunque el carácter divergente del haz electrónico puede reducirse por el campo electrostático existente entre cada sección, lo mejor es utilizar una focalización del tipo magnético.

Un tubo moderno de rayos X, también de secciones múltiples, es el que hace uso de la aceleración lineal. Este tubo puede operar con energías de varios millones de electron-voltios y su diseño y fabricación se debe a la Metropolitan Vickers Electric Co y a Ginzton.

El principio en que se basa el tubo es el siguiente; los electrones emitidos por un cátodo caliente se "inyectan" en una guía de ondas circulares que posee una estructura interior especial. Las ondas de radiofrecuencia producidas por un magnebrón o generador similar se dirigen a través de una guía de ondas rectangular al extremo de entrada del generador circular, con objeto de acelerar los electrones que allí entran. Cuando estos electrones pasan a través de la guía de ondas circular, son acelerados desde su velocidad de inyección de $0.4c$ (c es la velocidad de la luz) hasta $0.9c$ cuando alcanzan el extremo del tubo. La guía de ondas está diseñada de tal forma que, cuando los electrones son acelerados, las ondas de radiofrecuencia también se aceleran. Los electrones ganan energía a expensas de las ondas que son atenuadas. En el extremo de salida de la guía de ondas, los electrones chocan con el anticátodo, de tipo transmisión y que suele ser de oro o de wolframio y emiten rayos X.

En la actualidad se construyen tubos que permiten generar rayos X con energías entre 15 y 100 MeV, mediante el aparato llamado Betatrón que utiliza principios electromagnéticos.

3.1.3 Equipos Transformadores

Un equipo transformador es una unidad que proporciona al circuito del aparato de rayos X la energía de características eléctricas apropiadas para su funcionamiento, transformando la que recibe de la red de suministro.

El diseño y características de estos equipos de transformación dependen de la energía de los rayos X que va a generar el tubo. No obstante, pueden clasificarse en dos grupos : equipos transformadores para unidades de bajo y medio voltaje (hasta 400 KV) y equipos para unidades de alto voltaje (más de 400 KV).

Un equipo transformador para unidades de voltaje medio y alto consta de : transformador para la corriente de filamento y otros componentes cuya presencia depende del circuito de alimentación y demás características del aparato de rayos X. Estos componentes pueden ser : válvulas rectificadoras para cambiar la corriente alterna en continua, condensadores para filtros o dobladores de voltaje, transformadores para los tubos rectificadores de alta tensión y dispositivos protectores de extracorrientes o sobretensiones.

En el transformador de alta tensión, la corriente alterna de la red la recibe el arrollamiento primario, el cual induce una corriente en el secundario. El primario tiene relativamente pocas vueltas al contrario que el secundario. La transformación o cambio de voltajes es proporcional a la relación entre el número de vueltas de los dos arrollamientos. En las unidades de rayos X de alto voltaje, se usan transformadores de tipo especial que proporcionan el potencial requerido en las mismas. Así en las que utilizan tubos de rayos X de secciones múltiples se emplean transformadores de resonancia, en los cuales al circuito de alta tensión se le hace resonar a frecuencia de la corriente alterna de la red de suministro, de esta forma se consigue reducir el peso y tamaño que se requeriría con un transformador de corriente de tensión similar, ya que se elimina el núcleo de hierro y el aislante entre él y el arrollamiento secundario.

La elevada energía que adquieren los electrones en los tubos de rayos X de secciones múltiples también se consigue si, en vez de un transformador de resonancia, se utiliza directamente por el generador electrostático ideado por R. J. Van de Graaff.

3.1.4 Equipos Industriales de Rayos X

La elección de un equipo de rayos X depende de las necesidades que tenga que satisfacer y de la factibilidad de aplicación. No es fácil hacer una clasificación o relación de equipos de rayos X teniendo en cuenta estos requerimientos, y lo más lógico parece que es agruparlos de acuerdo con las características de los rayos X que producen o, lo es lo mismo, según los potenciales de trabajo. Esta extensa gama de potenciales permite que se clasifique en equipos de bajo voltaje, medio y de alto voltaje. El diseño de los primeros es relativamente sencillo y por ello todos sus componentes pueden reunirse en una sola unidad. Los segundos suelen dividirse en dos clases : equipos "móviles", con sus componentes formando unidades separadas y equipos tanque o portátiles, en los que el transformador y el tubo se incluyen en un mismo recipiente, no siendo necesarios cables de alta tensión exteriores. Los equipos de alto voltaje constituyen sistemas especiales y distintos y no cabe en ellos ninguna clasificación. A continuación se dan algunas de las características de equipos de bajo y medio voltaje.

Equipos de 10 a 100 KV.-

Generan rayos X de baja energía, que se utilizan en casos especiales como microrradiografía, secciones delgadas de materiales ligeros etc. Con objeto de disminuir la absorción parcial de los rayos X por la ventana del tubo, éste suele ser de Berilo.

Equipos de 30 a 150 KV.-

Los rayos X que producen estos equipos son apropiados para el ensayo de materiales constituidos por metales de aleaciones ligeras, o secciones delgadas de otros más pesados. Tienen la ventaja de que sus tubos pueden operar con intensidades de corriente mayores que los tubos de potencia más elevados y muchos de ellos son portátiles.

Equipos de 200 KV .-

Estos equipos permiten ya el ensayo de materiales pesados con espesores razonables y abarcan una gama amplia de espesores de materiales ligeros. En estos casos es corriente que el tubo de rayos X esté separado del transformador, aunque en los modelos recientes todas las partes del equipo suelen ir montadas en un mismo recipiente o tanque. Por otra parte, utilizando tubos con circuito autoretificador se simplifica el equipo.

Equipos de 300 .-

Son los más difundidos en la industria ya que permiten cubrir las necesidades más corrientes. Los modelos clásicos tienen sus componentes separados, y aunque su peso es ya considerable llevan dispositivos que permiten su movilidad con poco esfuerzo. El tubo de rayos X va sumergido en aceite que se hace circular para la refrigeración del ánodo, y se energiza mediante un circuito doblador de voltaje. Posteriormente, estos equipos se simplificaron utilizando circuito autoretificador y también incluyendo todas las partes en un tanque.

Equipos de 400 KV .-

Constituyen el límite superior, en cuanto a voltaje, de los grupos que utilizan tubos de una sola sección; sin embargo, para que puedan funcionar con continuidad, estos tubos deben tener el ánodo cóncavo o hueco, en el fondo del cual se encuentra el anticátodo; con esto se consigue retener o atrapar a los electrones secundarios o reflejados por el foco, evitando que lleguen a las paredes del tubo y se produzcan gradientes de potencial entre ánodo y cátodo. Se utiliza circuito doblador de voltaje, aunque actualmente se utilizan equipos, menos pesados, con circuito autoretificador.

En el apéndice número 2, se ofrece amplia información con respecto a la gama de equipos industriales de rayos X, con los cuales, podemos contar en nuestro medio.

Equipos de alto voltaje .-

El creciente desarrollo de la industria y las especificaciones sobre la calidad de los productos manufacturados han creado la necesidad de ensayo radiográfico de piezas de espesor considerable, ensayo que no podría realizarse con los diseños clásicos de equipos. Esta necesidad ha constituido la causa para la proyección de nuevas unidades radiográficas que permitieran resolver los problemas planteados y fruto de ello es la realización actual de equipos radiográficos que permiten la producción de rayos X con energías tan extraordinariamente altas, que han hecho modificar las técnicas radiográficas clásicas.

Los equipos que trabajan con un millón de voltios o más requieren de un diseño distinto de tubos. Para estos efectos se constituyen equipos con un transformador de resonancia que permi-

ten

operar con tensiones, entre 1 y dos millones de voltios y utilizar focos de pequeñas dimensiones, entre 2 y 10 mm de diámetro, gracias a la focalización magnética del haz de electrones.

Una unidad que no utiliza transformador es el equipo con generador electrostático, basado en el generador de Van de Graaff. La High Voltage Engineering Corporation construye aparatos de 1 o de 2 MeV, que incluyen en el mismo tanque el tubo de rayos X de secciones múltiples y el generador. El generador y tubo del equipo de 2 MeV tiene una longitud de 2.5 m. y un diámetro de 0.9 m, aproximadamente y pesa unas 2 Ton. Utiliza como aislante una mezcla de Nitrógeno y anhídrido carbónico a 26 atmósferas de presión. El tubo tiene 43 electrodos y un anticátodo de oro, consiguiéndose por focalización magnética tamaños focales tan pequeños como 0.2 mm. La tensión y la corriente y tensión del tubo se pueden variar independientemente, lo que hace posible operar a tensiones desde 500 a 2000 KV y con intensidades de hasta 0.25 mA.

Otro equipo de alto voltaje es el Betatrón, que viene a ser una combinación de imán y transformador para guiar y acelerar los electrones en el tubo de rayos X.

La aceleración lineal por ondas de radiofrecuencia, es otra técnica que se aprovecha para la construcción de equipos de rayos X de alto voltaje. Los electrones se aceleran en el tubo (guía de ondas), que es recto, a energías muy altas. Un acelerador lineal consta esencialmente de un cañón electrónico, un generador de radiofrecuencia y una guía de ondas. En la guía de ondas, los electrones son acelerados por el campo eléctrico axial que se produce en la misma, mediante el oscilador de radiofrecuencia.

3.1.5 Circuitos Básicos de un Equipo de medio voltaje

El paso de la corriente electrónica a través de un tubo de rayos X es en la dirección cátodo-ánodo; en consecuencia, la corriente de alta tensión que precede del transformador y llega a los electrodos del tubo, debe rectificarse, convirtiéndola en corriente continua pulsatoria; esta rectificación la consigue el mismo tubo, pero también puede realizarse antes de llegar a él. Los tipos de corriente continua que entonces se obtiene, y por tanto el grado de aprovechamiento de la energía que suministra el transformador, dependen de los sistemas y circuitos de rectificación.

Los sistemas de rectificación usuales son : autorectificación, rectificación mecánica, rectificación por válvulas y por semiconductores. Los equipos industriales de rayos X utilizan preferentemente el sistema de autorectificación y el de rectificación por válvulas; la rectificación mecánica, que es el método más antiguo, está hoy en desuso, y la rectificación con semiconductores de reciente aplicación en los equipos médicos, no está aún difundida en equipos industriales.

A continuación se indican los circuitos eléctricos más generales en los equipos de rayos X de medio voltaje, de acuerdo con la clasificación antes dada, de equipos tanque y equipos con elementos separados. Los equipos tanque suelen utilizar la autorectificación que proporciona el tubo de rayos X. En la figura (18) se representa un circuito de una unidad de este tipo, con cátodo derivado a tierra, circuito que se aplica normalmente en unidades de hasta 150 KV y 5 a 6 mA, que destacan por su peso y tamaño reducido; no precisan transformador de filamento aislado, por la derivación del cátodo a tierra.

Otro esquema de circuito utilizado en unidades tanque es el de la figura (19), con tubo de rayos X autorectificador y el centro del secundario del transformador derivado a tierra, este circuito requiere de uso de transformador aislado para la corriente de calefacción del filamento, y aunque el tamaño del tanque -- también es reducido sus dimensiones son algo mayores que ne el caso anterior debido al transformador de filamento; por otra parte, como el centro del transformador de alta tensión está unido a tierra, solo se requiere la mitad del aislante del esquema de cátodo derivado a tierra, la tensión entre el cátodo y tierra y entre el ánodo y tierra es la mitad de lo que existe entre cátodo y ánodo. Estos circuitos se suelen utilizar en equipos de 100 a 300 KV con intensidad de corriente de hasta 15 mA. El tubo se refrigera por un radiador sumergido en el aceite del tanque o por circulación de este aceite mediante una bomba o, si el circuito aislante es con gas, por agitación de éste.

En los equipos de rayos X cuyos componentes están separados, el tubo de rayos X va montado a la unidad de transforma--ción por medio de cables de alta tensión protegidos. El potencial entre ánodo y cátodo es el doble del que existe entre cada uno de estos electrodos y tierra. A continuación se hace referencia de los circuitos más usuales de estos equipos :

El circuito de Graetz (fig. 20) es de puente e incluye 4 válvulas termoiónicas. Con esta disposición cada pareja de tubos se energiza alternativamente y el tipo de corriente que se obtiene es de onda completa.

El circuito de Villard es un circuito doblador de voltaje, ya que el pico de tensión aplicada al tubo tiene un valor doble del de la tierra suministrada por el transformador. El esquema lleva 2 condensadores entre el secundario del transformador y el tubo de rayos X y dos válvulas rectificadoras.

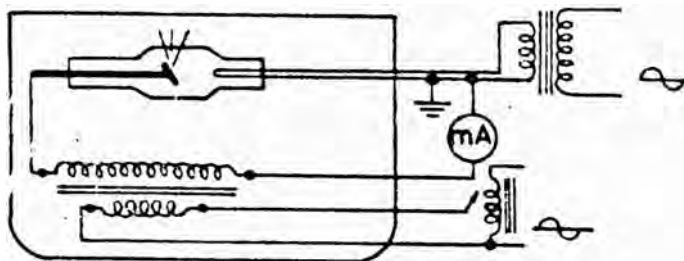


Fig. 18.—Circuito de un equipo de rayos X, tipo tanque, con cátodo derivado a tierra. (De «Nondestructive Testing Handbook»).

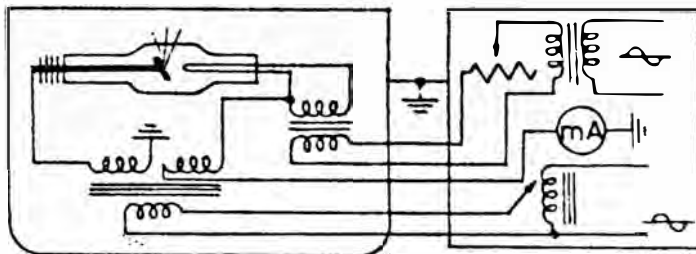


Fig. 19.—Circuito de un equipo de rayos X, tipo tanque, con el centro del secundario del transformador derivado a tierra. (De «Nondestructive Testing Handbook»).

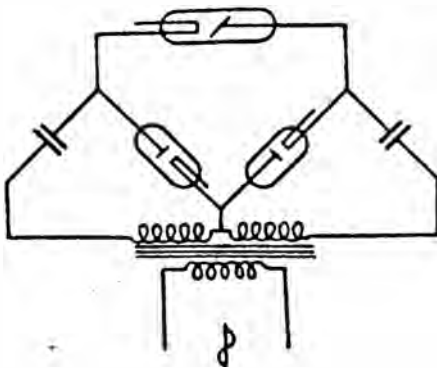


Fig. 20.—Circuito Villard doblador de voltaje. (De «Nondestructive Testing Handbook»).

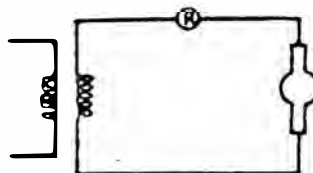


Fig. 21.—Circuito de Graetz.

3.2 LA INTERPRETACION RADIOGRAFICA

3.2.1 Consideraciones Generales

El problema de la interpretación radiográfica es de tal complejidad, que no es posible dar normas definidas para su realización. Cada problema planteado puede constituir un caso particular de interpretación, y aunque afortunadamente no siempre ocurre esto, sino que existe la posibilidad de una cierta relación entre los defectos de un material y la propia naturaleza de éste, así como su procedimiento de fabricación, en esta sección indicaré algunos ejemplos fundamentales de interpretación que puedan servir de orientación.

Esencialmente, la inspección por rayos X tiene por objeto asegurar la calidad de los materiales o de partes de ellos, o también del proceso de su fabricación. Conviene aclarar que el concepto de calidad tiene un significado relativo, ya que una pieza con cierto número y magnitud de defectos o imperfecciones puede juzgarse de calidad suficiente para un determinado servicio y de mala calidad para otro. Lo que hay que enjuiciar realmente es el grado de imperfección, más bien que el de perfección; si la perfección fuese el nivel de calidad de un producto, el problema de interpretación radiográfica sería relativamente sencillo, puesto que una radiografía que pusiera de manifiesto cualquier desviación de esa perfección haría que el producto fuera rechazado y, entonces, no se requeriría mucha destreza por parte de la persona que interpreta una radiografía. No cabe duda que un producto sea perfecto es lo ideal, pero no por ello puede sacrificarse la economía cuando, con menos perfección se satisfacen las necesidades previstas.

Quien interpreta una radiografía debe considerar los distintos niveles de calidad para un producto, y el nivel de calidad que se exige a un producto para un determinado uso.

Cuando se va a interpretar una radiografía, lo primero que hay que juzgar es la propia calidad de la misma, pues sino es suficiente para poner de manifiesto el tipo de defectos que pueda presentar el material que se ensaya, antes de seguir adelante hay que rechazar la radiografía .

Si ésta tiene calidad suficiente a continuación se procede a la detección e identificación de los defectos que registra la imagen radiográfica; pero es necesario entonces, conocer pre---

viamente cuáles son los que pueden ocurrir con el tipo de material que se ensaya. Por último una vez identificados los defectos hay que dictaminar si el número y magnitud de éstos hacen que el material pueda o no ser aceptado.

3.2.2 Normas Radiográficas

La interpretación radiográfica y el dictamen consecuencia de esta interpretación se basa en una serie de normas, especificaciones o patrones que o bien sirven como guía para la identificación de defectos y discontinuidades o bien para especificar si estos hacen que el material carezca de la calidad requerida. Cuando su función es la citada en primer lugar, suelen consistir en una serie de radiografías o reproducciones de ellas que muestran la forma y el aspecto de los distintos defectos, a las que acompaña una descripción y un diseño de los mismos. Cuando se limita a determinar la clase y magnitud de las imágenes, tiene que referirse a su nivel de aceptación, y consisten en una serie de reglas escritas o bien en tipos de radiografía.

Las normas radiográficas pueden tener un carácter general o uno específico. Las primeras son establecidas por una sociedad técnica, por una industria importante, por un organismo militar, etc., y, necesariamente son amplias, ya que se aplican en la inspección de un tipo o de un grupo de materiales. En nuestro país, no se han dado aun tales normas. Como ejemplo, podemos citar las normas de La Artillería de los Estados Unidos para la inspección de soldaduras en acero, las cuales se aplican para cualquier clase de soldadura al arco en este material. Las normas radiográficas que tienen un carácter específico son válidas únicamente para un determinado contrato y se establecen por el fabricante o por el usuario o por ambos. Por otra parte, en las normas más amplias se da para varios niveles de calidad, según sea el caso, se hace uso de las que correspondan al nivel requerido.

A continuación citamos algunas normas de carácter general; vigentes en los Estados Unidos;

ASTM. Reference Radiographs of steel Welds. ASTM Designation E-99 Filadelfia: The American Society for Testing Materials.

ASME Boiler Construction Code for Unfire Pressure Vessels. Nueva York : The American Society of Mechanical Engineers. Bureau of

Ships. Radiographic Standards. Washington D. C.: U.S. Department of the Navy, Bureau of Ships.

ASTM. Reference Radiographs for Inspection of Aluminium and Magnesium Castings, Filadelfia : The American Society for Testing Materials.

En el apéndice (3) se reproduce la traducción de la Norma DIN -54111; la cual se refiere al procedimiento para el examen de uniones soldadas en piezas metálicas con rayos X.

3.2.3 Consideración y Localización de algunos defectos en piezas fundidas, y sus imágenes radiográficas.

A continuación y a manera de ejemplo, se citan algunos de los defectos que aparecen más frecuentemente en piezas fundidas metálicas, indicándose las causas más probables de su formación así como el aspecto de las imágenes radiográficas a que dan lugar.

Sopladuras.- son defectos que con frecuencia aparecen en piezas fundidas y que generalmente se deben a una turbulencia del material cuando se cuela, a que el metal "atrape" gas que está disuelto en él mismo cuando se desprende, a gas desprendido de los machos y moldes verdes, etc. Normalmente, este gas se debe escapar a través de los moldes de arena o de los bebederos y mazaretas, pero si el metal se solidifica antes de que el gas escape, queda atrapado en la fundición.

Estos defectos aparecen en la radiografía como manchas oscuras redondeadas con bordes suaves. Cuando las sopladuras están llenas de escoria, que realmente son inclusiones de las verdaderas sopladuras.

Considerando individualmente las sopladuras, éstas debilitan la pieza en función de su magnitud y espesor de la parte donde se encuentren, pero cuando están agrupadas estrechamente hay que considerarlas como si todas ellas constituyeran una gran cavidad. Otro caso especial es cuando las sopladuras aparecen alineadas, pues entonces se comportan como medios de propagación de fracturas, especialmente si la pieza se somete a largas y repetidas cargas o a vibraciones, etc.

Porosidad gaseosa.- se debe a las mismas causas que las sopladuras, es decir, a un atrape de gas disuelto en el metal fundido o del procedente de machos y moldes de arena verde. También se produce cuando el molde se mantiene a una temperatura relativamente alta durante un período de tiempo demasiado largo, o también por la presencia de impurezas o de humedad en el metal o en el molde.

En la radiografía, la porosidad gaseosa aparece como -- pequeñas manchas redondas o casi redondas y oscuras, cuyo tamaño varía desde el que proporciona un aspecto granular, a la imagen, hasta el de manchas claramente definidas. Existe alguna confusión en la interpretación radiográfica de sopladuras y de porosidad gaseosa, hasta el punto que algunos confunden ambos términos. Aparte del menor tamaño de las manchas a que da lugar la porosidad gaseosa, ésta suele afectar a una extensa zona de la imagen, mientras que las sopladuras, son grupos de cavidades.

Los vacíos que la porosidad gaseosa originan en el material suelen ser esféricos, pero también puede ocurrir que tales vacíos -- sean más alargados que esféricos, dando entonces esta porosidad a la radiografía un aspecto más moteado.

La porosidad gaseosa afecta la resistencia de la pieza de acuerdo con la magnitud del defecto, aunque en general el perjuicio es pequeño, a no ser que, cuando se mecanice, las exigencias de acabado sean rigurosas.

Rechupes.- la formación de rechupes se debe a aproximadamente las mismas causas que la porosidad de contracción, es decir, a defecto de aporte de metal fundido cuando la pieza solidifica. Por tanto, estos defectos también se localizan preferentemente en la parte de la pieza que solidifica más tarde.

Los vacíos que en la pieza originan los rechupes son de tipo muy variado y lo mismo puede decirse de su extensión y disposición; así, a veces discurren paralelamente unos a otros, como -- puede suceder en chapas que se han colocado verticalmente dando -- entonces lugar a imágenes radiográficas alargadas, ligeramente sinuosas. Otras veces, los rechupes están distribuidos irregularmente por la pieza o presentan ramificaciones. Puesto que estos defectos son espacios vacíos en la pieza, sus imágenes radiográficas son oscuras; la forma de las mismas es muy variable, pero --- siempre está caracterizada por su irregularidad.

Inclusiones .- las inclusiones pueden ser de un material más pesado o menos pesado que el de la pieza, y por ello, la correspon --
diente imagen radiográfica aparece, respectivamente, más clara o
más oscura que la de aquella. Puesto que las inclusiones pueden -
ser de tipo muy variado, lo mismo que ocurre con el aspecto de sus
imágenes radiográficas. Algunas veces conviene hacer dos o más ra
diografías con distintas posiciones de la pieza, para determinar
la magnitud de una inclusión y así poder determinar el efecto per
judicial de la misma.

Segregaciones .- se producen cuando uno omás constituyentes de una
aleación no se han difundido correctamente y entonces se concen--
tran en determinadas zonas de la pieza. Las imágenes radiográfi
cas de las segregaciones aparecen con densidad variable y su aspec
to, en cuanto a forma, suele ser parecido al de copos de nieve.

Falsa Unión Fría .- es un defecto que se origina cuando en el moli
de, un chorro de metal prácticamente se ha solidificado y de en
centrarse con otro chorro opuesto, ocurriendo entonces que ambos
se unen en forma oncompleta, ya que el metal al haberse enfriado
, no existe una buena difusión. Las imágenes radiográficas de es
tas falsas uniones genralmente son líneas oscuras, bien definidas
de longitud variable y de aspecto intermitente o continuo.

Grietas.- las causas de formación de grietas son muy diversas.
Así, pueden originarse cuando al retirar la pieza del molde no se
tiene suficiente cuidado; cuando la pieza sufre movimientos den--
tro del molde mientras solidifica etc. Otras veces, se originan
grietas por tensiones térmicas durante el tratamiento térmico de
la pieza.

En una radiografía las formas de una grieta aparecen co
mo líneas oscuras, continuas o intermitentes. Debido a que la an
chura de una grieta suele ser pequeña, cuando se trata de grietas
irregulares sólo se aprecia en la respectiva radiografía aquella
posición o porción de las mismas que están bien alineadas con el
haz de los rayos X y, entonces, puede suceder que las imágenes
de las grietas aparezcan intermitentes aun cuando ellas sean con
tinuas. Para la buena detección de estos defectos, conviene te
ner cuidado en la colocación apropiada de la pieza con respecto
al haz de radiación o realizar varias radiografías en distintas
posiciones.

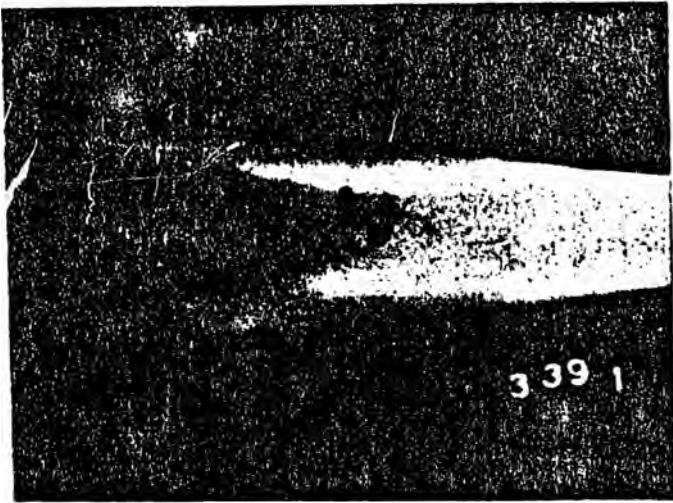


fig. 21 .—Rechupes.

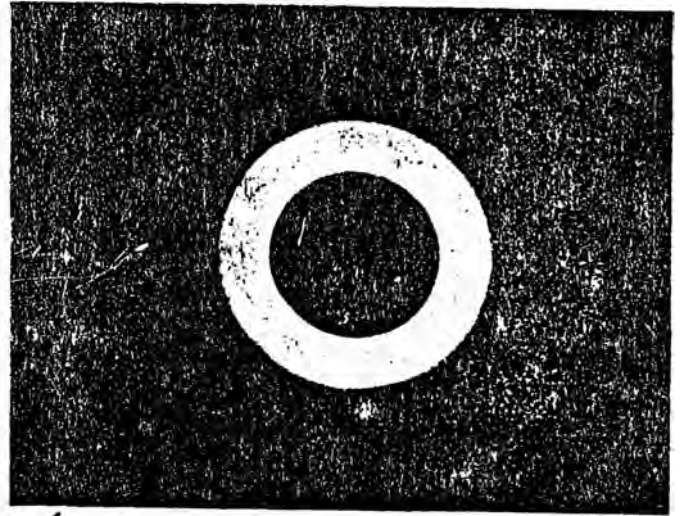


fig. 22. .—Porosidad gaseosa.

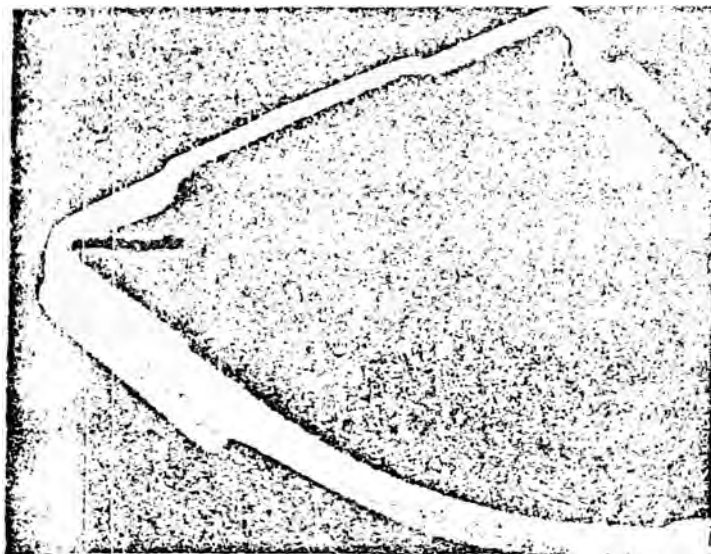



fig. 23 .—Grieta. (X-Ray Products Corp.).

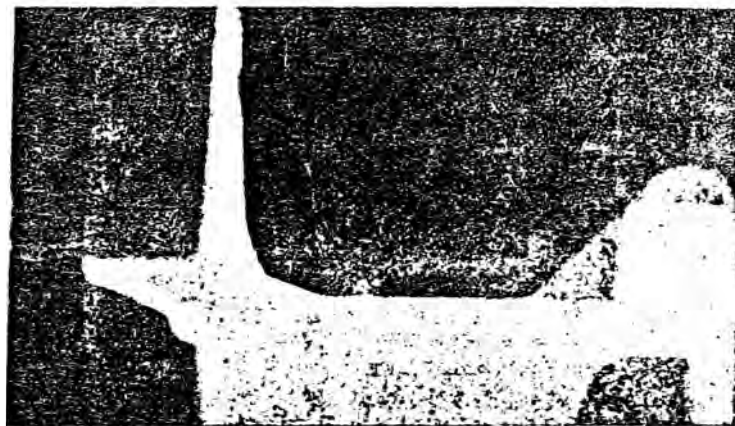



fig. 24 .—Porosidad gaseosa y sopladuras alineadas. (X-Ray Products Corp.).

Las grietas en piezas fundidas generalmente son defectos graves por su caracter autopropagante de fracturas, que implican la no aceptación de ellas, si se tiene en cuenta, además, que las que son detectables por radiografía son ya de magnitud considerable en relación con su efecto perjudicial.

3.2.4 Consideración y Localización de algunos defectos en cordones de Soldadura.

La soldadura al arco es un proceso de fusión en el que la unión de los metales se produce reduciendo, las superficies a ser juntadas, al estado líquido permitiendo la solidificación. Durante este proceso se pueden producir los siguientes defectos: Porosidad; son los vacíos producidos en un material sólido, los cuales se forman por la inclusión de los gases resultantes de las reacciones químicas. Estos defectos se pueden controlar evitando el exceso de corriente y el arco longitudinal.

En la imagen radiográfica aparecen como una serie de manchitas oscuras de distintos tamaños y de forma redondeada; sus distribuciones obedecen al tipo de porosidad presente:

a.-) Porosidad uniformemente dispersa; las dimensiones varían desde el tamaño microscópico hasta $1/8''$ o más, pero para una soldadura dada debido a las condiciones, tienden a formarse de un solo tamaño.

b.-) Porosidad agrupada; se asocian con cambio de condiciones del arco, cuando se para la soldadura para cambiar de electrodo.

c.-) Lineal; cuando existen 3 o más cavidades con un diámetro no menor de $1/16''$ distribuidas en una línea paralela al eje longitudinal de la soldadura.

Inclusiones no metálicas ; se consideran como tales los óxidos y otros sólidos que se encuentran como inclusiones de forma globular o alargada en la soldadura. Durante la deposición y solidificación del material ocurren reacciones químicas entre el metal, el arco, el recubrimiento del electrodo y la escoria depositada. Algunos de los productos de estas reacciones son compuestos no metálicos poco solubles en el metal fundido y que tienden a depositarse. Durante el proceso de soldadura, la escoria que se forma es forzada debajo de la superficie del metal fundido debido a la agitación producida por el arco. Otras veces la escoria se deposita delante del arco siendo cubierta por la soldadura.

La alta viscosidad de la soldadura, la rápida solidificación y las bajas temperaturas producen la inclusión de escoria dado que no le permiten aflorar a la superficie.

Tipos de Inclusión :

- escoria en el área de la raíz

-escoria en la zona de fusión

Imagen Radiográfica de una soldadura longitudinal en la cual aparecen fallas definidas y el penetrámetro es identificado.



Photograph above is a "positive" of a radiograph showing a longitudinal weld with definite faults. DIN penetrometer is readily identified.

- escoria dispersa

En general las inclusiones dan una sombra oscura de forma irregular.

Falta de fusión; causada cuando el metal base o el pase anterior de soldadura no se llevan a la temperatura de fusión antes de depositar el nuevo pase de soldadura con el objeto de obtener continuidad metalúrgica entre el metal base y la soldadura.

La imagen radiográfica aparece como manchas alargadas en dirección de la soldadura.

Penetración incompleta; ocurre cuando no hay fusión completa entre el metal base de la raíz y la soldadura depositada. La imagen radiográfica es una línea oscura en el sentido longitudinal de la soldadura y al centro de la misma.

Socavación ; en las paredes laterales de la junta o la producida al costado de la última cama de soldadura, entre ésta y el metal base; ambos causados por la fusión del metal base; puede corregirse depositando mayor cantidad de soldadura para cubrirla. La imagen correspondiente es una línea oscura entre la soldadura y el metal base.

Rajaduras; aparecen en las juntas soldadas debido a esfuerzos localizados, que en ciertos puntos exceden al esfuerzo máximo del material. La falta de fusión en la raíz de la junta puede causar rajaduras. Su imagen radiográfica aparece como líneas oscuras y su intensidad nos dá una idea de su profundidad.

• 3.3 OBSERVACION DE RADIOGRAFIAS

3.3.1 Generalidades

La observación de las radiografías se basa en la distinta transparencia que éstas ofrecen a la luz; gracias a ella son visibles las imágenes. Se comprende que las condiciones de iluminación que se precisan para la observación tengan una importancia relativamente grande cuando se interpreta una radiografía, pues no solo influyen en la visibilidad de los detalles, sino también en el acomodamiento de la vista del observador y en su fatiga. Es preciso, por tanto, buscar las mejores condiciones de iluminación, que es el dispositivo que proporciona la iluminación, debe satisfacer los dos requisitos principales siguientes :

a.) La intensidad de la luz que emite tiene que ser la apropiada para iluminar satisfactoriamente las áreas de interés en la radio

grafía sin que se produzca brillo.

b.) Debe difundir uniformemente la luz sobre el área que se observa.

Un iluminador, esencialmente, consiste en un caja en la cual se encuentra el elemento o elementos que emiten la luz y una de cuyas superficies es de vidrio o plástico traslúcido y en la que se coloca la radiografía. El color de la luz de los iluminadores prácticamente no influye en la observación, aunque se suele preferir las blanco azulada o la blanco verdosa, generalmente la intensidad de la luz no se puede variar y se utilizan para densidades entre 1.5 y 2.0, mientras que, en los de mayor poder de iluminación, la luz puede variar ampliamente en intensidad, permitiendo que se puedan observar desde densidades muy bajas hasta las que tengan valores próximos a 4.0, por lo que son imprescindibles en la observación de piezas con grandes diferencias de espesor.

3.3.2 Radiografías defectuosas, causas y manera de evitarlas

Teniendo en cuenta el gran número de factores que intervienen en la formación y en la calidad de una radiografía; para poder precisar la causa o causas de una radiografía defectuosa es conveniente establecer una clasificación de defectos y de las causas que directamente los motiva y, de esta forma indicar el procedimiento que evita el defecto considerado.

- Radiografías con densidades demasiado altas

Las causas de que una radiografía presente densidades demasiado altas pueden ser debidas a :

- a.- exposición excesiva
- b.- revelado excesivo
- c.- velo de fondo

El que una radiografía tenga un exceso de exposición, generalmente es motivado por el empleo de factores de exposición incorrectos. El inconveniente que representa un exceso de exposición, puede compensarse en parte observando la radiografía en un iluminador de alta intensidad de luz. Se deben corregir los datos de exposición si no fueran los correctos; en otro caso, hay que comprobar los instrumentos de medida de la unidad de rayos X.

Un revelado excesivo se debe a un tiempo de operación demasiado largo, a que el revelador está demasiado caliente, o a ambas causas, y también a que dicha solución es demasiada concen-

trada.

- Radiografías con densidades demasiado bajas

El que una radiografía presente densidades demasiado bajas se debe a :

a.- exposición por defecto

b.- revelado insuficiente

c.- presencia de un material extraño entre las pantallas y la película.

Una exposición por defecto es consecuencia de que los factores de exposición se han calculado incorrectamente. Auméntese la exposición en un 40% o más.

El revelado insuficiente se debe a un tiempo de operación demasiado corto, o a que el revelador está demasiado frío, a que está gastado o ambas cosas.

Cuando entre la pantalla intensificadora hay interpuestos materiales extraños como papel, tiene lugar una pérdida de densidad en las zonas de la radiografía correspondientes.

- Radiografías muy contrastadas

Si una radiografía posee un contraste excesivo, esto se debe a :

a.- contraste subjetivo alto

b.- contraste de película alto

La causa más general de un contraste subjetivo alto es que la pieza que se radiografía tenga un intervalo de espesores demasiado grande para la calidad de la radiación utilizada. El exceso de este contraste se corrige aumentando el kilovoltaje o filtrando la radiación; también utilizando máscaras para compensar las diferencias de espesor. El contraste de película elevado se evita utilizando otra película de contraste más bajo.

- Radiografías poco contrastadas

Las causas fundamentales de que una radiografía presente poco contraste son :

a.- contraste subjetivo bajo

b.- contraste de película bajo

c.- revelado por defecto

Se produce contraste subjetivo bajo, cuando se utiliza una radiación demasiado penetrante para el intervalo de espesores de la pieza que se radiografía. Se corrige disminuyendo el voltaje.

El contraste de película bajo se evita utilizando película de contraste más alto.

Las causas de un revelado por defecto, incluyen : tiempo de operación demasiado corto, revelador demasiado frío y revelador gastado.

- Definición pobre

Las causas más probables son :

- a.- factores de tipo geométrico
- b.- mal contacto entre película y pantalla intensificadora.
- c.- granulado de la película
- d.- granulado debido a pantallas intensificadoras

Una distancia objeto-película demasiado grande, dá lugar a mala definición de imagen, lo mismo que un foco de rayos X grande. Cuando no se puede acortar dicha distancia, el efecto perjudicial de ello puede compensarse en parte aumentando la distancia foco-película.

Para evitar el granulado debido a las pantallas intensificadoras fluorescentes, lo mejor es sustituirlas por pantallas de plomo o emplear películas de rayos X para exposición directa a éstos. Cuando el granulado lo motiva la película radiográfica, se debe sustituir ésta por otra de grano más fino.

- Manchas alistadas

El origen de estas manchas está relacionado con :

- a.- el proceso de revelado
- b.- el proceso del baño de detención
- c.- el proceso de fijado

Las relaciones con el proceso de revelado pueden ser debidas a que los bastidores soporte de las películas están contaminadas a una falta de agitación en el proceso , o a una inspección de las películas durante el mismo.

Las películas no deben observarse ante el iluminador hasta que el proceso de fijado es completo, para evitar que se produzcan manchas alistadas durante el secado de las radiografías es conveniente usar un agente humectante en el lavado final antes de secarlas.

- Manchas amarillentas

Su origen puede tener relación con :

- a.- el proceso de revelado
- b.- el proceso de fijado
- c.- omisión del tratamiento en los baños de detención.

Todos estos factores se previenen, controlando el estado de los reactivos en mención.

- Manchas y líneas oscuras

Pueden ser debidas a salpicaduras de agua o de revelador sobre las películas antes de su revelado. Las pantallas de plomo rayadas dan lugar a la aparición de líneas oscuras en la radiografía revelada.

- Manchas blancas

Se producen por utilizar un fijador no adecuado, o preparado incorrectamente. Además de los defectos citados anteriormente pueden aparecer otros, como manchas debidas a flexiones bruscas de la película cuando éstas se colocan en los chasis. Las salpicaduras de cualquier reactivo antes del revelado, dan lugar a manchas claras, si se trata de fijador o baño de detención. Es esencial que las pantallas intensificadoras estén en perfectas condiciones, pues para cualquier defecto de éstas se hace patente en la radiografía y pueden dar lugar a errores de interpretación.

3.4 CONSIDERACIONES BASICAS PARA LA INSTALACION DE UN LABORATORIO DE INSPECCION Y CONTROL DE CALIDAD POR RAYOS X

3.4.1 Consideraciones Generales

Los criterios que se siguen para la instalación de un laboratorio de rayos X, difieren, de acuerdo a los fines que dicho laboratorio persigue. Por lo que, para centrar nuestro estudio, vamos a referirnos, a la posibilidad de montar un laboratorio con fines didácticos, y el cual a su vez esté capacitado para que eventualmente preste servicios a la industria.

El control o ensayo, por lo tanto, podrá llevarse a cabo, tanto en el laboratorio, como fuera de éste; cuando la situación así lo requiere.

En el presente estudio, se van a considerar dos aspectos principales; selección del equipo y protección contra los rayos X.

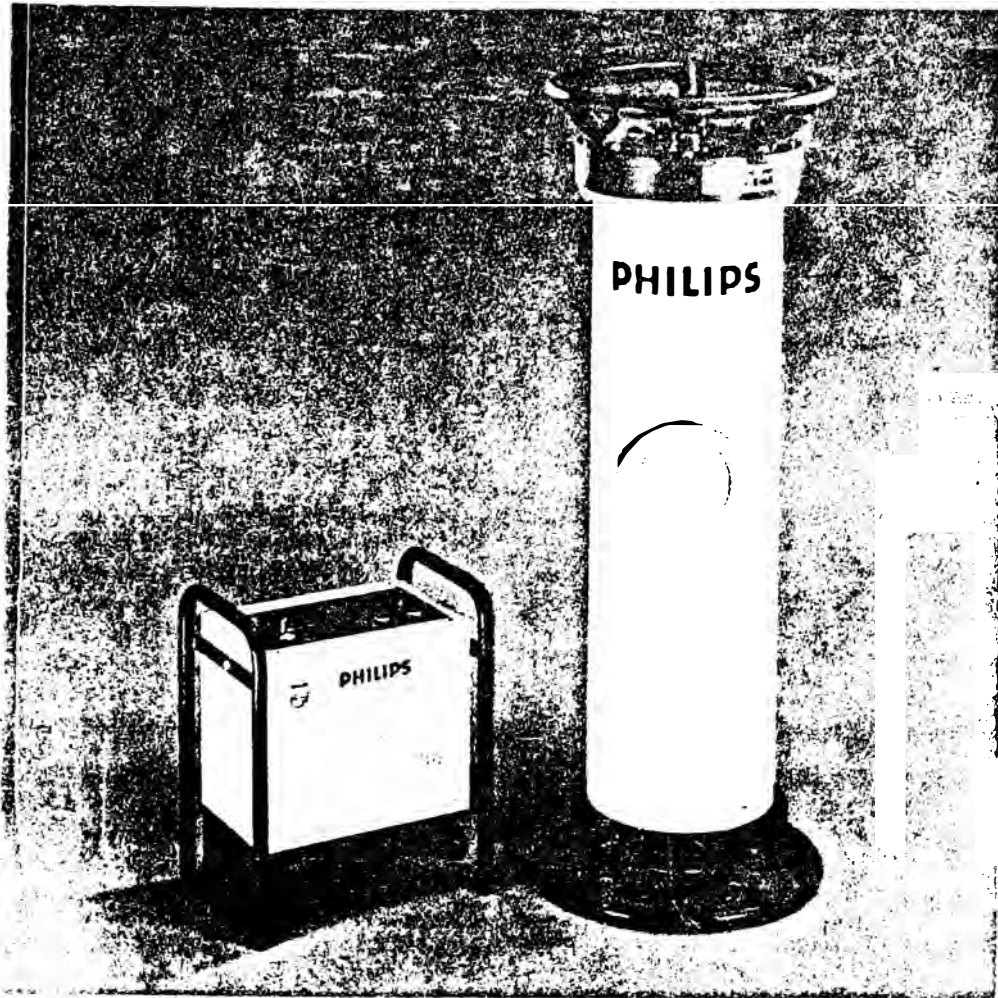
3.4.2 Consideraciones Técnicas

3.4.2.1 Selección del equipo

Como ya se han definido los posibles usos y condiciones de trabajo, tenemos que nuestro equipo debe reunir las siguientes condiciones :

industrial x-ray equipment

G 261/G 301/G 301 K Portable Industrial X-Ray Systems



- Compact and lightweight
- Extremely safe and simple operation
- High penetration power
- Robust and reliable
- Universal application range
- Highly adaptable

Introduction

The G 261/G 301/G 301 K portable X-ray systems are specifically designed for extensive use in the medium and heavy engineering industries, also on building and construction sites.

Due to their compact and lightweight

construction, extreme reliability, safety, and adaptability, these robust X-ray systems are perfectly suited for all field applications relating to these industries. They can also be readily adapted and used on a semi-permanent or permanent basis if required.

The high penetration power derived from these X-ray systems, provides the user with the optimum solution to practically all inspection problems. These relate to the inspection of heavy welded seams in gas/liquid containers, boilers, steel constructions, and pipe lines.



PHILIPS

System Components

The G 261/G 301/G 301 K X-ray systems comprise a portable gas-filled tube head (housing the H.T. and separate filament transformers, the X-ray tube, and associated components) a control unit, interconnecting cables, water cooling facilities, and accessories.

Each X-ray system is identical in component construction except for the type of X-ray tube employed. The G 261/G 301 tubeheads have a directional beam type X-ray tube fitted, whereas the G 301 K has fitted, a conical anode type tube which generates a 360°

panoramic beam. The latter X-ray tube with its "true beam" characteristic, is ideally suited for the inspection of circumferential welded seams.

When water cooling facilities are used, the duty cycle for all three systems is 100 %. However, without the use of water cooling, the only factors which limit the operating time of these X-ray systems, are the prevailing ambient conditions.

System Controls

To suit specific application requirements, three versions of control are

available. They are the 19" rack unit for permanent installations, the standard and electronic control boxes for portable applications. Each of these controls can be connected to any one of the X-ray systems as required.

All of the controls provide the user with simple single knob or push-button operation, kV pre-selection and pre-indication (depending on control unit selected) variable range exposure timer, stabilised tube current, automatic overload protection, and key operated (220 V) mains switch.

Technical Data

Radiation Safety

Complies with international recommendations and German standard DIN 54 113.

Mains Supply

220 V 50/60 Hz

Tube Voltage Ranges

50-260 kV } progressively adjustable
50-300 kV }

Tube Overvoltage Range

Automatic control above maximum selected kV level

Maximum Tube Current

5 mA

Tube Overcurrent Protection

Automatic facility incorporated

Emergent Beam Angles

50° (G 261/G 301) 360° x 30° (G 301 K)

Focus

2,3 x 2,3 mm (G 261/G 301)

5,0 x 0,5 mm (G 301 K)

Timer Ranges

15 secs-10 mins. } depending on
0,1 mm-10 mins. } control selected
Infinity for continuous operation

Ambient Conditions-Operating

Temperature Range

-10 °C to +40 °C

Storage Temperature

-40 °C to +70 °C

Relative Humidity

90 %

Penetration Range*

G 261 Tubehead

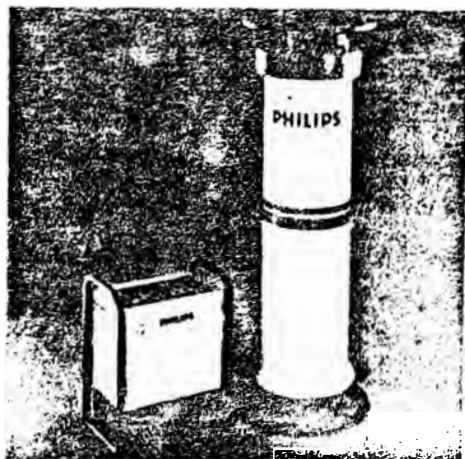
48 mm

G 301 Tubehead

55 mm

G 301 K Tubehead

50 mm



Optional Accessories

- Centering device and diaphragms
- Protective frames for directional beam tubeheads
- 4-legged tubestand
- Hydraulic tubestand
- End support adaptor

Systems Component Information

Comprehensive details of individual components can be found in the relevant Product Information Sheets.

Penetration Test Data: - Fine grain film (D 7) and lead intensifying screens, 700 mm FFD, 8 Film density, 10 minutes exposure, 5 minutes development at 20 °C.

COMPONENTS USED WITH G 261/G 301/G 301 K PORTABLE X-RAY SYSTEMS

COMPONENT DESCRIPTION	TYPE NUMBER	WEIGHT	DIMENSIONS
Standard Control Box (with Frame)	9421 070 17002	20 kg	425 x 415 x 245 mm
Electronic Control Box (with Frame)	9421 070 17502	17 kg	410 x 320 x 232 mm
19" Rack Control Unit	9421 070 17302	18 kg	483 x 265 x 177 mm
Interconnecting Cable	9421 067 29202	7 kg	20 m length
Mains Supply Cable	9421 067 30102	3 kg	10 m length
Warning Lamp C/W Cable	9421 067 19022	1,5 kg	20 m length
G 261 Directional Beam Tubehead	9421 070 04262	65 kg	1071 x 358 mm
G 301 Directional Beam Tubehead	9421 070 04302	65 kg	1071 x 358 mm
G 301 K Panoramic Beam Tubehead	9421 070 04502	65 kg	1071 x 358 mm

- Debe ser adecuado para la inspección de toda clase de materiales , entre los cuales, gruesas secciones de metal. Es decir, el tubo debe tener gran poder de penetración, de tal suerte que se puedan cubrir las necesidades más corrientes de la industria.
- Deberá ser portátil, a fin de que se le pueda trasladar al lugar donde se le va a usar.
- Debe ser versátil en su uso, lo que permita una fácil manipulación.

Según las condiciones dadas, vamos a elegir un equipo de medio voltaje. De acuerdo con los datos que se encuentran en el apéndice (2), seleccionamos un equipo portátil Philips G-301, cuyas características figuran en el catálogo respectivo.

3.4.2.2 Ubicación y distribución del Laboratorio

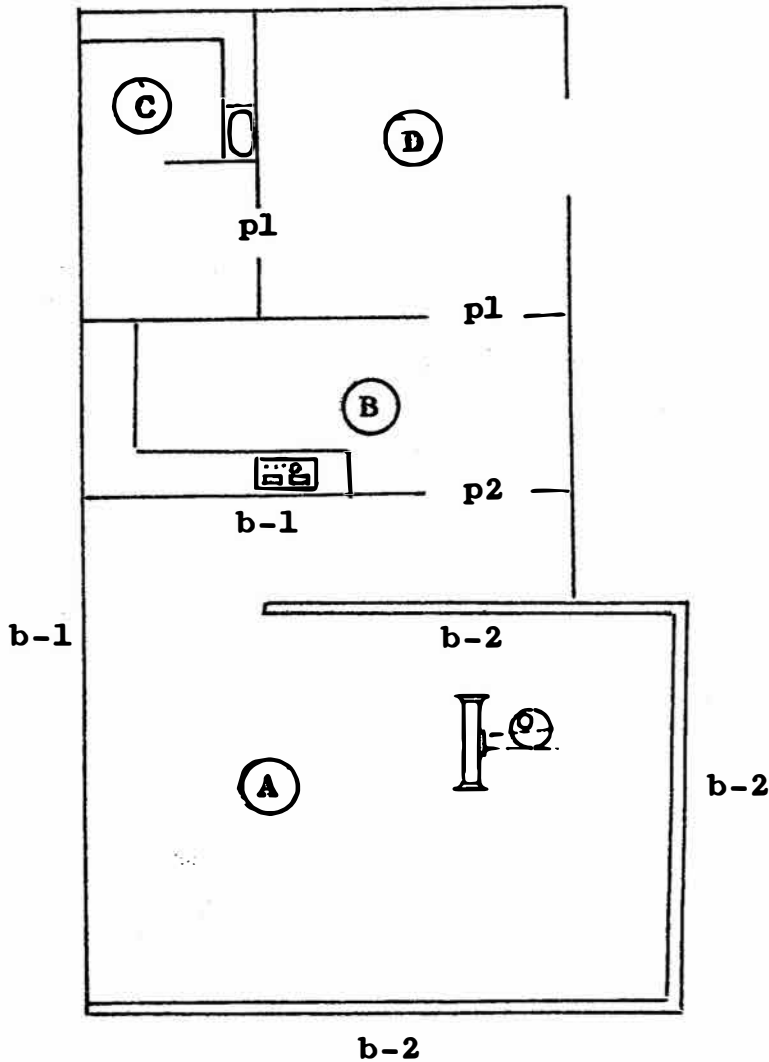
El laboratorio, de ser posible deberá ubicarse en una zona extenta de circulación de personas, en las zonas adyacentes a él. De no poder contarse con estas condiciones, se deberán observar medidas de protección mucho más estrictas, de acuerdo al local con que se cuente.

Independientemente de la ubicación, la distribución, por lo general, obedece a dos factores principales : seguridad y serviciabilidad. Para tal efecto se deberá observar las siguientes disposiciones :

- a.-) La distribución debe ser la del tipo, conocida como "laberinto", mediante el cual, se disminuye el riesgo de exponer al operador y eventualmente a los observadores a las radiaciones. Existen varias formas de laberinto, nosotros vamos a utilizar la más simple, aquella que sigue la forma de una "L".
- b.-) El laboratorio deberá contar con un cuarto oscuro, donde, se prepara y carga el chasis radiográfico, y posteriormente se efectúa el proceso de revelado.
- c.-) Se debe contar , a su vez, con un recinto contiguo al área de ensayo, donde se ubica la unidad de control y el operador.

Siguiendo los requerimientos expuestos, se presenta a continuación, un esquema de la probable distribución de un laboratorio, que responda a nuestras necesidades básicas.

PLANO DE UN LABORATORIO DE
RAYOS X



- Ⓐ : Area de ensayo
- B : Sala de Control
- C : Cuarto oscuro
- D : Oficina

- b-2 : Barrera primaria
- b-1 : Barrera secundaria

p1 : puerta con sistema de luces
p2 : puerta con sistema de seguridad en
la cerradura.

3.4.2.3 Protección

La protección contra los rayos X se realiza mediante blindajes y barreras. Aparte de tales barreras se debe contar con otra clase de sistemas auxiliares de seguridad; como por ejemplo: en las puertas de acceso a las áreas restringidas.

De acuerdo a la distribución del laboratorio se deben colocar las correspondientes barreras a fin de impedir la filtración de haces de radiación fuera del área de ensayo.

Las barreras en cuestión pueden ser :

a.- Primarias; son aquellas que reciben radiación primaria, se debe tener especial cuidado en el cálculo del blindaje de las barreras primarias. Para tal efecto se dispone de tablas, proporcionadas por instituciones que rigen este tipo de actividad.

b.- Secundarias; como su nombre lo indica, nos protegen de la posible acción de la radiación secundaria o difusa.

Como ya se mencionó, se deberá contar con dispositivos de seguridad en las puertas de acceso. El sistema podría estar compuesto de :

- Sistema "Lock" de seguridad en la chapa de la puerta al área de ensayo. Mediante este sistema, cuando el equipo se encuentra en operación, no es posible abrir la puerta, y viceversa, cuando la puerta se encuentra abierta, no es posible poner en operación el equipo.

- Sistema de luces de control, en las puertas de acceso, por medio de las cuales se indica si el equipo está en operación; o en general si se permite o no el ingreso a una sala en un determinado instante.

Cálculo del Blindaje

El blindaje de nuestro laboratorio estará constituido por barreras primarias y secundarias, según se señala en el plano correspondiente.

El cálculo del blindaje se va a realizar suponiendo las siguientes condiciones : el local es una estructura firme, construida con ladrillos corrientes; el espesor de las paredes es de 200 mm. Las condiciones extremas de operación, serían :

de horas de exposición por día : 12

Kilovoltaje máximo : 250 KV

Corriente máxima del tubo : 5 mA

Distancia mínima del foco al operador : 3 metros

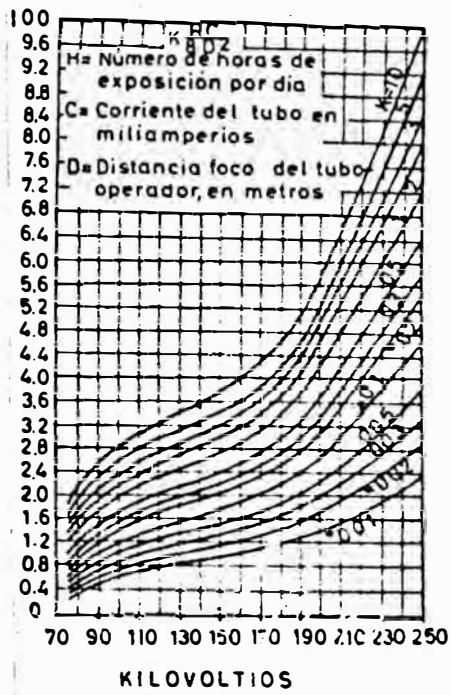


fig. (25)

■.—Espesor de plomo en barreras pri-
 rias que se requiere para reducir la
 osición a la dosis permitida de 12,5
 /hora. (American Standards Assoc. and
 Lead Industries Assoc.).

kV	Plomo	Hormigón $\rho = 2.4$	Ladrillos de hormigón $\rho = 2.05$	Hormigón de barro $\rho = 3.2$	Ladrillos
75	1.0	80	85	15	175
150	2.5	210	220	28	290
200	4.0	220	245	60	430
300	9.0	240	275	105	425
400	15.0	260	290	140	450

fig. (26)

a.-) Cálculo del blindaje para las barferas primarias

Con las condiciones fijadas previamente y con la ayuda del gráfico (25) se tiene que :

$$K = \frac{H \cdot C}{8 D^2}$$

donde : H : # de horas de exposición por día

C : corriente del tubo en mA

D : distancia foco del tubo al operador en metros
de donde .

$$K = \frac{12 \times 5}{8 \times 3^2} \approx 1$$

Para K : 1 y KV : 250, en el gráfico se tiene que el blindaje de plomo requerido, deberá tener un espesor de 7.2 mm.

En las condiciones reales, una fracción del espesor del plomo requerido, es sustituido por la acción protectora de las paredes de ladrillo. La atenuación producida por la pared de ladrillos en términos de mm. de plomo. es :

Del cuadro (26) : a 300 KV, la relación entre una barrera de plomo y otra de ladrillos es : 9/425, por lo que el equivalente en plomo de una pared de ladrillos de 200 mm es :

$$\frac{9}{425} \times 200 : 4.3 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el espesor real del plomo requerido, será

$$\text{Espesor real de plomo : } 7.2 - 4.3 : 3 \text{ mm : } 1/8''$$

Resumiendo, tenemos, que las barreras primarias estarán formadas por paredes de ladrillo de 200 mm de espesor enchapadas con láminas de plomo electrolítico de 1/8 " de espesor.

b.-) Barreras secundarias

Una pared de ladrillo de 200 mm de espesor es suficiente , a fin de utilizarse como barrera secundaria. En casos particulares, si se desea proteger alguna zona en particular, es suficiente con enchapar la pared con lámina de plomo de 1/16 " de espesor.

En otros casos se pueden construir biombos protectores;

de láminas de plomo de 1/16"

Otras variaciones referentes al material a ser usado en las barreras, se exponen con más amplitud en el capítulo VII.

Otras disposiciones

A fin de disminuir el riesgo que significa emitir el haz de radiación contra las paredes, el haz de rayos X, durante el ensayo, deberá ser dirigido hacia el suelo (se supone que el laboratorio se encuentra a nivel del terreno). Para cumplir con esta condición, es necesario o preferible que el equipo cuente con los accesorios que le facilite tal labor, como lo sería una pata hidráulica.

3.4.2 Consideraciones Económicas

En este acápite nos vamos a referir únicamente al costo del equipo de rayos X y al del blindaje de plomo.

a.- El equipo seleccionado para nuestro laboratorio es un equipo portátil Philips G-301 , cuyas características figuran en el catálogo respectivo, su cotización durante el mes de Mayo de 1978 era de aproximadamente 30,000 Marcos Alemanes. Este precio, no incluye los accesorios, que son opcionales.

b.- Los datos referentes al material de plomo requerido para el blindaje, nos ha sido proporcionado por Industrial Surquillo S.A. esta firma provee láminas de plomo electrolítico, con las características siguientes :

<u>Espesor</u>	<u>Ancho</u>	<u>Largo</u>	<u>Peso aprox.</u>
1/16"	0.5 m	2.2 m	22 kg.
		2.5	
		3.0	
1/8"		2.5	42
		3.0	
3/16"		2.5	
		3.0	

El costo de las láminas varía de acuerdo al peso de las mismas. El precio unitario se refiere a un kilo de plomo; su valor es de \$ 160.00 más impuestos.

Capítulo IV

" XERORRADIOGRAFIA "

4.1 FUNDAMENTOS DE LA XERORRADIOGRAFIA

La xerorradiografía es un método de registro de imágenes de rayos X, que en vez de emulsiones fotográficas, utiliza sustancias fotoconductoras, es decir, sustancias que en ausencia de radiaciones electromagnéticas, como la luz visible o los rayos X, se comportan como buenos aislantes eléctricos, perdiendo esta propiedad por la acción de dichas radiaciones. Si una de estas sustancias tal como una variedad de Selenio amorfo, se deposita sobre una placa de material conductor, como aluminio, entonces la capa de selenio forma un dieléctrico de un condensador, que, convenientemente cargado, es capaz de registrar imágenes electrostáticas formadas por los rayos X.

La xerorradiografía es un proceso físico más bien que químico, pues, como se indica más adelante, no se requieren soluciones, de reactivos químicos para revelar la imagen, ni ningún tratamiento de este tipo; de ahí su denominación, compuesta de la palabra griega XERO, que quiere decir seco, y radiografía. Esta técnica de registro de imágenes de rayos X ha sido desarrollada en el Batelle Memorial Institute, por Mc. Master y R. M. Schaeffert

4.2 LAS PLACAS XERORRADIOGRAFICAS

El condensador formado por la capa de selenio y su soporte conductor constituye la llamada placa xerorradiográfica que en la técnica experimental, se dispone de la misma forma que una película radiográfica. Las distintas intensidades de radiación que llegan a la capa de selenio, convierten las áreas que bañan en más o menos conductoras, de acuerdo con el valor de dichas intensidades, por lo que se descargan localmente, también más o menos; a la placa conductora; el resultado de todo ello es una distribución de cargas en la capa de selenio o, lo que es lo mismo, la formación de una imagen electrostática latente.

Las características eléctricas de una placa xerorradiográfica son similares a las de los circuitos eléctricos conteniendo resistencias y condensadores. En el circuito como el de la figura (26), en el que una fuente de potencial E_x , se conecta en pa

ralelo, a través de un interruptor, a un condensador C y a una resistencia variable R. En este circuito, el condensador C puede cargarse al potencial E_x del generador cerrando el interruptor durante un tiempo breve, en el cual la resistencia variable puede llevarse a un valor muy alto, de forma que, si se abriera el interruptor, la corriente que la atravesase sería de magnitud muy pequeña. Esta situación corresponde a la de una placa xerorradiográfica cargada, antes de la exposición. Si ahora la resistencia se ajusta a un valor mucho más bajo y se abre el interruptor, el condensador C tiende a descargarse a través de la resistencia, de acuerdo con la ecuación :

$$E_c = E_x \cdot e^{-t/T_c} \quad (23)$$

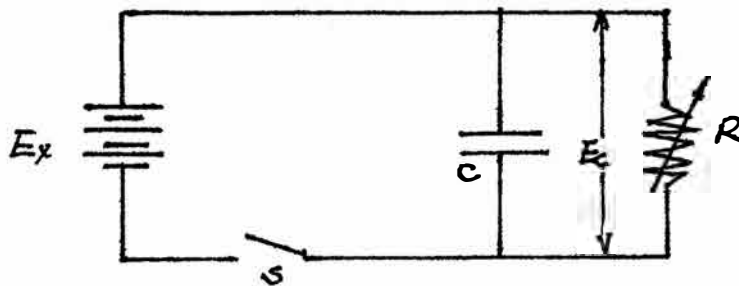


fig. (26)

donde E_c es el potencial del condensador en voltios, E_x el potencial inicial del condensador en voltios, T_c la constante de tiempo en segundos y t el tiempo de descarga en segundos. La constante de tiempo requerido T_c es una medida del tiempo para que el potencial del condensador C disminuya a $1/e$ (36,2 % de su valor inicial). Expresada en función de C y R, esta constante es igual a

$$T_c = R \cdot C \quad (24)$$

por lo que cuanto más pequeña sea el valor de la resistencia R durante el periodo de descarga, más rápidamente se descarga el condensador. Los valores reducidos de resistencia corresponden a la condición de las placas xerorradiográficas durante su exposición a radiaciones.

En ausencia de radiaciones, las placas xerorradiográficas se comportan esencialmente como el condensador del circuito de la figura (26) con resistencia R muy grande; el selenio, que tiene una resistividad específica del orden de 10^{15} Ohm-cm., es un buen dieléctrico, comparable a los mejores materiales aislantes, su constante de tiempo se aproxima a las 25 - 100 horas, dependiendo de su composición, condiciones ambientales, protección a los rayos cósmicos, etc, pero se ha comprobado en ensayos con equipos de radiografía instantánea que dicha constante de tiempo puede reducirse a un orden de magnitud de 0.1 microsegundos cuando se irradia con unso 100 roentgens durante un intervalo corto de tiempo.

Normalmente, las placas xerorradiográficas pueden volver a usarse muchas veces, ya que, aparentemente, los rayos X no originan alteración alguna en la capa de selenio. Lo importante es que, en el manejo y limoieza de las placas éstas no se dañen mecánicamente.

4.3 TECNICA OPERATORIA

El proceso xerorradiográfico en su totalidad comprende seis etapas básicas :

- 1.- Sensibilización eléctrica de la palca xerorradiográfica
- 2.- Exposición a los rayos X de la placa sensibilizada
- 3.- Revelado de la placa expuesta, para hacer visbles la imagen electrostática formada.
- 4.- Interpretación de la imagen
- 5.- Traslado de la imagen de la placa a un papel para su registro permanente
- 6.- Limpieza y preparación de la placa xerorradiográfica, para ser usada otra vez,

Sensibilización de las placas xerorradiográficas

A diferencia de las películas radiográficas, las placas xerorradiográficas sin cargar no son susceptibles de velo de fondo cuando llega a ellas radiación, salvo una ligera fatiga que se corrige mediante un ciclo de relajación. Por lo tanto, hay que sensibilizarlas para que puedan ser afectadas por las radiaciones y den lugar a imágenes electrostáticas latentes; esto se corrige y consigue depositando sobre la capa de selenio una carga eléctrica distribuida uniformemente en toda la superficie. Durante esta --

operación de carga, la base conductora se conecta a tierra, por lo que tiende a tomar una carga de polaridad opuesta a la de la capa de selenio. Para cargar eléctricamente las placas xerorradiográficas se utilizan unidades de carga como la que se muestra en la figura (27).

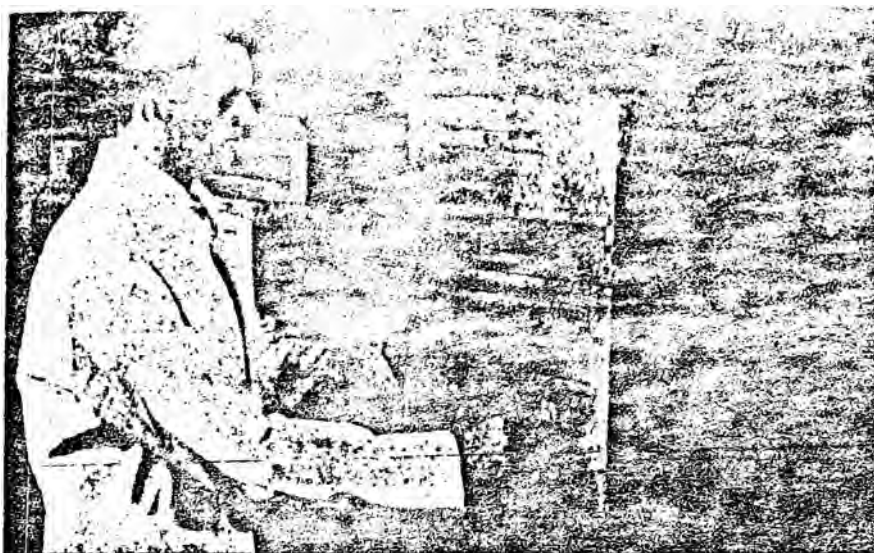


Fig. 27. Equipo de carga eléctrica para sensibilizar las placas xerorradiográficas. (General Electric X-Ray Department).

Las placas hay que resguardarlas de la acción de la luz para que no se descarguen, pero aun así cabe esperar que tiendan a perder su carga, lo mismo que se ocurre a un condensador. En efecto, los iones atmosféricos y los electrones, producidos por -- causas naturales como los rayos cósmicos, pueden contribuir a ello ; por otra parte, como la resistividad de la capa de selenio no es infinita, la carga superficial puede tender a fugarse a través de la película dieléctrica hacia la base conductora de la placa.

Exposición a los rayos X

La técnica que se sigue en la exposición de una placa -- xerorradiográfica a los rayos X en el ensayo de un objeto, es esencialmente igual a cuando se opera con película radiográfica, ya que los principios generales de formación son los mismos. Por lo tanto, lo indicado en capítulos anteriores sobre las disposiciones que se siguen al hacer una radiografía son aplicables aquí, incluyendo también los medios para evitar o atenuar la radiación difusa; sin embargo, la utilización de pantallas fluorescentes o de -

plomo, no es posible en xerorradiografía, ya que el contacto que se requiere entre pantalla y capa sensible descargaría la carga de la superficie de selenio, la única posibilidad que existe de utilizar pantallas, es colocar entre la base conductora y la capa de selenio, una lámina muy delgada de un material pesado (pantalla) y entonces realizar la xerorradiografía con la placa en posición invertida.

Las exposiciones requeridas en xerorradiografía son de un orden similar a las utilizadas con película radiográfica. Para escoger el kilovoltaje de operación, debe tenerse en cuenta los mismos factores que en radiografía con película radiográfica; en primera aproximación se utilizan los mismos kilovoltajes -- que con películas de la clase I o de la clase II, pero para una determinación más exacta pueden hacerse ensayos utilizando escaleras metálicas, penetrámetros, etc.

Revelado de la imagen xerorradiográfica

La imagen electrostática latente que se obtiene después de exponer la placa xerorradiográfica a los rayos X a través del objeto que se ensaya, se puede hacer visible sometiéndola a un proceso físico que sea capaz de depositar un pigmento o polvo en una cantidad proporcional a la densidad de carga, al potencial superficial o a la intensidad de campo. Para ello se coloca la placa en una cámara estanca a la luz, con la superficie sensibilizada hacia abajo y se inyecta en la misma, una nube de polvo o pigmento finamente dividido por medio de una pistola de proyección; este -- polvo, al pasar por la boquilla de salida, se carga triboeléctricamente con una polaridad opuesta a la de la placa xerorradiográfica. De esta forma, la superficie de selenio, con distintas cargas residuales, retiene el polvo en forma proporcional, al valor de ellas, es decir, en un área muy cargada, la concentración de polvo es grande, al contrario de lo que ocurre en un área poco cargada.

Para el revelado se usan polvos blancos, azules o fluorescentes; los primeros se aplican cuando la imagen no va a trasladarse de la placa y contrastan mucho, ya que la superficie de selenio es negra, por lo que puede fotografiarse con facilidad la imagen si se desea un registro permanente de ella. Los polvos de color azul son apropiados cuando se traslada la imagen a un papel para su registro permanente; la imagen trasladada es la inversa -

de la forma en la placa, puesto que, en ésta, las zonas con más concentración de polvos son más claras mientras que sobre el papel estas zonas de más polvo son más oscuras (el papel es blanco) Si la imagen se revela con polvos fluorescentes, es posible realizar un realce del contraste cuando la observación se hace con luz negra; si se observa con luz natural, los resultados son análogos a cuando se emplean polvos blancos, pero, en cambio, la imagen no es visible con esta luz cuando se le traslada a un papel blanco; en este caso hay que utilizar luz ultravioleta.

Traslado y fijación de imágenes

La imagen de polvos depositada sobre la superficie de selenio, se puede trasladar para su registro permanente a un papel blanco provisto de un adhesivo especial. Para este traslado existen en el comercio aparatos apropiados que, por medio de rodillos desplazan simultáneamente y en posiciones enfrentadas, la imagen de polvos y el papel adhesivo, en íntimo contacto y bajo presión uniforme, de esta manera casi todo el polvo se adhiere al papel, quedando reproducida sobre éste la imagen xerorradiográfica.

La visibilidad de detalle de la imagen trasladada al papel con respecto a la original, depende de la naturaleza de la misma imagen, de la cantidad de polvo aplicada en el revelado y de las propias condiciones de trabajo.

Limpieza de las placas usadas

Antes de usar una placa xerorradiográfica, después que se ha trasladado la imagen a un papel o se ha destruido, es preciso limpiarla bien hasta eliminar los últimos vestigios de polvo. Esto puede realizarse con un cepillo suave de piel, que, bien a mano o ligeramente, ejerza un ligero contacto sobre la superficie de selenio y barra todo el polvo. A veces, es preciso completar la limpieza por medio de un detergente, pero en todos los casos hay que procurar que la superficie de selenio no sufra ningún deterioro físico, pues ello afectaría la calidad de la futura imagen.

Capítulo V

" FLUOROSCOPIA "

5.1 Generalidades

La imagen de un objeto, producida por los rayos X, producida por los rayos X, en vez de registrarse en una película radiográfica, puede hacerse visible en pantallas fluorescentes debido a la propiedad que tienen ciertas sustancias químicas de emitir luz por la acción de los fotones de rayos X. Esta técnica de producción de imágenes de rayos X se denomina fluoroscopia y mientras en radiografía los rayos X actúan durante un cierto periodo de tiempo para producir una imagen latente en la película radiográfica, en fluoroscopia la imagen ya se pone de manifiesto directamente en la pantalla y permanece en ella mientras actúa la radiación.

La principal ventaja de la fluoroscopia es, que es un medio de control rápido y económico, la rapidez es evidente, pues casi siempre en menos tiempo que dura una exposición radiográfica, se ha realizado el examen detenido de la pieza, observando ésta incluso en varias posiciones, se ahorra también el tiempo que supone preparar el chasis radiográfico y los procesos de cámara oscura.

La desventaja más señalada de la fluoroscopia son las siguientes :

- a.- La poca sensibilidad que se obtiene en relación a la radiografía, debido a la relativamente pequeña luminosidad de las pantallas, al tamaño de grano apreciable de la sal fluorescente y a la distancia corta, necesaria, entre el tubo de rayos X y la pantalla.
- b.- El no tener la radiación un efecto acumulativo sobre las pantallas, como ocurre sobre las películas radiográficas; por ello, el examen se restringe normalmente a secciones delgadas de una pieza o a materiales de número atómico bajo.
- c.- Casi siempre resulta una desventaja el no tener un registro permanente de la imagen producida por los rayos X.

A pesar de las limitaciones e inconvenientes explicados, el campo de la fluoroscopia es muy extenso y variado: inspección de alimentos envasados, de piezas de materiales plásticos, válvulas electrónicas, tuberías, cables eléctricos, ladrillos refracta

rios, etc. La fluoroscopia es de gran utilidad para ensayos de control en serie de piezas del mismo tipo, cuando las tolerancias para los defectos no son muy críticas.

Las partes fundamentales de un equipo de fluoroscopia son el generador de rayos X y la pantalla fluorescente. La imagen puede verse directamente sobre la pantalla o después de reflejada en un espejo; en ambos casos se utilizan barreras de protección contra los rayos X (vidrio de plomo o líquidos absorbentes), pero cuando la visión es directa la protección debe ser mayor. El objeto que se ensaya se coloca lo más próximo posible a la pantalla o en un lugar intermedio entre el foco y éstas según interese imagen normal o amplificada.

La percepción de un detalle de una imagen fluoroscópica depende fundamentalmente de tres factores : brillo de la pantalla , contraste y pérdida de definición.

5.2 Brillo Y Contraste

Una pantalla fluorescente adquiere luminosidad por la acción de los fotones de rayos X sobre la sustancia química que la constituye. La naturaleza cuántica de los rayos X se muestra en este efecto de manera notable.

Los rayos X son transmitidos en cuantos discretos distribuidos al azar y el número de los que inciden en una pequeña área de una pantalla fluoroscópica durante el tiempo de integración del ojo (0.2 seg) determina el brillo de dicha área. Debido a la distribución al azar de los cuantos, dicho número y por lo tanto el brillo varía con arreglo a la ley de probabilidad. Los distintos pasos que tienen lugar en el proceso fluoroscópico son :

- 1.- Producción de fotones de rayos X
- 2.- Absorción de los fotones de rayos X por el objeto que se ensaya.
- 3.- Absorción de los fotones de rayos X por la pantalla.
- 4.- Conversión de los fotones de rayos X en fotones de luz.
- 5.- Fracción de los fotones de luz que alcanzan la retina del ojo.
- 6.- Absorción de los fotones de luz por la retina.

Las fluctuaciones de los cuantos constituyen el límite fundamental para el detalle que puede verse en una imagen fluoroscópica.

El nivel de brillo normal en fluoroscopia es del orden de unas mil veces menor que el que existe cuando se observa una radiografía.

En fluoroscopia, el contraste se define como el cambio relativo $\Delta I/I$, cuando se debe, por ejemplo, a una cavidad de espesor Δx de un material cuyo coeficiente de absorción lineal es μ , se verifica :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\mu \cdot \Delta x}{I + I_s/I_p} \quad (25)$$

donde I_s/I_p es la relación del brillo debido a la radiación secundaria y a la radiación primaria. Esta relación, puede tener valores de 14 o mayores y depende del diámetro del haz de rayos X y del espesor absorbente, aumentando generalmente con el voltaje, dentro del intervalo usual de éste.

5.3 PANTALLAS FLUOROSCOPICAS

Las pantallas fluoroscópicas están constituidas por una base de cartón recubierta de una sustancia química fluorescente - en un aglomerante adecuado. Normalmente, los rayos X llegan a la pantalla por el lado no recubierto, es decir, atraviesan la cartulina antes de alcanzar el recubrimiento fluorescente; ello representa una pérdida de brillo del orden del 50% de la que se conseguiría si los rayos X incidiesen directamente en dicho recubrimiento. El rendimiento de una pantalla depende de varios factores ; tales como su espesor, composición química y tamaño de grano de la sustancia fluorescente y respuesta a la radiación. El brillo de la pantalla es una de las características más importantes a considerar y se suele medir en mililamberts o en bujías-pie (un mililamber es igual a 1.075 bujías-pie); también es importante considerar el color de la pantalla. En la tabla (28) se indican algunas pantallas comerciales y sus características en cuanto a brillo y color. El brillo se ha determinado operando a 140 KV y 10 mA, siendo la intensidad de los rayos X de 668 roentgens/minuto.

La respuesta de brillo para una determinada pantalla depende de la calidad de los rayos X y de su luminosidad.

TIPO DE PANTALLA	COLOR	BRILLO (bujías-pie)
Ultraphan	Verde	1.11
Patterson B2-5	Verde	1.04
Radelin PFG	Verde	1.02
Patterson B2-3	Verde	0.96
Radelin FG	Verde	0.94
Patterson B2	Verde	0.91
Radelin F	Amarillo	0.79
Patterson tipo D-2Y4681	Azul	0.65
Patterson tipo D-2Y4680	Azul	0.63
Radelin PF	Azul	0.51
Ultraphor	Verde	0.43
Radelin TD	Azul	0.25
Radelin TF	Azul	0.18
Radelin T	Azul	0.11
Volframato de Cadmio	Azul	0.11
Patterson 245 industrial	"	0.10
Silicato de cinc	Verde	0.02

5.4 SISTEMAS FLUOROSCOPICOS

Los métodos o disposiciones básicos utilizados en la fluoroscopia de observación pueden clasificarse en fluoroscopia normal, de elevado brillo y de alta definición.

La fluoroscopia normal se utiliza generalmente para el examen de piezas con grandes diferencias de espesores o densidades y para la detección de defectos o discontinuidades groseros. Este sistema tiene la ventaja de su simplicidad y bajo costo, pero no tiene otras cualidades como son : brillo escaso (agudeza visual baja), tamaño de foco grande (poca nitidez de detalle), coloración del vidrio protector del plomo (pérdida de transmisión de luz), etc. Los tubos de rayos X que se utiliza suelen operar entre 100 y 150 KV y el tamaño de foco oscila entre 2 y 5 mm. Se emplean pantallas fluoroscópicas tipo Patterson B2 o Radelin PFG, protegidas con vidrio de plomo, y la distancia entre

éstas y el anticátodo del tubo está comprendida entre 40 y 60 cm.

El objeto que se ensaya se coloca lo más próximo posible a la pantalla fluoroscópica. La sensibilidad de penetrámetro es del orden del 7 - 13%. Los límites máximos de espesores que pueden observarse son aproximadamente, de 30 mm para aluminio, de 50 mm para magnesio y de 2.5 mm para acero.

La fluoroscopia de elevado brillo se emplea en el examen de piezas donde existen diferencias de espesor o de densidad moderadamente grandes; pudiéndose examinar detalles más finos o partes más gruesas que en fluoroscopia normal. Presenta las ventajas siguientes : elevado brillo de imagen, con lo que se consigue una mejor agudeza visual, mayor probabilidad de descubrir defectos que requieren una orientación preferente del haz; menor tiempo de adaptación de la vista a la oscuridad y ligero aumento de tamaño de la imagen. En este sistema se utilizan tensiones entre 100 y 150 KV y el tamaño del foco del tubo de rayos X oscila entre 2 y 5 mm. La distancia entre el foco y la pantalla (tipo Patterson B2 o Radelin FG) es de 13 a 30 cm y el objeto se coloca lo más cerca posible de la pantalla. Como barreras de protección se emplean células de soluciones absorbentes o un espesor grande de vidrio de óxido de plomo. La sensibilidad de penetrámetro está comprendida entre el 6 y 11%. Los límites de espesores que pueden observarse satisfactoriamente son : 50 mm de Al, 75 mm de Mg y 3mm de acero.

La fluoroscopia de alta definición se emplea para detectar pequeñas diferencias de espesores o de densidades y defectos o discontinuidades finos. Tiene la ventaja de proporcionar una sensibilidad próxima a la de la radiografía, de disminuir la fatiga del observador y de la posibilidad de colocar el objeto en diferentes posiciones de observación. En este sistema, los tubos de rayos X operan entre 30 y 150 KV y tienen un foco cuyo tamaño es de 0.3 y 1 mm. Se utilizan pantallas tipo Radelin F y la distancia entre pantallas y foco es de 15 a 45 cm. El objeto que se ensaya se coloca en un punto intermedio de esta distancia, lo que da lugar a una amplificación de imagen. Como barrera protectora, se utiliza vidrio de silicato de plomo. Se consigue una sensibilidad de penetrámetro del 2% y el límite práctico de espesores que se puedan observar es de 50 mm de Al y 75 mm de Mg.

5.5 FLUOROGRAFIA

Es la fotografía de la imagen de la pantalla fluoroscópica; esta imagen se fotografía con una cámara de película pequeña o con una cámara miniatura. Con ello se consigue, además de tener un registro permanente y barato de la imagen, el que éste pueda observarse con suficiente iluminación y una mejora del contraste debida al progreso del proceso fotográfico.

La fluorografía se usó en un principio con fines médicos, pero con el mejoramiento progresivo de las lentes ópticas y de las calidades de las emulsiones fotográficas, ha sido posible aplicarla a equipos de control de producción. La sensibilidad logarítmica, altamente favorable, de estas emulsiones fotográficas, compensa, en parte, la poca respuesta de la sal fluorescente de las pantallas a las energías elevadas de rayos X. Ello tiene por consecuencia el que sea posible efectuar controles de calidad a energías mucho más altas que las que se utilizan en equipos de fluorescencia. Además, en fluorografía, suelen utilizarse pantallas que tienen un poder de separación o resolución mayor que las fluoroscópicas normales.

5.6 INTENSIFICACION DE IMAGENES FLUOROSCOPICAS

La observación de imágenes fluoroscópicas directas tiene el inconveniente fundamental del brillo relativamente bajo con que aparecen, no obstante, en radiografía industrial este inconveniente puede reducirse utilizando tubos de rayos X de mayor potencia, aunque en este caso el observador puede estar expuesto a dosis de radiación superiores a las permisibles para su seguridad. Actualmente, la fluoroscopia electrónica resuelve este problema bastante satisfactoriamente al conseguir imágenes en pantallas con un brillo casi mil veces superior al de las pantallas fluoroscópicas normales. Se han desarrollado dos sistemas de intensificación de imagen: el tubo intensificador y la televisión de rayos X; en ambos sistemas se parte de una imagen fluoroscópica normal y, respectivamente, por la emisión de fotoelectrones acelerados o por un sistema de televisión, dicha imagen se reproduce en otra pantalla con características muy superiores a la inicial.

5.7 TUBOS INTENSIFICADORES DE IMAGEN

En estos tubos, la luz emitida por la imagen de rayos X que se forma en una pantalla fluorescente normal, provoca la emisión de electrones en un fotocátodo situado en las proximidades de una pantalla. Estos electrones son entonces acelerados por una diferencia de potencial elevada y focalizados mediante lentes electrostáticas sobre una segunda pantalla fluorescente, más pequeña que la primera; en esta pantalla es donde se observa la imagen o también el que ésta pueda fotografiarse.

La intensificación de brillo se consigue por la energía que adquieren los electrones en su aceleración y por la reducción del tamaño de la imagen desde la pantalla inicial a la de observación; tal reducción es del orden de unas 9 veces. Se llega a relaciones de intensificación de hasta 1,000 / 1; para esta intensificación de 80, mientras que la restante se debe a la aceleración de los electrones.

Entre las ventajas de intensificación de imagen destacan :

- a.) aumento de la agudeza visual
- b.) pequeño, o ningún, tiempo de adaptación a la oscuridad
- c.) posibilidad de aumentar el contraste de la imagen utilizando kilovoltajes más bajos que los que pueden usar en fluoroscopia normal.
- d.) más probabilidades de utilizar la cine-radiografía para registrar imágenes en movimiento.

5.7.1 Televisión de Rayos X

En la radiografía industrial se utilizan sistemas de televisión en circuito cerrado, que permiten las observaciones a distancia de imágenes radiográficas. En estos sistemas se hace uso del tubo de imagen Orthicon o del tipo Vidicon, siendo el primero mucho más sensible a la luz que el segundo; el brillo de las pantallas fluoroscópicas usuales es demasiado bajo para la observación con un sistema que utilice el sistema Vidicon, a no ser que se utilicen distancias foco-pantalla muy cortas y exposiciones muy intensas.

En equipos de televisión de rayos X en circuito cerrado se utilizan el sistema Vidicon, la parte fundamental es un

tubo que actúa como pick-up, pues recoge directamente los cuantos de rayos X después de atravesar el objeto que se ensaya y los transforma en señales eléctricas. De esta forma se evitan las pérdidas de energía de los cuantos que tienen lugar en la conversión de los rayos X en luz y de luz señales eléctricas, por ello a este sistema se le suele llamar directo.

Capítulo VI

" RADIOGRAFIA DE ALTO VOLTAJE "

6.1 GENERALIDADES

Se considera radiografía de alto voltaje aquella que se realiza con equipos que emiten rayos X con energías de un millón de voltios (1 MeV) o superiores; actualmente se consiguen energías por encima de 30 MeV. En el capítulo III se han indicado algunos de los sistemas de equipos y generadores utilizados para la producción de rayos X de estas energías. Los principios y procesos de la radiografía de alto voltaje son similares, aunque no idénticos, a los de la radiografía con voltajes medios, ya que la naturaleza, características y propiedades de los rayos X con estas altas energías no son iguales a las de los rayos con energías menores.

6.2 RAYOS X DE ALTO VOLTAJE : CARACTERISTICAS

Para una misma corriente electrónica del tubo, se consiguen rayos X con mayor intensidad en radiografía de alto voltaje que en la de voltajes inferiores, es decir, el rendimiento de producción de rayos X es mayor. La distribución de dicha intensidad difiere de la que tiene lugar a voltajes bajos, en los siguientes aspectos :

- a.) Las radiaciones más intensas se producen en la dirección que el haz de electrones sigue en el tubo de rayos X.
- b.) En el intervalo de energías bajas de la radiografía de alto voltaje; hay todavía suficiente intensidad en los rayos laterales reflejados, para que se puedan usar éstos en radiografía.
- c.) En el intervalo de energías altas la intensidad predomina en la dirección del haz de electrones, hasta tal extremo que el haz útil es un cono estrecho, muy intenso.

En la absorción y difusión de los rayos X de alta energía interviene principalmente el efecto Compton, pues el efecto fotoeléctrico y la difusión coherentes, apenas tienen significación aquí. La absorción por producción de pares tiene lugar por encima

de 1 MeV y su probabilidad se hace mayor al aumentar la energía de los rayos X, aunque para la mayoría de los materiales este efecto sólo es importante en la región de los voltajes más altos. En resumen, el efecto total de absorción y difusión por unidad de espesor es menor que cuando se opera con energías bajas y es aproximadamente proporcional al peso específico del material absorbente.

Las sensibilidades de penetrámetro que se consiguen en estos casos, son del orden del 1%, aunque en condiciones óptimas se puede llegar al 0.5 %.

Como ya se indicó antes, con voltajes no muy superiores a 1 MeV los rayos reflejados en el anticátodo (laterales) pueden aprovecharse también, lo cual permite hacer radiografías en panorámica, disposición ésta que resulta muy ventajosa al poderse radiografiar simultáneamente varias piezas o, también, por ejemplo-- una soldadura circunferencial.

6.3 TECNICA EXPERIMENTAL

En la radiografía de alto voltaje, la disposición del tubo de rayos X, del objeto que se ensaya y del chasis con la película radiográfica es fundamentalmente igual que en la radiografía con equipos de potencia media. Con los equipos que trabajan en la zona superior de energías, hay que tener presente, al calcular la distancia foco-película, que ésta sea lo suficiente para que el haz de rayos X bañe todo el objeto, pues, como ya se indicó antes, el cono que forma dicho haz va siendo cada vez más estrecho a medida que aumenta la potencia de los equipos; así, un equipo de 50 MeV emite un haz cuya abertura es unas 6 veces menor que la del emitido por un equipo de 10 MeV. Cuando el tubo tiene un foco de dimensiones reducidas, es posible amplificar la imagen por colocación del objeto en una posición algo alejada de la película radiográfica, pero si tiene un tamaño grande es preciso la mayor proximidad posible entre objeto y película.

La película radiográfica es de grano fino, las películas de clase I proporcionan buena definición y sensibilidad, las de clase II igualmente, las de clase IV usadas con pantallas de plomo se utilizan cuando se desea una mayor latitud, pero esto es a costa de sacrificar la definición. En la radiografía de alto voltaje puede considerarse imprescindible el empleo de pantallas -

de plomo; los electrones que por acción de estas radiaciones de gran energía se emiten del propio objeto y del chasis radiográfico (si éste es metálico), suelen dar lugar a un moteado en toda la extensión de la imagen, esto se evita con las pantallas de plomo, pues dichos electrones son absorbidos por ellas.

Para calcular las exposiciones en radiografía de alto voltaje se pueden utilizar también cartas de exposición, cuando -- las distancias foco-película sean distintas de las especificadas -- en una carta, pueden computarse las exposiciones de la misma te -- niendo en cuenta la ecuación (15).

El proceso fotográfico de cámara oscura debe seguirse con el máximo rigor, puesto que las películas que se han expuesto a radiaciones de gran energía son más sensibles que las expuestas a energías bajas a cualquier error o defecto en la realización del proceso.

6.4 APLICACIONES DE LA RADIOGRAFIA DE ALTO VOLTAJE

La radiografía de alto voltaje se utiliza en aquellos casos donde la radiografía de voltajes medios es inaplicable, porque el espesor del objeto o su densidad son demasiado grandes para poder ser atravesados por los rayos X de estas energías; tal es el caso de las grandes turbinas, soldaduras gruesas en calderas, piezas forjadas, etc., pero también es apropiada la radiografía de alto voltaje para piezas que, aún siendo posible radiografiarlas con voltajes medios, presentan con estas condiciones, por su complejidad, problemas de radiación difusa difíciles de resolver, o que tales piezas con radiografía de alto voltaje disminuyan el tiempo de exposición. Un ejemplo de la conveniencia de utilizar radiografía de alto voltaje en vez de la de medio voltaje, es el ensayo de las paletas de turbinas de motores de aviones a reacción; estas paletas suelen estar fabricadas con aleaciones complejas de elevados contenidos de níquel y cobalto y que solidifican con tendencia a formar un grano de tamaño muy basto; por otra parte, dan lugar a gran cantidad de radiaciones secundarias. Debido a esto las radiografías que se hacen con voltajes medios tienen un aspecto granular o moteado y pueden enmascarar defectos importantes; utilizando equipos de alto voltaje este moteado es menos acusado, hasta el punto de que tales defectos pueden observarse.

Como quiera que muchas unidades de alto voltaje tienen un foco muy fino, constituyen ellas el único medio disponible

para obtener radiografías de precisión, es decir, radiografías en --
las que se puedan determinar detalles muy finos en partes complejas
, con una precisión tal que pueda ser comparable con las toleran--
cias usuales en el mecanizado.

La radiografía de alto voltaje presta también excelen
tes servicios en la industria de energía nuclear, no yá solo para--
el ensayo de soldaduras en reactores, sino también para el de mate--
riales de peso atómico elevado como el uranio, que aun en espeso--
res pequeños no se pueden radiografiar, por ser muy absorbentes, -
con equipos de voltaje medio.

Capítulo VII

" PROTECCION CONTRA LOS RAYOS X "

7.1 GENERALIDADES

Los rayos X, al igual que otras fuentes de radiación ionizante, no sólo se utilizan en la industria, sino también en Medicina con fines terapéuticos o de diagnóstico, pero, en estos casos, la administración y el control de tales radiaciones son muy rigurosas, ya que pueden originar daño en las células o su destrucción. Por ello el personal que trabaja en radiografía industrial está expuesto a la acción perjudicial de los rayos X, sino se toman los medios suficientes de protección para que, por lo menos, sólo se reciba una cantidad de radiación que no dañe el organismo. El problema de tal protección, es en general, difícil e implica una serie de minuciosos detalles y de medidas de vigilancia, aparte de un adiestramiento y educación del personal para protegerse de las radiaciones.

7.2 DOSIS MAXIMAS PERMISIBLES

Para medir la radiación que llega al cuerpo humano se utiliza como unidad el roentgen y, para medir la dosis que recibe, el rem y el rad. El roentgen es la cantidad de rayos X o gamma -- tal que la emisión corpuscular asociada por 0.001293 gr. de aire, produce, en el aire, iones que transportan 1 unidad electrostática de cantidad de electricidad de cada signo. El rem es la medida de la dosis de cualquier radiación ionizante que recibe un tejido del cuerpo y que produce un efecto análogo al de la dosis de un roentgen de rayos X; se utiliza también la milésima parte de dicha unidad (milirem). El rad es la dosis correspondiente a la absorción de 100 ergios por gramo de tejido. A continuación se indican las equivalencias entre estas unidades; tales equivalencias son aproximadas, pues dependen de muchas variables, como la energía de la radiación y el tipo de tejido que la reciba.

Para radiación X y Gamma	1 r :	1 rem :	1 rad
Para radiación Beta		1 rem :	1 rad
Para radiación de neutrones		1 rem :	0.1 rad
Para radiación alfa		1 rem :	0.05 rad

Como se indicó antes, el cuerpo humano puede recibir una cantidad de radiación sin que se produzca una acción perjudicial sobre él. Teniendo en cuenta el efecto acumulativo de las radiaciones sobre el organismo, al establecer las dosis permisibles de radiación que puede recibir una persona, hay que considerar si ésta trabaja habitual o eventualmente con radiaciones, la edad de la persona, su estado de salud, etc. En la tabla (29) se indican las dosis permisibles para personas que trabajan con radiaciones teniendo en cuenta el tiempo de trabajo y la frecuencia de éste. El Comité Nacional de Protección contra la radiación de los Estados Unidos, sugiere que los menores de edad y las mujeres gestantes sólo pueden recibir una décima parte de la radiación -- permisible para que las personas que trabajan con radiaciones habitualmente. Como se refleja en dicha tabla, a los empleados de una fábrica que trabaje con radiaciones y no están destinados a este menester, sólo se les permite una dosis de 0.5 rem por año -- ya que normalmente no están sometidos a un control periódico de radiaciones o no guardan las debidas precauciones contra ellas.

TABLA 29

<u>PERSONAL QUE TRABAJA HABITUALMENTE CON RADIACION</u>	<u>DOSIS MEDIA</u>
Dosis total en 13 semanas consecutivas : 3 rem	0.3 rem/semana
Dosis total en un año : 12 rem	
Dosis total acumulada a la edad N : 5 x (N-18) rem	5.0 rem/año

PERSONAL NO OCUPADO HABITUALMENTE CON RADIACIONES

Personas que no reciben dosis que excedan de 1/10 de las permitidas para los trabajadores habituales 0.5 rem/año

NOTA : Excepto para circunstancias excepcionales, una dosis de emergencia de 25 rem que tenga lugar durante cualquier época de la vida y una exposición médica necesaria, no afecta la dosis permisible para un individuo.

EXPOSICIONES DE PARTES DEL CUERPO

(Dosis en volúmenes significativos de órganos críticos) en rem

Piel de todo el cuerpo excepto de las extremidades	Extremidades	Organos formados de sangre	Organos Genitales	Ojos
8	20	3	3	3

7.3 CONTROL DE RADIACIONES

Puesto que, como se indicó en la sección anterior, la dosis de radiación que recibe el cuerpo humano no debe de sobrepasar ciertos valores; para ello, es necesario seguir una serie de procedimientos y técnicas, conducentes a disminuir la radiación que puede llegar al personal, al mismo tiempo que controlar y medir las exposiciones que recibe la persona durante una determinada experiencia, o la que se acumula después de un día, una semana o cualquier período de trabajo.

Es conveniente que antes de destinar a una persona a un trabajo en el que esté expuesta a radiaciones, se la someta a reconocimiento médico para comprobar si sus condiciones físicas, recuento de sangre, etc, son adecuadas para tal cometido. De todas formas, se recomienda realizar un recuento periódico de sangre en las personas que trabajan con radiaciones, pero ello no indica si la persona ha recibido más dosis de la permitida.

Es aconsejable que aquellas personas que durante cualquier período de tiempo puedan estar expuestas a una dosis que suponga un 25% de la básica permisible durante una semana, vayan provistos de detectores de radiación. Un detector sencillo para este fin consiste en un pequeño chasis especial, que se lleva por ejemplo en la solapa, y que contiene película radiográfica y filtros apropiados para determinar no sólo la cantidad de radiación, sino también su energía. Otros medios de detección y medida son los dosímetros de bolsillo y las cámaras de ionización de bolsillo. En los primeros pueden hacerse directamente las lecturas; con las cámaras de ionización se precisa un dispositivo separado de lectura.

Para detectar y medir la radiación que hay en un ambiente donde existe o donde se opera con una fuente de la misma, se utilizan instrumentos que están basados en la ionización del aire o de otros gases a través de los cuales para la radiación. Hay dos tipos de instrumentos :

- a.) Los que registran los pulsos producidos por partículas individuales, y
- b.) los que indican las dosis o intervalos de ellas y, en consecuencia, la disposición o disipación de energía en un medio.

Estos detectores utilizan tubos Geiger-Muller o cámaras de ionización; los que llevan tubos Geiger son los más sensibles,

y más convenientes para medidas rápidas, pero están limitados a cantidades de radiación inferiores a 20 mr/hora. Los detectores que utilizan la cámara de ionización miden dosis de radiación y son aconsejables para la determinación de niveles altos de radiación como los que hay en los alrededores del tubo en un equipo de rayos X; además, estos detectores son los más apropiados para las radiaciones tipo pulsatorio (Betatrón), pues, en este caso, un contador Geiger sólo indica el número de pulsos y no la dosis media, ya que el nivel de radiación instantánea, durante el pulso, es demasiado alto para la respuesta de dicho contador.

7.4 PROTECCION CONTRA LAS RADIACIONES

En el control de exposición que pueda recibir el personal y para su protección, hay que tener en cuenta tres factores fundamentales: tiempo de trabajo, distancia de la fuente de radiación y apantallamiento (barreras).

El tiempo de trabajo permisible, por ejemplo, por semana se obtiene dividiendo la dosis máxima autorizada en mr/semana por la dosis que se recibió en mr/hora. Así, si la primera es de 300 mr/semana y la segunda es de 15 mr/hora, el tiempo que se autoriza es de 20 horas semanales.

La distancia de la fuente de radiación a que se trabaja debe ser la máxima posible para que la dosis recibida sea menor, puesto que la dosis que se recibe de una fuente de radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y la persona, teniendo en cuenta que la dimensión del foco de un tubo de rayos X (o de una fuente radioactiva) es pequeña -- comparable con dicha distancia y también que no hay una difusión o absorción apreciables de la radiación durante su propagación por el aire.

Para el apantallamiento se utilizan materiales que actúan de barreras de la radiación. Estas barreras se usan para la protección contra la radiación primaria, o simultáneamente para la radiación primaria y secundaria, denominándose entonces, respectivamente barreras primarias y barreras secundarias. Las barreras pueden ser también portátiles o fijas, prefiriéndose estas últimas puesto que generalmente tienen mayor extensión y su diseño y disposición más estudiados, ofrecen un margen superior de seguridad.

Espesor de hormigón en pulgadas requerido para barreras protectoras primarias, operando a 10 miliamperios y a la distancia y kilovoltaje indicados (Densidad del hormigón: 2.35 g/cm³) (De "ASA Safety Code for Industrial Use of X-Rays")

Distancia al anticátodo (pies)	K I L O V O L T I O S							
	75	100	125	150	175	200	225	250
1	6.97	9.06	11.27	14.52	15.39	18.79	20.98	23.23
2	5.83	7.64	9.65	12.60	13.66	16.38	18.31	20.16
3	5.24	6.93	8.86	11.05	12.49	15.08	16.73	18.54
4	4.65	6.46	8.30	10.71	11.61	14.02	15.67	17.24
5	4.37	6.22	7.80	10.39	11.02	13.23	14.80	16.34
6	4.09	5.71	7.52	9.76	10.74	12.68	14.13	15.63
8	3.78	5.24	6.97	9.13	9.88	11.65	12.67	14.37
10	3.50	5.00	6.46	8.50	9.30	10.83	12.24	13.46
15	2.91	4.29	5.63	7.56	8.15	9.35	10.71	11.81
20	2.33	3.82	5.12	6.93	7.56	8.46	9.65	10.65
30	1.77	3.11	4.29	5.98	6.41	7.17	7.95	8.74
40	1.46	2.64	3.78	5.04	5.51	6.34	6.99	7.64
50	1.18	2.16	3.23	4.41	4.96	5.55	6.12	6.73
75	0.91	1.69	2.44	3.46	4.09	4.49	4.72	5.27
100	0.59	1.36	1.89	2.83	3.23	3.70	3.86	4.17

Estos espesores anteriores de hormigón se utilizan cuando la corriente del tubo es de 10 mA. Para otros valores de corriente, se añaden los espesores que se dan a continuación, a los anteriores de la tabla.

20 mA	0.59	0.71	0.83	0.95	1.06	1.22	1.30	1.46
30 mA	0.95	1.10	1.30	1.50	1.69	1.93	2.15	2.28
40 mA	1.18	1.42	1.65	1.89	2.13	2.44	2.60	2.92
50 mA	1.38	1.61	1.89	2.16	2.44	2.80	3.03	3.19

Nota: Estos espesores son suficientes para reducir la dosis a 12.5 mr/hora, bajo las condiciones indicadas.

fig. (30)

T A B L A 15.1

fig (31)

Espesor de hormigón en pulgadas requerido para barreras protectoras primarias, operando con la corriente, distancia y kilovoltaje que se indican (Densidad del hormigón = 2.35 g/cm³) (De "ASA Safety Code for Industrial Use of X-Rays").

Distancia al anticáodo (pies)	M I L I A M P E R I O S							
	1 Millón de voltios				2 Millones de voltios			
	0.5	1.0	2.0	3.0	0.5	1.0	2.0	3.0
4	30.5	32.5	34.5	36.0	44.5	47.0	49.5	51.0
5	29.5	31.5	33.5	34.5	43.0	45.5	48.0	49.5
6	28.0	30.0	32.5	33.5	42.0	44.5	47.0	48.5
8	26.5	28.5	30.5	32.0	39.5	42.0	44.5	46.0
10	25.0	27.0	29.5	30.5	38.0	40.5	43.0	44.5
15	23.0	25.0	27.0	28.0	35.0	37.5	40.0	41.5
20	21.0	23.0	25.0	26.5	33.0	35.5	38.0	39.5
30	19.5	20.5	22.5	24.0	30.0	32.5	35.0	36.5
40	17.0	19.0	21.0	22.0	28.0	30.5	33.0	34.5
50	15.5	17.5	19.5	21.0	26.0	28.5	31.0	32.5
75	13.5	15.5	17.5	18.5	23.0	25.5	28.0	29.5
100	11.5	13.5	15.5	17.0	21.0	23.5	26.0	27.5

Nota: Estos espesores son suficientes para reducir la dosis a 12.5 mr/hora, bajo las condiciones indicadas.

T A B L A 15.4

fig. (32)

Material	Intervalo de densidades g/cm ³	Densidad de una muestra media g/cm ³
Ladrillo	1.6-2.5	1.9
Granito	2.60-2.70	2.63
Piedra caliza	1.87-2.69	2.30
Mármol	2.47-2.86	2.70
Yeso	—	1.54
Arena	1.90-2.69	2.20
Hormigón silicioso	2.25-2.40	2.32
Azulejo	1.6-2.5	1.9
Barro	—	1.5

Los materiales que más se utilizan para la construcción de barreras son el hormigón y el plomo, pero también se usan otros muchos como hierro y acero, ladrillos de bario, granito, piedra caliza, etc. El plomo es apropiado para equipos que operan hasta -- 400 KV, pero a partir de aquí se requieren de espesores demasiado grandes de plomo, lo que desde un punto de vista económico y de -- una instalación no es aconsejable; en estos casos suele utilizarse hormigón o una combinación de hormigón y plomo.

El espesor de una barrera depende de muchas variables, como la naturaleza del material con que se construye, la energía de la radiación, la exposición, el número de horas de la misma, etc. y por último, si es una barrera primaria o secundaria. La gráfica de la figura (25) muestra los espesores de plomo en barreras primarias que se requieren para reducir la exposición a las dosis permisibles de 12.5 mr/hora, bajo distintas condiciones operatorias; los espesores de plomo para las barreras secundarias se considera que son la mitad de los indicados en la gráfica para las barreras primarias.

En la tabla (30) y (31) se dan en espesores de hormigón, densidad 2.35 gr/cm^3 , que se precisan para barreras primarias operando en distintas condiciones. Si la densidad del hormigón fuera distinta de 2.35, el espesor que entonces se requiere se obtiene multiplicando los datos de la tabla por el factor $2.35/$, siendo la densidad del hormigón problema.

En la tabla (32) se comparan los espesores efectivos de varios materiales de barreras, cuando se opera con distintas energías de radiación.

En la construcción de barreras aparte de los problemas específicos de cada instalación, hay que considerar algunas precauciones de tipo general como las que se indican a continuación. Las grietas, agujeros etc, en una barrera deben evitarse; si ésta es de plomo, incluso las cabezas de los clavos o tornillos tienen que taparse o recubrirse con plomo y las uniones entre chapas deben ir solapadas. Cuando en una barrera existen, por ejemplo, ventanas de observación, éstas serán de vidrio de plomo de un espesor tal que proporcione una protección equivalente a la de la barrera.

Los orificios en tuberías, conductos etc; deben protegerse convenientemente, utilizando varias vainas o forros continuos de plomo, soldados a la pared.

Capítulo VII

" CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES "

La constante actualización de la técnica radiográfica, ha permitido que se establezcan distintos sistemas de control; cada uno de los cuales, se adecúa a un tipo de industria en particular.

Se han logrado grandes avances en sistemas automatizados, especialmente, en aquellos que utilizan técnicas fluoroscópicas con sistema de intensificación de imágenes y pantallas de televisión.

Este desarrollo es producto de la creciente necesidad de optimizar los métodos de control actuales, y la técnica radiográfica, como se ha mostrado en el presente trabajo, posee las bondades que lo hacen apto para ser introducido, incluso en industrias no metálicas, como lo son: la industria de alimentos envasados y la industria de manufactura de neumáticos, por citar algunos ejemplos.

En nuestro medio, en los últimos veinte años, la industria ha venido utilizando, aunque en forma aislada, distintos sistemas de control de materiales con radiaciones penetrantes (rayos X y Gamma). Cabe destacar, sin embargo, que en nuestro país no se cuenta con instituciones que forme profesionales ni entidades que investiguen o regulen este tipo de actividad. A fin de subsanar estos sucesos, sería importante que se oriente a técnicos y profesionales hacia el conocimiento y aplicación de los distintos sistemas de evaluación y control de materiales con radiaciones penetrantes, como un medio eficiente para tales menesteres.

En nuestro medio es posible adquirir equipo y tecnología adecuados, que posibiliten lo anteriormente dicho.

Como últimas líneas quisiera mencionar algunas reglas de carácter general que condicionan y regulan la eficacia de la inspección con rayos X.

* Los ensayos no destructivos son cualitativos por lo que se requiere de una correlación con los ensayos "destructivos" para lograr una mayor eficacia.

* Dentro de las técnicas usadas, no se puede hablar de un método de ensayo único, o más eficiente, pues cada problema requiere de un procedimiento propio, condicionado por la siguientes variables :

** Clase de material a ensayarse

** Método de fabricación

** Geometría de la muestra

** Conocimiento de los defectos a controlar y de sus causas

** Grado de resolución o sensibilidad deseada.

* Las cartas de exposición son función de las características y particularidades de cada unidad de rayos X. Por lo que al adquirir una unidad de rayos X, ésta deberá incluir sus propias cartas de exposición, en las cuales deberán figurar las condiciones operativas para los distintos materiales en que puede ser usado.

* En cualquier sistema de inspección por radiación penetrante se deben observar las medidas de protección adecuadas. En nuestro medio; la verificación de las condiciones de seguridad y protección; son efectuadas por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

* Como última recomendación, debo señalar, que, se requiere de un gran bagaje de conocimientos y experiencia por parte del operador, a fin de que éste interprete correctamente los resultados de un ensayo.

Capítulo IX

" APENDICES Y BIBLIOGRAFIA "

" BIBLIOGRAFIA "

- * NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK**
Edited by Robert C. Master for The Society for
Nondestructive Testing
The Ronald Press Co. New York 1959
- * NONDESTRUCTIVE TESTING**
Warren J. Mc. Gonnagle
Mc. Graw Hill Book Co Inc. 1961
- * LOS RAYOS X Y EL ULTRASONIDO EN LAS PRUEBAS
NO DESTRUCTIVAS DE MATERIALES**
Philips Peruana S. A.
Lima, 1975
- * ENSAYO DE MATERIALES Y CONTROL DE DEFECTOS
EN LA INDUSTRIA DEL METAL**
H. Studemann
Editorial Urmo, Bilbao
- * NEW DEVELOPMENTS IN XERORADIOGRAPHY**
Mc Master R. C.
Nondestructive Testing 13, N° 6 (1951)
- * FIELD EVALUATION OF INDUSTRIAL XERORADIOGRAPHY**
Taylor G. M. y Tenney G. H.
Nondestructive Testing 13, N° 6 (1955)
- * FLUOROSCOPIC METHODS OF INSPECTION OF METALLIC MATERIALS**
California Institute of Technology
1945
- * PRACTICAL RADIOGRAPHY FOR INDUSTRY**
H. R. Clauser
- * SCIENCE AND INDUSTRY**
Philips publication on instrumentation and automation
in science and industry
Philips
- * MATERIALS EVALUATION**
An official journal of The American Society for
Nondestructive Testing (ASNT).

Apéndice Primero

" TRADUCCION DE LA NORMA DIN-54110 "

Indicaciones del procedimiento para la calificación de radiografías con rayos X en piezas.

1.- Propósito

- * Fijar las exigencias de la bondad de la radiografía
- * Poner las bases para una clasificación homogénea de la bondad obtenida de la radiografía.

2.- Calidad de la radiografía

Se mide con la ayuda de un penetrómetro de Al, Fe ó Cu, que se encuentra alejado de la película sobre la pieza a examinarse y que será radiografiada conjuntamente con ella.

Como medida de la calidad de radiografía obtenida debe regir el diámetro del alambre más delgado, todavía detectable en porcentaje del espesor del material a penetrar. Esta medida se denomina como :

Detectabilidad del alambre (DA)

$$DA : \frac{\text{Diámetro menor del alambre reconocible}}{\text{Espesor del material}} \times 100 \%$$

Penetrómetros .--

Consisten en 7 alambres de diferentes diámetros, ubicados en un material de poca absorción; tiene además una indicación de DIN y una numeración de grupo, como también el número 53, siendo éstos de material de plomo. Deben estar aprobadas oficialmente -- por una institución autorizada para esta finalidad. Para los alambres se permiten las siguientes desviaciones :

Diámetro del alambre (mm.)	Desviación permisible (mm.)
0.1 a 0.9	± 0.02
1.0 a 1.8	± 0.05
2.0 a 4.0	± 0.10

**DENOMINACION DEL GRUPO, CONSTRUCCION Y CAMPO
DE APLICACION DE LOS PENETRAMETROS**

Material		Denominación de grupo de los penetrá- metros	Diámetro de los alambres							Para espesores de materiales (en mm)	
De la pieza a examinar	De los a lambres									Con clase de calidad	
										1	2
Aluminio y aleaciones	Al	DIN Al 1	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0 a 30	0 a 25
		DIN Al 2	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	30 a 60	25 a 50
		DIN Al 3	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	> 60	50 a 100
		DIN Al 4	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00		>100
Fierro y aleaciones	Fe	DIN Fe 1	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0 a 30	0 a 25
		DIN Fe 2	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	30 a 60	25 a 50
		DIN Fe 3	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	> 60	50 a 100
		DIN Fe 4	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00		> 100
Cobre, Zinc y sus aleacio nes	Cu	DIN Cu 1	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0 a 30	0 a 25
		DIN Cu 2	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	30 a 60	25 a 50
		DIN Cu 3	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80	> 60	50 a 100
		DIN Cu 4	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00		> 100

Las exigencias, dependen de la clase y tamaño del detalle a visualizarse en relación al esfuerzo que soporta la pieza a examinarse.

Para su reconocimiento debe aparecer con ella el correspondiente penetrómetro. El espesor del material (en dirección al rayo central incidente) en el sitio del penetrómetro debe indicarse.

Calidades .-

Calidad I; con posibilidad de reconocimiento de alto detalle

Calidad II; con posibilidad de reconocimiento de detalle normal

En piezas a examinarse hasta 10 mm deben reconocerse ambas clases, alambres de 0.25 mm de diámetro. En espesores de materiales de más de 10 mm. Los alambres a reconocerse deben ser de acuerdo a :

Espesor del material (mm)		11 a 30	31 a 50	51 a 100	>100
Posibilidad de reconocimiento de alambre en % mínimo.	Clase I	1.5	1.2	1.2	1.2
	Clase II	1.5	1.5	2.0	3.0

Calidad de radiografía al irradiar paredes múltiples

Si el control de la pieza solo es posible si se irradia a través de espesores de materiales extendidos delante entonces para la averiguación del diámetro del alambre a reconocerse - debe regir la suma de los espesores a irradiarse.

El penetrómetro debe, si esto fuera posible, ubicarse sobre la superficie (más alejada de la película) de la parte de la pieza que nos interesa examinar.

Apéndice Segundo

" EQUIPOS INDUSTRIALES DE RAYOS X "

Equipos Portátiles


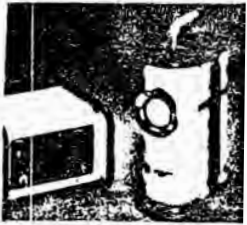
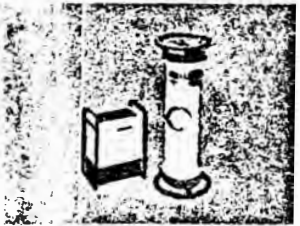
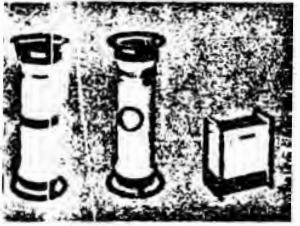
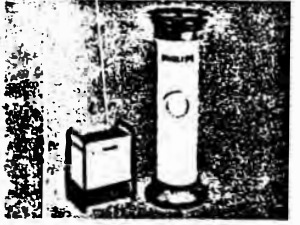
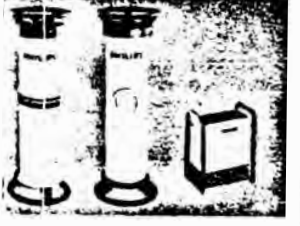
Datos Técnicos

*) PENETRACION

En mm. de acero con película de grano fino (D 7) y pantallas intensificadoras de plomo. 700 mm. FFD. densidad de película 1.8. exposición 10 min.

***) PESO Y DIMENSIONES

Referidos a tanques sin jaula ni aros opcionales.

Equipo	Tubo de rayos X	Punto focal	Salida	Penetracion *)	Peso y dimensiones **)	
	K 140 Bø	Haz direccional. Dos focos	0.6 x 0.6 mm 1.8 x 1.8 mm	140 kV/2 mA 140 kV/5 mA	14 mm 18 mm	29 kg 420 x 300 x 180 mm
	K 200	Haz direccional	1.6 x 1.6 mm	200 kV/5 mA	33 mm	40 kg 500 x 345 x 180 mm
	G 200/5	Haz direccional	1.6 x 1.6 mm	200 kV/5 mA	33 mm	45 kg 794 x 239 mm ø
	G 200/8	Haz direccional	2.3 x 2.3 mm	200 kV/8 mA	37 mm	45 kg 794 x 239 mm ø
	G 220/5	Haz direccional	1.6 x 1.6 mm	220 kV/5 mA	39 mm	45 kg 794 x 239 mm ø
	G 220/8	Haz direccional	2.3 x 2.3 mm	220 kV/8 mA	44 mm	45 kg 794 x 239 mm ø
	G 220 K	Haz panorámico. Anodo cónico	4.0 x 0.4 mm	220 kV/5 mA	36 mm	45 kg 794 x 239 mm ø
	G 261	Haz direccional	2.3 x 2.3 mm	260 kV/5 mA	48 mm	61 kg 907 x 274 mm ø
	G 301	Haz direccional	2.3 x 2.3 mm	300 kV/5 mA	55 mm	61 kg 907 x 274 mm ø
	G 301 K	Haz panorámico. Anodo cónico	5.0 x 0.5 mm	300 kV/5 mA	50 mm	61 kg 907 x 274 mm ø

Equipos de Potencial Constante

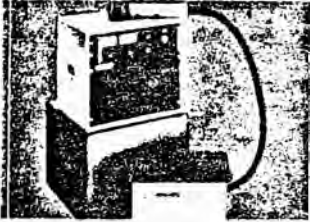


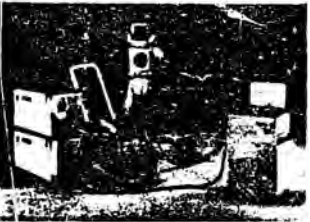
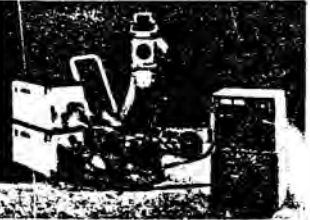

Datos Técnicos

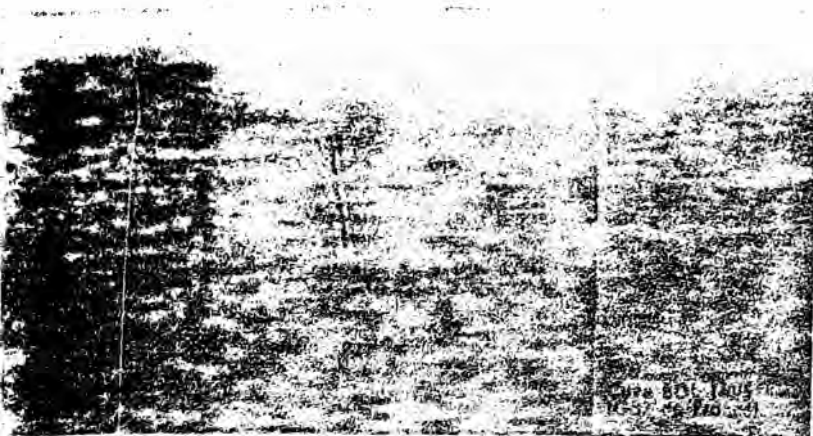
*) PENETRACION

En mm. de acero con película de grano fino (D 7) y pantallas intensificadoras de plomo. 700 mm. FFD, densidad de película 1.8, exposición 10 min.

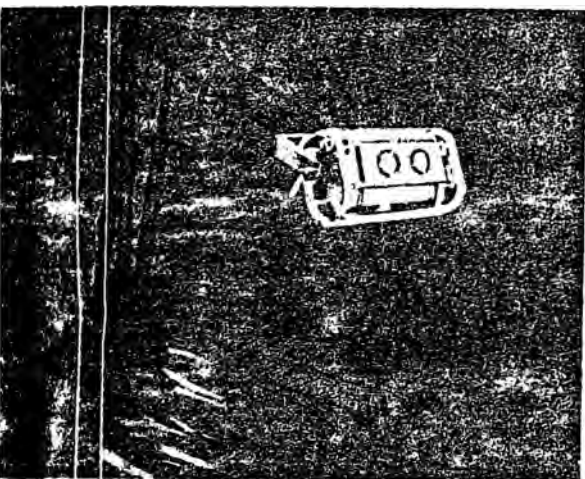
***) PESO Y DIMENSIONES

Referidos a tubos de rayos X solamente, sin asas ni sistema de conexión para cable de A.T.

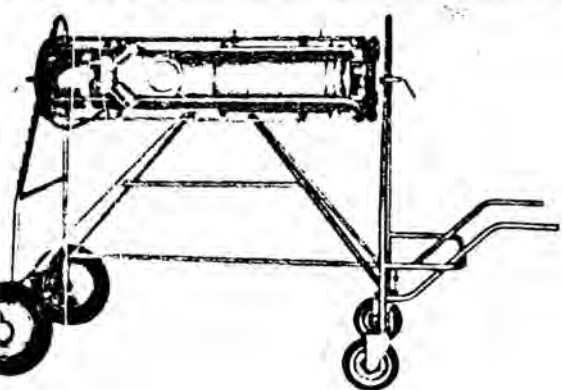
	Equipo	Tubo de rayos X	Punto focal	Salida	Penetracion *)	Peso y dimensiones **)
	MG 101 MO 100 Be	Haz direccional	1.5 x 1.5 mm	100 kV/10 mA	14 mm	8 kg 405 x 75 mm ∅
	MG 151 MCN 161	Haz direccional, Dos focos	0.4 x 0.4 mm 3.0 x 3.0 mm	160 kV/4 mA 160 kV/19 mA	27 mm 36 mm	8 kg 289 x 100 mm ∅
	MG 151 MOS 152/15	Haz panorámico, Anodo plano	5.0 x 1.5 mm	150 kV/15 mA	27 mm	34 kg 1093 x 188 mm ∅
	MG 160 MCN 161	Haz direccional, Dos focos	0.4 x 0.4 mm 3.0 x 3.0 mm	160 kV/4 mA 160 kV/19 mA	27 mm 36 mm	8 kg 289 x 100 mm ∅
	MG 160 MOS 152/15	Haz panorámico, Anodo plano	5.0 x 1.5 mm	150 kV/15 mA	27 mm	34 kg 1093 x 188 mm ∅
	MG 301 MOD 301/4	Haz direccional, Dos focos	1.5 x 1.5 mm 4.0 x 4.0 mm	300 kV/4 mA 300 kV/10 mA	67 mm 78 mm	70 kg 365 x 250 x 708 mm
	MG 301 MR 305	Haz panorámico, Anodo plano	5.0 x 1.5 mm	300 kV/8 mA	64 mm	49 kg 365 x 250 x 826 mm
	MG 320 MOD 301/4	Haz direccional, Dos focos	1.5 x 1.5 mm 4.0 x 4.0 mm	300 kV/4 mA 300 kV/10 mA	67 mm 78 mm	70 kg 365 x 250 x 708 mm
	MG 320 MR 305	Haz panorámico, Anodo plano	5.0 x 1.5 mm	300 kV/8 mA	64 mm	49 kg 365 x 250 x 826 mm
	MG 420 MCN 421	Haz direccional, Dos focos	1.5 x 1.5 mm 4.5 x 4.5 mm	420 kV/3 mA 420 kV/10 mA	82 mm 100 mm	100 kg 850 x 300 mm ∅



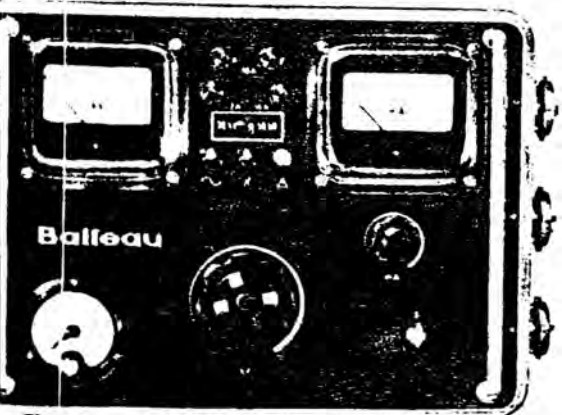
BGL 200/3 complet
avec nouveau
coffre de transport.



Cuve BL 200/5
avec soufflerie.



Cuve G 300/3 D
avec centreur lumi-
neux et gaine d'eau.



Valise de commande
stabilisée.

Utilisation itinérante, donc intermittente : légèreté, maniabilité, robustesse, encombrement réduit sont les impératifs primordiaux des Services de Contrôle.

La réponse Balteau : la gamme des

baltospot

Principe d'isolement dans la cuve :

huile pour 100-140 et 200 kV directionnels ; gaz neutre SF₆ pour les autres.

Dispositif de commande :

coffret compact jusqu'à 200 kV/3 mA ; valise stabilisée à partir de 200 kV/5 mA, avec automatisation sur demande.

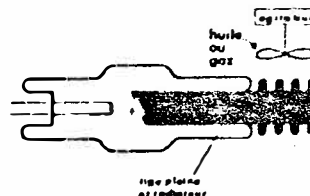
Principe de fonctionnement :

autoreddresseur pour tous les types.

Temps de marche courts, 1 à 5 min., répondant à l'économie des contrôles sur chantier.

Débits moyens 3 à 5 mA : la maniabilité impose la réduction du poids des cuves, ce qui limite le débit et le rythme.

Principe de refroidissement du tube :



transmission des calories à l'air ambiant accélérée par circulation interne de l'isolant, sans obligation de refroidir par eau.

Supports : 2 à 4 modèles par appareil.

baltospot

Type	kV min.	kV max.	mA	pénétration (mm)		cuve nue kg
				D 10	D 7	
BGL 100/5	25	100	5	9 (Fe)	68 (Al)	23
BGL 140/5	25	140	5	21 »	15,5 (Fe)	23
G 150 D	40	150	3	22 »	16 »	24
BGL 200/3	30	200	3	34 »	24 »	39
BL 200/5	30	200	5	37 »	27 »	39
G 300/3 D	60	300	3	63 »	49 »	71

baltospot (Panoram. 360°)*

G 100 P	40	100	4	7,5 (Fe)	64 (Al)	23
G 150 P	60	150	3	21 »	15 (Al)	23
G 300/3 P	80	300	3	61 »	47 »	71

* Voir illustrations en dernière page.

Les rayons X industriels des rayons X
 se divisent en deux grandes familles
 auxquelles répondent deux
 gammes parallèles d'appareils Balteau.
 Modernes, simples, sûrs, compacts
 (non blindés en 50 kV), adaptés au
 travail.



Utilisation stationnaire ou semi-fixe, à rythme élevé
 ou même continu : puissance, automaticité, fonction-
 nement sans limitation de temps n. i. de réglage
 s'imposent.

La réponse Balteau : la gamme des

baltographe

Principe d'isolement dans la cuve :
 huile pour le BF 200/10 ; gaz neutre SF6 pour les
 RE 320 et CE 400.

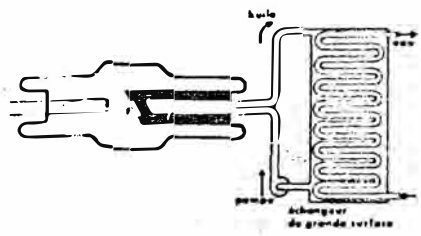
Dispositif de commande :
 valise de commande stabilisée, avec automatisation
 sur demande ou pupitre de commande automatique.

Principe de fonctionnement :
 autoreddresseur, redressé ou tension constante.

Temps de marche sans limitation, pour radiographie
 en série ou irradiations.

Débits élevés 10 à 30 mA : la radiographie demande
 de petits foyers d'émission et les débits sont liés aux
 surfaces focales.

Principe de refroidissement du tube :



une pompe injecte dans l'anode un fluide refroidis-
 sant : eau (pour les 50 kV) ou huile, celle-ci refroidie
 par eau.

Supports : mobiles ou stationnaires.

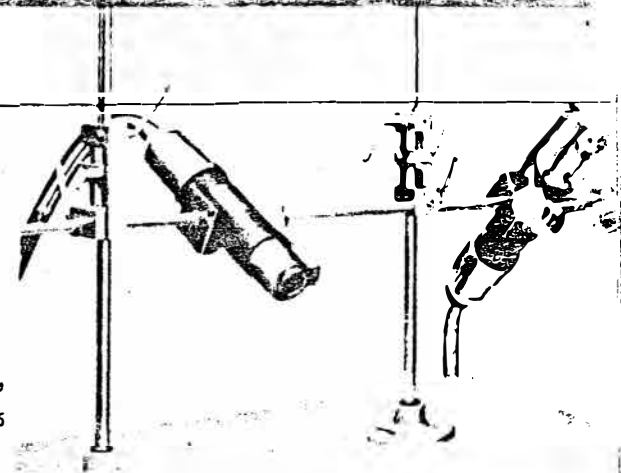
baltographe

Type	kV min.	kV max.	mA	pénétration (mm)	
				D 10	D 7
BF 50/20	5	50	20	3 (Fe)	34 (Al)
CE 50/15	5	50	15	3,5	39
CE 50/30	5	50	30	irradiations	
BF 200/10	40	200	10	45 (Fe)	34 (Fe)
RE 320/14	60	320	14	82	68
CE 400/10	100	400	10	86	72
				104	68

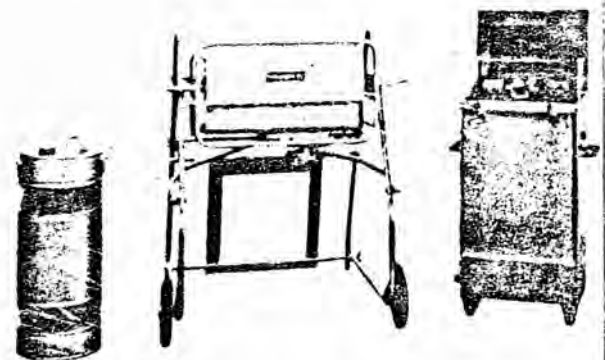
Pénétrations. FF = 700 mm (panoram. : R = 700 mm).
 Noircissement = 1,5 ; T = 5 min. Réglages max.
 Films Gevaert D 10 et D 7, avec écrans Pb (sauf Al).

Types C tension constante
 R tension redressée
 B autoreddresseur, isolement huile
 G : autoreddresseur, isolement gaz.

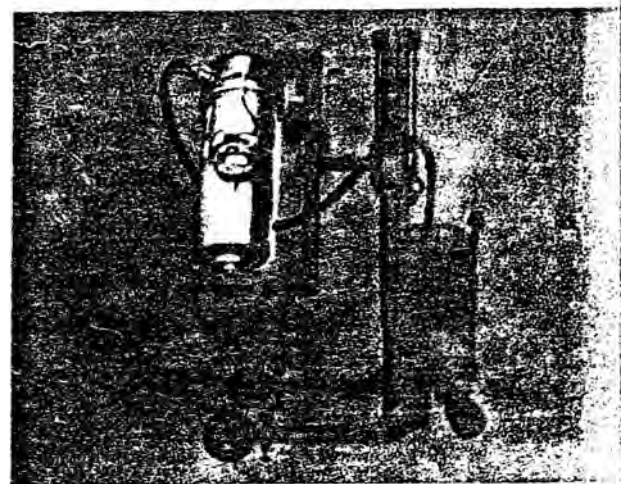
Sur demande : prospectus détaillés (fr.-angl.-all.) ;
 adaptations particulières et installations complètes de
 contrôle radiologique.



Tubes à fenêtre Be
 ● CE 50/30
 ● BF 50/20 et CE 50/15
 avec contreur lumineux



Cuve BF 200/10
 avec pompe à eau et
 meuble automatique.



Cuve RE 320/14
 sur élévateur avec
 pompe incorporée.

Cuve CE 400/10
 adaptée sur élévateur
 automatique.

Apéndice Tercero

" NORMAS DIN - 54111 "

Procedimientos para el examen de uniones soldadas en piezas metálicas con rayos X.

I.- Fluoroscopia

No es recomendable por su escasa posibilidad de reconocimiento de fallas.

II.- Radiografía

Para abreviar el tiempo de exposición en radiografías sobre películas o papel, pueden utilizarse pantallas intensificadoras.

Deben tenerse en cuenta los procedimientos vistos en DIN- 54110.

- * Los rayos X deben incidir sobre la película en forma perpendicular
- * Debe aproximarse al máximo la película a la pieza.
- * Para rebajar la radiación secundaria, debe diafragmarse el campo radiográfico al máximo.
- * Debe tomarse precauciones contra la radiación secundaria, lateral o trasera, originada fuera de la zona de la misma radiografía.
- * Para mantener la distorsión geométrica dentro de límites aceptables, la distancia focal no debe disminuir debajo de un valor -

$$e_{\min} : \frac{b (d + u_i)}{u_i}$$

donde :

b : distancia entre la superficie frontal de la pieza y la película

d : diámetro de la fuente (foco)

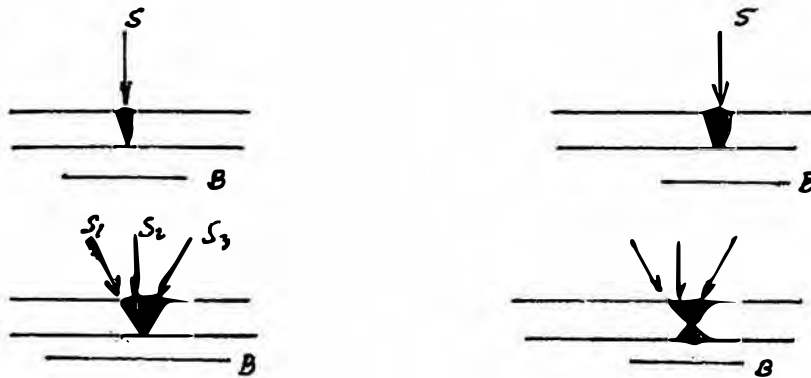
u_i : falta de nitidez inherente

Si el valor de e_{\min} es mayor del valor de e, debe consignarse en el informe esta situación.

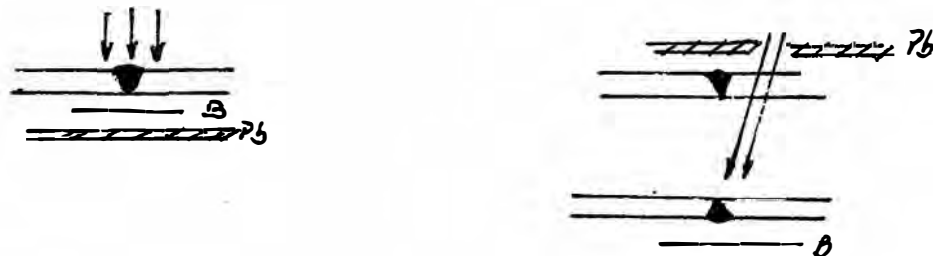
Falta de Nitidez inherente para diferentes radiaciones y películas

Tipo de radiografía	Radiografías con rayos X			
	Sin pantallas metálicas, con película de grano fino		Pantalla de sal de alta definición	Pantalla de sal de alta amplificación
	< 80 KV	> 80 KV		
u_i (mm)	0.1	0.2	0.3	0.4

Recomendaciones para la toma, e irradiación en costuras tipo : I, U, V, X.



con sospecha de falsa unión frío.



Costuras Circulares

Apéndice Cuarto

" ENSAYOS CON RAYOS GAMMA "

Se emiten rayos gamma a causa de la desintegración nuclear de elementos radioactivos. Estos rayos se desprenden por ejemplo de elementos radioactivos, materiales, tales, como el radio, radón, mesotorio.

El inconveniente en este caso es el elevado precio. Por actividad se entiende el número de desintegraciones que experimenta un gramo de radio por segundo y que asciende a 3.7×10^{10} desintegraciones.

a.- Isótopos

Se denomina así a las materias que en su constitución atómica se diferencia sólo de la sustancia básica por el número de neutrones del núcleo. Esto significa que los átomos tienen las mismas propiedades químicas de la materia básica, pero difieren en el peso atómico. Si por ejemplo es un reactor nuclear, -- que representa una potente fuente de neutrones, se somete un elemento al bombardeo de electrones y neutrones, el elemento de por sí estable puede ser convertido en un isótopo al absorber uno o varios neutrones.

Un elemento puede tener así varios isótopos que se diferencian por su peso atómico, el cual es el número de nucleones que constituyen el núcleo del átomo. Reciben el nombre de nucleones tanto los protones como los neutrones que componen el núcleo atómico.

Así, por ejemplo el cobalto tiene 27 protones (equivalentes también a $27 e^-$, dado que se equilibra la carga en el átomo) y 32 neutrones. Por lo mismo se denomina el elemento cobalto también $59/27 \text{ Co}$, donde 59 es el peso atómico. Si en este cobalto se absorbe un neutrón se obtiene entonces el isótopo $60/27$ y expresado de otra manera Cobalto 60.

b.- Radioisótopos

Un gran número de isótopos son radioactivos, por lo que

se les denomina radioisótopos, son por lo tanto radioactivos. Esta radioactividad está condicionada, lo mismo que en los elementos radioactivos naturales, por transformaciones nucleares que emiten al mismo tiempo una radiación ionizante. La radiación puede llevarse a cabo por :

- 1.- Emisión de partículas alfa (núcleos de helio)
- 2.- Emisión de partículas beta (por lo regular electrones del núcleo)
- 3.- Emisión de rayos gamma(cuántos gamma)

En los ensayos por irradiación de piezas suele utilizarse la radiación gamma, que es de la misma naturaleza que los rayos X, generada por el tubo Roentgen y que con frecuencia aparece al tiempo que la emisión de partículas beta.

Las longitudes de los rayos gamma, emitidos por los isótopos pueden ser distintas y estar comprendidas dentro de varios campos, por lo que un isótopo puede emitir varias, generalmente buen número de longitudes de onda, siendo de ordinario particularmente eficaz tan solo la fracción de onda corta. En los radioisótopos la longitud de onda oscila entre unos 4 \AA° y 0.05 \AA° . La caracterización de la eficacia de los de distintas longitudes de onda se hace basándose en la radiación generada por el tubo Roentgen de 1.7 MeV. La longitud de onda límite aparece en este caso en forma de una limitación que surge de modo inmediato en la gama de longitudes de onda generalmente extensa de la porción de onda corta, y depende de la tensión Roentgen.

c.- Periodo de vida media

Para formular un buen dictamen sobre la idoneidad técnica de un preparado radioactivo, además de la clasificación de las longitudes de onda de la radiación gamma emitida es muy importante la velocidad de desintegración.

En las diferentes materias radioactivas puede ser extraordinariamente distinta esta velocidad de desintegración, y no un proceso que se desarrolla en el núcleo del átomo. La velocidad de desintegración se expresa por el denominado periodo de vida media (HWZ), que por el que se entiende el tiempo en el que es desintegrado la mitad de los núcleos radioactivos. Este puede ser de varios millones de años, pero también de fracciones de segundos. Así, por ejemplo, el radio, elemento radioactivo natural

tal como se utiliza como preparado técnico, tiene un periodo de vida media de 1,580 años, mientras que el isótopo de cobalto, mucho más empleado, el cobalto 60; alcanza sino unos 5 años. A juzgar por esta afirmación, la intensidad de radiación del radio no habría de disminuir prácticamente nada, incluso en prolongados periodos de tiempo de servicio, mientras que un preparado de cobalto, tendría que ser sustituido al cabo de un tiempo determinado, -- puesto que sería antieconómico, a causa de la capacidad más reducida. Pero por otra parte se tiene la diferencia de precios.

Elemento	Radiación de los componentes más activos en MeV		Periodo de vida media aproximada	Capa de valor medio (en mm plomo)
Radio	1.7	0.6	1600 años	13
Radón	0.6		4 días	13
Mesotorio	1.7	0.6	26 años	14
Cobalto 60	1.33	1.17	5 años	13
Cesio 137	0.66		27 años	8.4
Iridio 192	0.47	0.30	74 días	2.8
Tulio 170	0.084		128 días	2

Como se desprende de esta relación, el más parecido a la longitud de onda de la radiación gamma, del tubo roentgen es el Iridio 192, como por ejemplo el tubo bipolar que se emplea para 1 ensayo de aceros de gran espesor de pared. La radiación emitida por el Iridio 192 corresponde por término medio a una longitud de onda del tubo roentgen que funciona con una tensión de unos 450 KV. Por consiguiente el Iridio 192 podría emplearse en aquellos casos que hasta ahora se venía utilizando el tubo roentgen, sin embargo su periodo de vida es muy corto. Por lo que se ha generalizado - el cobalto 60.

d.- Dispositivos Radiantes

Se guardan los preparados radioactivos en pequeños recipientes de paredes delgadas, de plata, latón o metal ligero, en

los que permanecen también durante el ensayo. Estas fundas no suponen ningún impedimento para que los rayos gamma emitidos, en tanto que quedan retenidas las partículas beta (lo mismo que las alfa). Estos recipientes de los que se desprenden constantemente los rayos gamma, tienen que estar dotados de una protección con-tra las radiaciones durante su transporte y conservación. Como material protector contra la radiación se emplean generalmente --plomo y a veces Wolframio. Dado que la intensidad de un elemento radioactivo disminuye con el cuadrado de la distancia, habrá que procurar que entre el personal de servicio y la fuente de la ra-diación exista una distancia no demasiado pequeña.

Las capas para el Cesio 137, Iridio 192 puede ser más delgada que con Cobalto 60.

e.- Recepción y reproducción de la radiación gamma

En el ensayo con rayos gamma, se emplea película fo-tográfica ó el tubo contador para efectuar el estudio de la pieza ensayada. Si se quiere realizar el examen en la pantalla, la in-tensidad de los rayos resulta demasiado pequeña para hacer una -valoración de los defectos sin hacer uso de un intensificador de pantalla, habría que emplear preparados isótopos muy potentes, que a su vez originarían grandes dificultades para poder cumplir con las necesarias condiciones de protección.

En el reconocimiento de los rayos gamma por ennegre-cimiento de la emulsión fotográfica, debe tenerse en cuenta que los rayos gamma emiten por lo general (ejemplo Co 60) una radiación de longitud de onda bastante más corta que la de los rayos pro-cedentes del tubo roentgen. Por lo tanto, los rayos gamma tie-nen mayor poder de penetración, son más duros.

Por esta razón en la silueta; sobre la película apa-rece ésta con menores contrastes ya que por ejemplo en un acero-moldeado en el que existen rechupes, los rayos atraviesan con fa-cilidad el material. La reducción de la intensidad de los rayos X a través del metal, con relación a los que atraviezan el lugar defectuoso, no es tan marcado como en el caso de los rayos X.

De todos los casos, aun puede conseguirse mejores contrastes em-pleando películas con mayor graduación de la emulsión fotográfica

Para materiales de gran espesor se recomienda el uso

de láminas de plomo como refuerzo.

En los rayos gamma, los tiempos de exposición se elevan en relación al tiempo normal de rayos X.

Estos pueden compensarse haciendo uso de radiación esférica del preparado, realizando varias fotografías a la vez.

La medición con el tubo contador se emplea con frecuencia en el ensayo con rayos gamma. La aplicación adecuada del método de reconocimiento se rige aquí también, no solo por la índole de la pieza y de los defectos a comprobar sino también por el elemento emisor.

Así, para pequeños espesores (20 mm de acero) se puede emplear un elemento radiante con componentes gamma de gran longitud de onda, como el Iridio 192, y en grandes espesores (80 mm. de acero), de pequeña longitud de onda como el Cobalto 60. En estos casos es importante que entre la fuente y el tubo contador se mantenga una distancia constante, para obtener buenos resultados de medida.