

769

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA.  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



APLICACION DE LOS RAYOS X EN LA  
INDUSTRIA COMO PRUEBA NO-DESTRUCTIVA

POR

ING. ALFONSO GONZALEZ ZAMBRANO

**T E S I S**

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON  
ESPECIALIDAD EN DISEÑO MECANICO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
A 5 DE DICIEMBRE DE 1995



1950  
14  
12

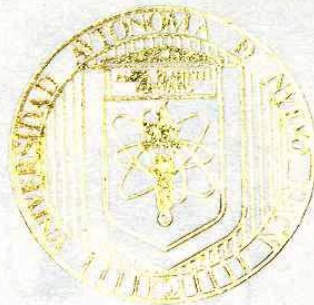
APLICACION DE LOS RAYOS X EN LA  
INDUSTRIA COMO FRUERA MODERNA  
ESTRUCTIVA



1080072463

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA.  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



APLICACION DE LOS RAYOS X EN LA  
INDUSTRIA COMO PRUEBA NO-DESTRUCTIVA

POR

ING. ALFONSO GONZALEZ ZAMERANO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON  
ESPECIALIDAD EN DISEÑO MECANICO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
A 5 DE DICIEMBRE DE 1985

20481  
G6



FONDO  
TESIS

(72463)



FONDO

TESIS MAESTRIA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



APLICACION DE LOS RAYOS X EN LA INDUSTRIA  
COMO PRUEBA NO-DESTRUCTIVA

POR

ING. ALFONSO GONZALEZ ZAMBRANO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN DISEÑO MECANICO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. A 5 DE DICIEMBRE DE 1995.



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **APLICACION DE LOS RAYOS X EN LA INDUSTRIA COMO PRUEBA NO-DESTRUCTIVA**, realizada por el **ING. ALFONSO GONZALEZ ZAMBRANO** sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la **INGENIERIA MECANICA** con especialidad en **DISEÑO MECANICO**.

El comité de Tesis



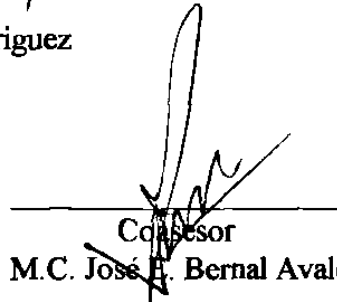
Asesor

M.C. José Estrada Rodríguez



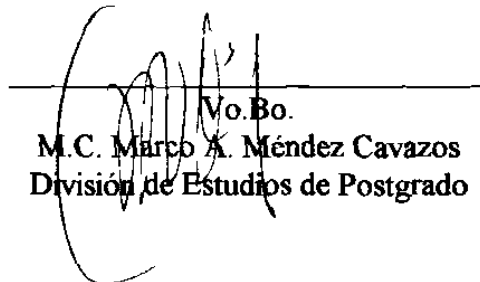
Coasesor

M.C. Heriberto Ruiz Caballero



Coasesor

M.C. José E. Bernal Avalos



Vo.Bo.

M.C. Marco A. Méndez Cavazos  
Division de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. a 5 de Diciembre de 1995.

## INDICE

	PAG.
PROLOGO .....	1
INTRODUCCION .....	2
SINTESIS .....	4
CAPITULO 1. RAYOS X. ....	6
1.1. Qué son los Rayos X. ....	6
1.2. Producción de Rayos X. ....	9
1.3. Tipos de Tubos de Rayos X. ....	10
1.4. Diseño del Tubo y Materiales. ....	13
1.5. Características de operación de Rayos X. ...	15
1.6. Limitaciones de Bulbos de Rayos X. ....	16
1.7. Fuentes de alta energía de Rayos X. ....	17
CAPITULO 2. INSPECCION RADIOGRAFICA. ....	20
2.1. Generalidades de la Radiografía . ....	20
2.2. Radiología. ....	21
2.3. Radiografía. ....	21
2.4. Aplicaciones de la Radiografía. ....	23
2.5. Limitaciones.....	26
2.6. Principios de la Radiografía. ....	29
2.7. Películas. ....	40
CAPITULO 3. RADIACIONES IONIZANTES. ....	45
3.1. Unidades: Roentgen, RAD, RBE, REM. ....	49
3.2. Efectos de la Radiación. ....	52
3.4. Clasificación de Aparatos de Medición. ....	55
3.5. Aparatos Monitores Personales. ....	56
3.6. Medidores de Detección de Radiación. ....	64
CAPITULO 4. PROTECCION DEL PERSONAL. ....	67
4.1. Medidas Protectoras contra la Radiación. ..	67
4.2. Tiempo de Exposición. ....	68



	PAG.
4.3. Distancia a la Fuente de Radiación. ....	68
4.4. Blindaje. ....	72
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>76</b>
<b>GLOSARIO. ....</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFIA. ....</b>	<b>79</b>

## PROLOGO

Una inspección abarca mucho más que medidas de dimensiones o un juicio visual de la apariencia del producto. Inevitablemente, hay algunas características vitales en la mayoría de las piezas manufacturadas, que no pueden ser medidas directamente. La mayoría de estas características vitales, afortunadamente pueden ser medidas indirectamente o pueden ser inferidas a través de las mediciones de algunas otras características.

A menudo, ciertas mediciones pueden ser hechas sin dañar la pieza, esto se conoce como prueba no destructiva.

Ciertos peligros, sin embargo deben ser enfrentados cuando evaluamos calidad por métodos indirectos, ya que las mediciones indirectas requieren interpretación, esto trae como consecuencia, errores del tipo de factor humano, estos errores generalmente no están presentes cuando la calidad es medida por métodos directos. También debe ser conocida la relación entre las características actuales empezando la medición y la calidad futura ya que ésta es importante para el servicio.

La inspección por pruebas no destructivas generalmente emplea procesos para hallar "defectos" en las piezas sin causar daños a las mismas. Aquí la palabra "defecto" significa incumplimiento en las características especificadas de la calidad.

## INTRODUCCION

El objetivo de esta tesis es poner a disposición del lector una enseñanza sobre los procedimientos y métodos de interpretación utilizando Ensayos no Destructivos (END), para la localización de defectos o fallas internas en los materiales.

La metodología que se utilizará en el desarrollo de la siguiente tesis será del tipo de investigación bibliográfica, se expondrán casos prácticos así como opiniones de personas intimamente relacionadas con las radiaciones ionizantes.

Los Ensayos no Destructivos (END) son un campo de la ingeniería que se desarrolla rápidamente. Las técnicas como la digitalización de imágenes, la radiografía por neutrones, el electromagnetismo o la emisión acústica, que eran desconocidas hasta hace pocos años, se han convertido en herramientas de uso cotidiano en las industrias que desean mantenerse en la vanguardia del mercado con sus productos. Los métodos que revisten mayor importancia para los fines de esta introducción son las pruebas e inspecciones que normalmente se practican a los materiales y se pueden dividir de la siguiente forma:

- Pruebas Destructivas
- Pruebas No Destructivas

**Pruebas Destructivas.**- Su objetivo principal es determinar cuantitativamente el valor de ciertas propiedades de los materiales, como resistencia mecánica, la tenacidad o la dureza. La ejecución de las pruebas destructivas involucra el daño del material, la destrucción de la probeta o la pieza empleada en la determinación correspondiente. Los ensayos destructivos son la aplicación de métodos físicos directos que alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas y mecánicas de un material, o componente sujeto a inspección.



**Pruebas No Destructivas.-** Son la aplicación de métodos físicos indirectos como es la trasmisión del sonido, la opacidad al paso de la radiación y que tienen la finalidad de verificar la sanidad de las piezas examinadas. No obstante, cuando se aplica este tipo de pruebas no se busca determinar las propiedades físicas de las piezas, sino verificar su homogeneidad y continuidad. Las pruebas no destructivas, como su nombre lo indica, no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material. Por ello no inutilizan las piezas que son sometidas a los ensayos.

De acuerdo a su aplicación las pruebas No Destructivas se dividen en:

- Técnicas de Inspección Volumétrica
- Técnicas de Inspección Superficial
- Técnicas de Inspección de la Integridad.

## **SINTESIS**

**CAPITULO 1.-** Se describe brevemente la forma en que se descubrieron los Rayos X, al igual que sus propiedades y aplicaciones. Se explica el funcionamiento de los tubos generadores de Rayos X, su clasificación en cuanto al tamaño del punto focal; además se analiza el diseño y construcción del tubo generador así como los materiales que se utilizan en su fabricación. Se exponen las principales características eléctricas de operación de los tubos de Rayos X. Finalmente, se mencionan las fuentes de alta energía que se utilizan en sustitución de las máquinas convencionales de Rayos X.

**CAPITULO 2.-** Se define que es Radiografía, se exponen las dos principales técnicas de inspección radiográfica, también se enumeran algunas características en su utilización. Además se hace un análisis de las principales aplicaciones de la radiografía en la industria al igual que sus limitaciones.

Se explican los fundamentos básicos de una radiografía, así como los factores que intervienen en la conversión de la radiación en una forma conveniente para su observación.

Se describen los conocimientos y cualidades que debe de tener el personal encargado de interpretar las radiografías.

**CAPITULO 3.-** Se definen las principales unidades utilizadas en la medición de las radiaciones ionizantes, al igual que los factores necesarios para calcular los efectos de la radiación.

Se establecen las condiciones y límites de exposición para aquellas personas que estén relacionadas o expuestas a las radiaciones ionizantes.

Se describen los efectos en seres humanos que normalmente están asociados con niveles de dosis de radiación para distintos períodos de tiempo.

Se hace una clasificación de los aparatos de medición en relación a su utilización, además se explica el funcionamiento de cada uno de ellos.

**CAPITULO 4.-** Se explican las formas básicas para proporcionar protección contra las radiaciones ionizantes. Se exponen ejemplos prácticos con la finalidad de calcular la razón de dosis, esto es, la cantidad de radiación por unidad de tiempo a la cual es sometida una persona. Se enumeran los principales materiales que se utilizan en la protección contra las radiaciones ionizantes. Se describen casos prácticos para encontrar el número de pantallas protectoras, así como su espesor, cuando se realizan operaciones radiográficas fuera de los cuartos blindados.

**CAPITULO 5.-** Se esboza un panorama general de lo que son las pruebas no destructivas en comparación con las pruebas destructivas, así como la complementación que hay entre unas y otras.

Se enuncian los criterios que deberán de regir en México con la finalidad de mejorar las Técnicas de Ensayos no Destructivos.



# CAPITULO I

## RAYOS X

### 1.1.- QUE SON LOS RAYOS X.

El universo está lleno de rayos de todas clases, los que mejor conocemos componen la luz visible, pero son solamente una forma de radiación, puesto que existen otras, como los rayos infrarrojos, las ondas de radio, los rayos ultravioleta, los rayos x y los rayos gamma.

Todos actúan de manera semejante, se desplazan a la misma velocidad, a unos 300,000 km. por segundo, y a diferencia de las ondas sonoras, se mueven a través del espacio vacío, no requieren un medio como aire, agua u otra manera, que los transporte.

La escala completa de las longitudes de onda de las radiaciones abarca un espacio o espectro sumamente amplio. En un extremo de ella se encuentran las ondas de radio por ser las de mayor longitud; en el otro están los rayos gamma, con la mas corta de todas. Entre unas y otras se sitúan los rayos infrarrojos, los ultravioleta los rayos x y en medio la luz visible.

La radiación se propaga en ondas cuya longitud va desde kilometro y medio hasta una milésima de Angstrom. Un Angstrom se abrevia Å y equivale a  $10^{-10}$  mts. ( $1 \text{ Å} = 10^{-10}$  mts). El hombre solo ve las que tienen una longitud de onda entre 7000 Å (rojo) hasta 4000 Å (violeta), esta es la escala de la luz visible. La banda de radiación inmediatamente inferior a la visible en el espectro es la

infrarroja, tiene una longitud de onda mayor que la roja, no se ve, sin embargo se siente, es caliente.

Al otro lado del espectro de la luz visible, inmediatamente mas alla del color violeta (ver tabla 1.1), se encuentra la radiación ultravioleta, que procede del sol y de lámparas especiales, su longitud de onda va desde 4000 Å hasta 50 Å ; los rayos ultravioleta tienen propiedades que les permiten pasar a través de sustancias que no pueden ser atravesadas por luz visible. La luz solar por ejemplo, no penetra a través de la piel de nuestro cuerpo; en cambio las ondas ultravioleta llegan hasta los nervios que se hallan debajo de la piel. En el espectro, mas allá de los ultravioleta, encontramos los rayos x, de longitud de onda entre 50 Å y 0.1 Å. La longitud de onda de los rayos x es 1000 veces más pequeña que la de los rayos ultravioleta. Son tan penetrantes que si se reciben en exceso, matan las células del cuerpo y llegan a producir la muerte.

NOMBRE	RANGO DE LONGITUD DE ONDA EN ANGSTROMS	FUENTE
RAYOS GAMMA	0.005 - 0.1	RADIOISOTOPOS
RAYOS X	0.1 - 50	EFACTO BREMSSTRAHLUNG
ULTRAVIOLETA	50 - 4000	TRANSICIONES ELECTRONICAS
VISIBLE	4000 - 7000	TRANSICIONES ELECTRONICAS
INFRARROJO	7000 - $3.5 \times 10^6$	VIBRACION DE MOLECULAS Y ATOMOS
HERTZIANAS CORTAS (TELEVISION Y RADAR)	$3.5 \times 10^6$ - $4 \times 10^{11}$	CIRCUITO ELECTRICO OSCILANTE
RADIO	$4 \times 10^{11}$ - $2 \times 10^{14}$	CIRCUITO ELECTRICO OSCILANTE
MICROPULSACIONES	$2 \times 10^{14}$ - $5 \times 10^{20}$	DESCONOCIDA

Tabla 1.1

Historia de los rayos X.- El profesor W. Roentgen (1845-1923) catedrático de la Universidad de Warzburg en Alemania, descubrió los rayos x en 1895. La trascendencia que desde esa época ha adquirido el estudio de los rayos x queda de manifiesto por el hecho de que seis hombres de ciencia han recibido el Premio Nobel por investigaciones en este campo, después de que el mismo profesor Roentgen haya sido honrado con el Premio Nobel de Física en 1901.

Roentgen se había interesado en los efectos que producen las descargas eléctricas en los tubos de Crookes. Estos son tubos provistos de electrodos en sus extremos en los cuales se ha eliminado casi todo el aire interior. Al hacer pasar una corriente eléctrica, que parte del polo negativo o cátodo, las radiaciones producen interesantes efectos de color dentro del tubo. En uno de sus experimentos Roentgen había cubierto totalmente el tubo con papel negro a fin de impedir la entrada de luz. Por mera casualidad a corta distancia del instrumento se hallaban algunos cristales de platino cianuro de bario, sustancia que tiene la propiedad de la fluorescencia, es decir, brilla cuando se le expone a la luz visible.

Al hacer pasar la descarga por el tubo, Roentgen notó con sorpresa que los cristales brillaban a pesar de que la luz visible era detenida por el papel negro, observó además que los objetos colocados entre el tubo y los cristales proyectaban sombras sobre éstos.

En este experimento se despedían un nuevo tipo de radiaciones de extraordinarias características, a las que denominó simplemente rayos x.

Roentgen continuó sus investigaciones empleando pantallas recubiertas con



platino cianuro de bario. Halló entonces que los rayos x pueden penetrar los tejidos musculares con toda facilidad, pero son parcialmente detenidos por los huesos y aún mas por los metales pesados.

Valiéndose de una placa fotográfica logró producir una silueta de los huesos de la mano, por otra parte descubrió que los rayos x diferían de un haz de partículas cargadas eléctricamente (electrones) ya que no se conseguía que desviarán su trayectoria sometiéndolos a la acción de un electro imán.

La naturaleza de los rayos X comenzó ha ser comprendida en 1912 cuando el Dr. Max Von Laue y sus colaboradores midieron por primera vez la longitud de onda de las nuevas radiaciones. Laue encontró que son en realidad una forma de radiación electromagnética, semejante a las ondas de radio y de la luz, pero que poseen una longitud de onda muchísimo menor que la de aquellos, la luz ordinaria tiene una longitud de onda comparable a 1/50 parte del grueso de una hoja de papel liviano, mientras que los rayos x se propagan en ondas de longitud de solo una diezmilésima parte de la de una onda de luz visible. Esta longitud tan reducida sitúa a los rayos x dentro de de las distancias interatómicas y explica el poder que aquellos tienen para penetrar a través de los cuerpos. Cuanto más pequeña sea la longitud de onda de una radiación, tanto mayor es su facilidad para atravesar la materia.

## 1.2 PRODUCCIÓN DE RAYOS X.

Cuando los rayos x son producto de una colisión, debido al rápido movimiento de los electrones un material como objetivo, dos clases de rayos x son

producidos. La primera clase de rayos x es generada cuando los electrones son rápidamente desacelerados durante las colisiones con los átomos en el objetivo. Esos rayos x contienen un ancho espectro de muchas longitudes de onda y son referidas como rayos x continuos o por la palabra alemana "Bremsstrahlung", la cual significa radiación de frenamiento. El segundo tipo de rayos x ocurre cuando la colisión de un electrón con un átomo del objetivo, causa una transición de un electrón orbital en el átomo y así de esta manera, el átomo queda en un estado excitado. Cuando los electrones orbitales en el átomo excitado se reordenan ellos mismos, los rayos x *son* emitidos, teniendo éstos una específica longitud de onda.

### 1.3.- TIPOS DE TUBOS DE RAYOS X.

Los tubos de rayos x son aparatos electrónicos que convierten la energía eléctrica en rayos x. Típicamente, un tubo de rayos x consiste de una ampolla de vidrio al vacío la cual contiene dos partes principales, el cátodo que esta formado por un filamento, un ánodo el cuál tiene incrustado un objetivo. Una fuente de bajo voltaje que normalmente es controlada por un reostato, genera la corriente eléctrica que calienta el filamento hasta la incandescencia. Esta incandescencia del filamento produce una nube de electrones, la cual es dirigida a el ánodo por un sistema de enfoque al mismo tiempo los electrones son acelerados por un alto voltaje entre ánodo y cátodo, (ver Fig. 1.2).

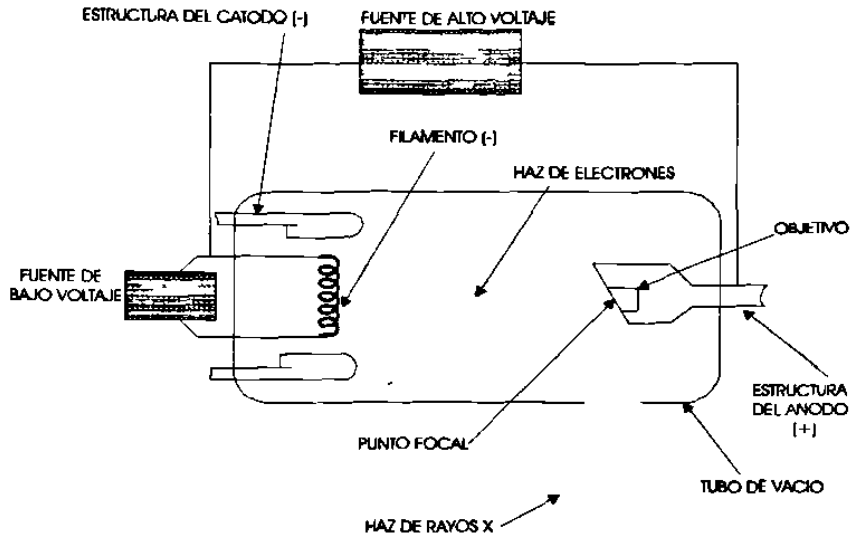


Fig. 1.2

Cuando los electrones acelerados chocan con el objetivo, los electrones son frenados bruscamente, esto trae como consecuencia que gran parte de la energía cinética que poseen los electrones se disipa en forma de calor, sin embargo una pequeña porción de energía es transformada en rayos x.

Debido al calor que debe ser disipado se imponen restricciones muy severas en el diseño y selección de los materiales para el ánodo y el objetivo. El calentamiento del ánodo también limita el tamaño del punto focal. El punto focal, fig 1.3, es la zona del blanco bombardeado por los electrones que vienen del cátodo, la forma y tamaño del punto focal están determinados por la forma y tamaño de la copa enfocadora del cátodo y por la longitud y diámetro del filamento.

El impacto de los electrones genera calor y rayos x, solo una pequeña parte de la energía es emitida desde el punto focal en forma de rayos x, la mayor

parte de la energía se disipa en forma de calor, el calor generado desde el punto focal debe de eliminarse de la forma más eficaz posible, para evitar que se funda el metal y se dañe el tubo.

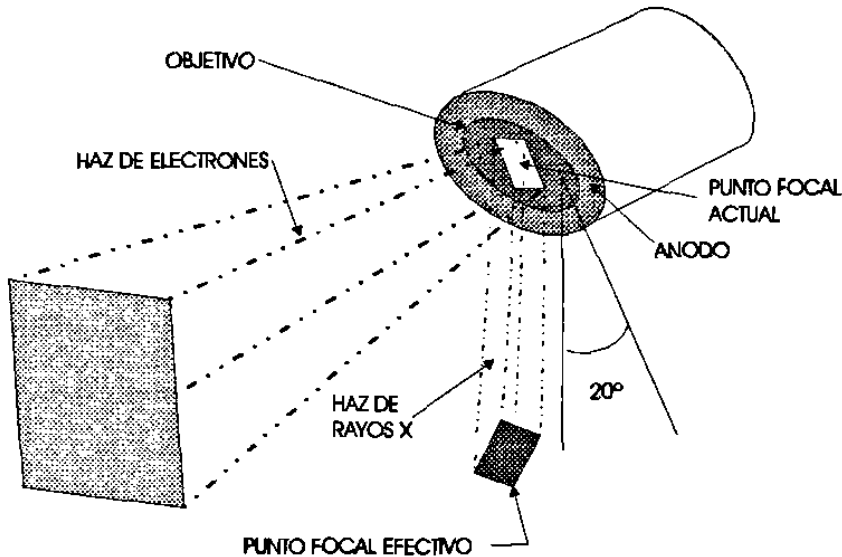


Fig. 1.3

Los fabricantes de tubos emplean varios métodos para enfriar el punto focal, el más sencillo es colocar en la parte posterior del blanco u objetivo un metal que sea un buen conductor de calor y extender el metal hacia afuera del tubo a manera de radiador; generalmente se usa el cobre como disipador. En algunos tubos se hace pasar agua o aceite para disipar el calor con más efectividad.

El efecto que el tamaño del punto focal ejerce sobre la calidad de los rayos x es muy importante, cuanto más pequeño es el punto focal mejor es el detalle de la imagen; pero como el punto focal grande tolera más el calor que el punto focal pequeño, hay necesidad de buscar métodos por los cuales se pueda obtener un punto focal de tamaño práctico y que al mismo tiempo produzca una buena imagen. El diseño del ánodo y el objetivo representa un reto entre la

máxima definición radiográfica y la máxima vida del objetivo.

Dependiendo en el tamaño del punto focal logrado, los tubos de rayos x son clasificados en tres grupos:

- Tubo de rayos x convencional con el tamaño del punto focal entre 2 mm por 2 mm hasta 5mm por 5 mm.
- Tubos de minienfoque con tamaño de punto focal en el rango entre 0.2 mm por 0.2 mm hasta 0.8 mm por 0.8 mm.
- Tubos de microenfoque con tamaño de punto focal en el rango de 0.005 mm por 0.005 mm hasta 0.05 mm por 0.05 mm.

#### 1.4.- DISEÑO DEL TUBO Y MATERIALES.

La estructura del cátodo en un tubo de rayos x convencional consta de un filamento y una taza de enfoque, la cual rodea al filamento. La taza de enfoque, es normalmente hecha de hierro puro o níquel puro, funciona como un lente electrostático que tiene el propósito de dirigir al electrón hacia el ánodo Fig 1.4.

El filamento es un carrete de alambre de tungsteno, este es calentado hasta llegar a la incandescencia debido a una corriente eléctrica que circula a través de él. La corriente es producida por un bajo voltaje. Ya incandescente, el filamento emite electrones, los cuales son acelerados a través del espacio evacuado entre el cátodo y el ánodo. La aceleración de los electrones

es producida por un alto voltaje entre el ánodo y el cátodo, el cual es aplicado durante la exposición.

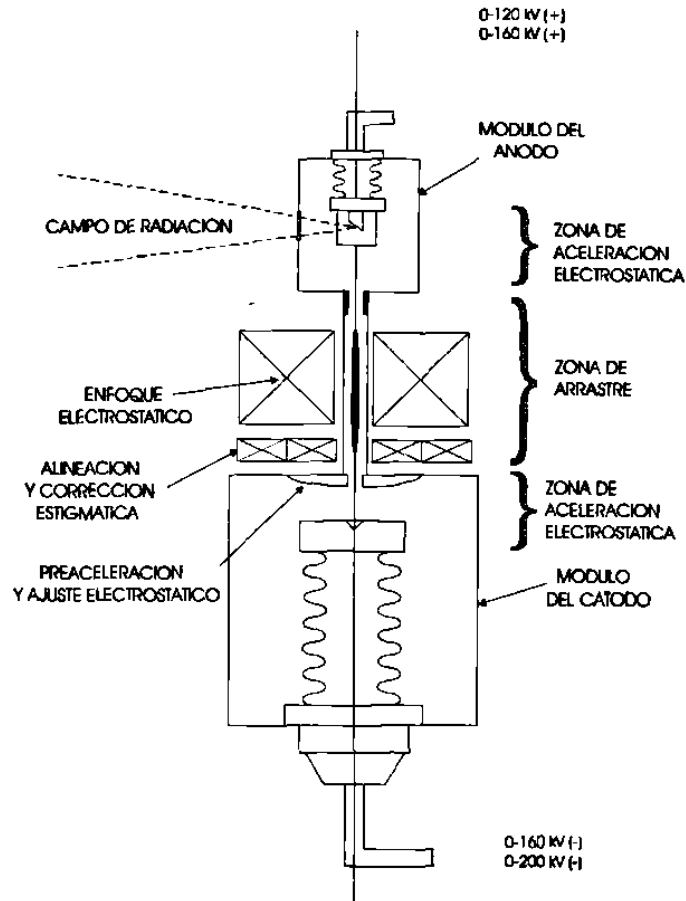


Fig. 1.4

El ánodo usualmente consiste de un botón llamado objetivo el cual está a su vez empotrado en una masa de cobre que absorbe gran parte del calor generado por las colisiones de los electrones con el objetivo.

El tungsteno es el material preferido para los tubos tradicionales de rayos x ya que su alto número atómico lo hace un eficiente emisor de rayos x, también su alto punto de fusión le permite resistir altas temperaturas de operación. Otros



materiales tales como oro y platino son también usados en los tubos de rayos x , solo que los objetivos hechos de este material deben ser enfriados de una manera más eficaz que los hechos de tungsteno. La mayoría de los tubos de alta energía de rayos x utilizan líquidos refrigerantes para disipar las grandes cantidades de calor generados durante la operación en el ánodo.

El bulbo debe de tener una fuerza estructural capaz de soportar altas temperaturas y además resistir los efectos combinados de fuerzas impuestas por la atmósfera presurizada en la cámara de vacío y el calor irradiado desde el ánodo. La forma del bulbo varía con el arreglo del cátodo, ánodo y con el voltaje máximo aplicado al bulbo. Las conexiones eléctricas para ánodo y cátodo son fundidas en las paredes del bulbo.

Los tubos de rayos x son introducidos en alojamientos metálicos que contienen un medio aislante ya sea un aceite transformador o gas aislante. El principal propósito de el medio aislante es proveer protección contra el choque de el alto voltaje eléctrico. El tubo de rayos x y el transformador de alta energía generalmente se encuentran dentro de unidades contenedoras las cuales la mayoría de las veces son portátiles.

## 1.5.- CARACTERISTICAS DE OPERACION DE LOS TUBOS DE RAYOS X

Hay tres importantes características eléctricas de los tubos de rayos x:

- La corriente que pasa a través del filamento, la cual regula la temperatura del filamento y controla la cantidad de electrones que son emitidos.

- El voltaje en el tubo, o potencial entre el ánodo y el cátodo, el cual controla la velocidad de choque de los electrones y por consiguiente la energía de penetración, del haz de rayos x..
- La corriente que pasa a través del tubo, la cual está directamente relacionada a la temperatura del filamento, y es usualmente referida como el miliamperaje de el tubo. La energía de la salida de los rayos- x es aproximadamente proporcional al miliamperaje, el cual es usado como una de la variables en los cálculos para decidir el tipo de exposición.

## 1.6 LIMITACIONES DE LOS BULBOS DE LOS RAYOS X.

Los bulbos de rayos x producen una gran cantidad de calor, un bulbo que funcione con un voltaje acelerador de 100,000 volts solo cerca del 1% de la energía eléctrica es convertida en rayos x ; el otro 99% se pierde en forma de calor. El calor es el factor que determina la mayoría de las limitaciones de diseño en el bulbo. El tamaño del punto focal y el diseño del ánodo son los principales factores que determinan la clasificación de un bulbo de rayos x. La clasificación de bulbo está limitada a una combinación máxima permitida de voltaje y corriente en el bulbo.

La mayoría de los bulbos industriales están clasificados para servicio continuo, funcionando al máximo de voltaje y corriente. Por lo general los bulbos se diseñan bajo la condición de que el producto de kilovolts y miliampares debe ser igual a 1500 w esto hará que no se exceda el calor límite en el ánodo. Por lo tanto el bulbo debe ser capaz de operar continuamente a 75 Kv. y 20 mA, 50 Kv

y 30 mA y así sucesivamente.

En ocasiones se requiere una radiación de baja energía (30 Kv), aquí la filtración por las paredes de vidrio del tubo de rayos x llega a ser un problema, cerca del 95% del haz de rayos x es absorbida por las paredes de vidrio de un tubo ordinario de rayos x, por lo cual en los tubos usados para radiografías de placas delgadas, generalmente se funde una ventana de berilio sobre la pared del vidrio en el camino del haz dentro del tubo.

El berilio uno de los metales más ligeros y es más transparente para los rayos x que cualquier otro metal.

### 1.7.-FUENTES DE ALTA ENERGIA DE RAYOS X

Arriba de 400 kV, el diseño convencional de un tubo de rayos x y su transformador de núcleo de acero de alto voltaje llega a ser mas complicado. Aunque las máquinas de rayos x con transformador de núcleo de acero han sido construídos para 600 kV (máximo), no hay versiones que operan arriba de 500 kV. Para generar rayos x de alta energía, generalmente son diseñadas máquinas específicas tales como:

- Aceleradores lineales.
- Betatrones.
- Generadores Van de Graaff.
- Tubos de rayos x con transformador resonante.

Los aceleradores lineales, producen electrones con altas velocidades por medio de energía de radio frecuencia acoplada a una guía de onda, estos han extendido la radiografía industrial a cerca de 25 MeV de energía fotónica. Los betatrones, aceleran los electrones por inducción magnética, son usados para producir rayos x de 20 a 30 MeV. Los aceleradores portátiles lineales y los betatrones son también usados en el campo de la inspección. La energía de los electrones de las unidades portátiles está en el orden de 1.5 MeV para aceleradores lineales portátiles y de 2 a 6 MeV para betatrones portátiles. Los generadores de Van de Graaff y los tubos de rayos x con transformadores resonantes son menos usados en la radiografía industrial. El generador de Van de Graaff es un aparato electrostático que opera desde 500 kV hasta cerca 6 MV. Los tubos de rayos x con transformador resonante fueron desarrollados en los años 40's y algunas unidades siguen en operación. La salida de esas unidades está limitada a cerca de 4000 keV (4 MeV) es la máxima energía fotónica que puede ser producida. Arriba de estas energías, la eficiencia de los transformadores resonantes empieza a decrecer.

En términos de capacidad de penetración, expresada en función del rango de grosor del acero, que puede ser inspeccionado, la tabla 1.2 compara las fuentes de alta energía con los tubos de rayos x convencionales, los máximos valores representan el grosor del acero que puede ser inspeccionado rutinariamente usando exposiciones de varios minutos de duración y con una película de media velocidad. Las secciones más gruesas pueden ser

inspeccionadas usando películas rápidas y grandes tiempos de exposición, pero la rutina de trabajo el uso de una alta energía de rayos x es más práctica.

MAXIMÓ POTENCIAL DE ACELERACION	RANGOS DE PENETRACION EN EL ACERO	
	mm	in
<b>Tubos de rayos x</b>		
150 kV.....	15 - 40	5/8 - 1 1/2
250 kV.....	40 - 65	1 1/2- 2 1/2
400 kV.....	65 - 90	2 1/2- 3 1/2
1000 kV.....	5 - 90	1/4 - 3 1/2
<b>Fuentes de alta energía</b>		
2.0 MeV.....	5 - 250	1/4 - 10
4.5 MeV.....	25 - 300	1 - 12
7.5 MeV.....	60 - 460	2 1/4 - 18
20 MeV.....	75 - 610	3 - 24

Tabla 1.2

## **CAPITULO 2**

### **INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA**

#### **2.1 GENERALIDADES DE LA RADIOGRAFIA.**

La radiografía aplicada a la industria e investigación, tiene cada día mayor aceptación como prueba irrefutable y su uso se ha generalizado enormemente en las industrias del petróleo, de la construcción, de la fundición, así como en la automovilística. La interpretación de las radiografías se facilita cuando se conocen debidamente los factores que pueden afectar su calidad como son marcas o defectos del manejo, proceso de revelado, el grado posible de contraste o detalle, tipo de película, la sensibilidad, la técnica y el equipo adecuado para tomarlas.

Las discontinuidades que no puede registrar una radiografía son aquellas que se localizan en un plano perpendicular al haz de radiación, las que por sus características angostas, aunque tengan profundidad, no estén paralelas al haz de radiación, y por último las que sus dimensiones sean menores que la sensibilidad de la radiografía.

Las técnicas radiográficas se basan en el conocimiento de los factores que necesariamente intervienen para realizarla y la práctica nos da la experiencia que nos permite resolver los diferentes problemas que se presentan.



## 2.2.- RADIOLOGÍA.

Es el término dado a los métodos de inspección de materiales, está basado en la absorción diferencial de la penetración de la radiación (radiación electromagnética de muy corta longitud de onda o radiación de partículas) por la pieza de prueba (objeto) que está siendo inspeccionada. Debido a las diferencias en la densidad y variaciones en el grosor de la pieza, son distintas en las características de absorción causadas por esas variaciones, por tanto, diferentes porciones en la pieza de prueba, absorben diferentes cantidades de radiación. Esas variaciones en la absorción de la radiación, pueden ser monitoreadas detectando la radiación no-absorbida que pasa a través de la pieza de prueba.

## 2.3.- RADIOGRAFÍA.

Este término comúnmente se refiere a los métodos radiológicos específicos que producen una imagen permanente en una película (radiografía convencional) o papel (radiografía en papel o xeroradiografía). En un sentido más amplio, sin embargo, radiografía puede también referirse a otras técnicas radiológicas que pueden producir, imágenes bidimensionales en un plano, debido a radiación no-absorbida. Recientemente la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, (ASTM), definió radioscopía como el término que describe las aplicaciones cuando no se usa la película o el papel y definió radiología como el término general que cubre ambas técnicas. Sin embargo, el término radioscopía no ha recibido una amplia aceptación todavía.

Aquí se considerarán dos técnicas de inspección radiográfica ya sea que se use rayos x o rayos gamma. Película ó radiografía en papel: Una imagen latente,

bidimensional debido a la radiación proyectada, es producida en una hoja fílmica ó papel que ha sido expuesto a la radiación no-absorbida que pasa a través de la pieza de prueba. Esta técnica requiere de un desarrollo subsecuente de la película expuesta ó papel (revelado) para que la imagen latente llegue a ser visible. Radiografía en tiempo real (también conocida como radioscopía): Una imagen bidimensional puede ser mostrada inmediatamente en una pantalla ó monitor de televisión. Esta técnica no involucra la creación de una imagen latente; en su lugar, la radiación no-absorbida es convertida en una señal óptica o electrónica, la cuál puede ser vista inmediatamente o puede ser procesada en un tiempo real con equipo cercano con un equipo electrónico y de video.

La principal ventaja de la radiografía de tiempo real sobre la película radiográfica, es la oportunidad de manipular la pieza de prueba durante la inspección radiográfica. Esta capacidad permite inspeccionar mecanismos internos y realzar la detección de grietas y defectos, además, manipulando la pieza se logra una mejor orientación de los defectos. También, la manipulación de la pieza en la radiografía de tiempo real simplifica la imagen dinámica en tres dimensiones y determina la localización de los defectos y su tamaño. Con la radiografía en película, sin embargo, la posición de los defectos dentro del volumen de la pieza de prueba no puede ser determinada exactamente con una sola radiografía; la profundidad paralela al rayo no es grabada. Consecuentemente, otras técnicas en película, como stereoradiografía, triangulación, o simplemente haciendo dos ó más exposiciones fílmicas (dirigiendo la radiación sobre la pieza de prueba desde diferentes ángulos para

cada exposición), debe ser usada para localizar defectos más exactamente dentro del volumen de la pieza de prueba.

Otra importante técnica radiológica con la detección resaltada de los defectos y gran capacidad de localización, es la tomografía computarizada. Diferente de la radiografía en película en tiempo real, la tomografía computarizada (TC) implica la generación de vistas seccionales cruzadas en lugar de la proyección plana. La imagen de la tomografía computarizada es comparable con la obtenida al hacer una radiografía de la porción física plana de un objeto seccionado. Esta imagen seccional cruzada no es obscurecida demasiado por las estructuras ocultas y es altamente sensitiva a las pequeñas diferencias en densidad relativa. Además, las imágenes de la tomografía computarizada son más fáciles de interpretar que las radiografías.

Otras formas de radiación incluyen las partículas subatómicas que son generadas durante la desintegración nuclear. Las partículas subatómicas más conocidas son las partículas alfa ( $\alpha$ ), las partículas beta ( $\beta$ ), y los neutrones. Las partículas beta ( $\beta$ ) y los neutrones son suficientemente penetrantes para ser usados en las radiografías, sin embargo los neutrones son más empleados.

#### 2.4.- APLICACIONES DE LA RADIOGRAFIA.

La radiografía es usada para detectar las características de un componente o ensamblaje que tenga una diferencia en el grosor o en la densidad física comparado con el material circundante. Las grandes diferencias son más fáciles de detectar que las pequeñas. En general, la radiografía puede detectar solo

aquellas características que tienen un grosor apreciable en la dirección paralela a la radiación. Esto significa que la capacidad del proceso para detectar las discontinuidades en un plano, como las grietas, depende de la orientación propia de la pieza de prueba durante la inspección. Las discontinuidades como burbujas e inclusiones, las cuales tienen un grosor medible en todas direcciones, pueden ser detectadas, mientras que aquellas que sean más pequeñas que su espesor no podrán ser detectadas.

Aunque no está limitada la detección de fallas internas, la radiografía y el ultrasonido son dos métodos de inspección no-destructivos que pueden determinar satisfactoriamente las fallas que son completamente internas y estén bien localizadas bajo la superficie de la pieza examinada. En comparación con otros métodos no destructivos, la radiografía tiene tres principales ventajas:

- La capacidad para detectar fallas internas.
- La capacidad para detectar variaciones significativas en la composición del material.
- Grabado permanente de los datos de la inspección original.

La inspección radiográfica es usada extensivamente en pruebas, particularmente cuando hay una extrema necesidad de asegurar la existencia de fallas internas. Por ejemplo, puede ser usada en la inspección de piezas fundidas de paredes anchas, en las soldaduras de equipos generadores de vapor (calderas, componentes de turbinas, etc.) así como en otros sistemas de alta presión, la radiografía puede ser usada en forjas y en ensamblajes mecánicos, en ocasiones la radiografía de ensamblajes mecánicos está limitada debido a la

condición, a la colocación de los componentes o al nivel del líquido de relleno en los sistemas sellados, sin embargo algunas piezas especiales es mas conveniente inspeccionarlas por radiografía que por otros métodos. Por ejemplo, la radiografía es muy usada en la inspección de dispositivos semiconductores (transistores, diodos, etc.) con la finalidad de localizar burbujas e inclusiones. La radiografía es también usada para buscar grietas, cables rotos, materiales para uso exterior, y elementos mal colocados o mal alineados. La alta resolución de la imagen tiempo real con microenfoco en la fuente de rayos x, ha hecho posible usar la radiografía como una herramienta de análisis para semiconductores y otros componentes electrónicos. Las imágenes de tiempo real permiten el análisis de una variedad de ángulos, mientras el microenfoco añade la capacidad de detectar las fallas tan pequeñas como 0.025mm (0.001 in) en la mayor dimensión. En todas las aplicaciones, la sensibilidad es maximizada con el uso de radiación de alta intensidad y baja energía.

La sensibilidad de la radiografía de rayos x y rayos gamma para varios tipos de defectos depende de muchos factores, incluyendo el tipo de material, el tipo de falla, y la forma del producto; el tipo de material es expresado en término de número atómico por ejemplo los metales que tienen bajo número atómico están clasificados como metales ligeros, y aquellos que tienen un número atómico grande, se le llaman metales pesados. La tabla 2.1 indica el grado general de conveniencia de los tres principales métodos radiográficos para la detección de discontinuidades en metales ligeros y pesados. La radiografía puede ser usada para inspeccionar la mayoría de los materiales sólidos, con la posible excepción

de los materiales que tienen muy alta o muy baja densidad, (la radiografía de neutrones, puede ser usada en tales casos). Las aleaciones, ferrosas y no-ferrosas, pueden ser radiografiadas al igual que los materiales y compuestos no-metálicos. Hay una amplia gama en el grosor del material que puede ser inspeccionado y en las técnicas que pueden ser usadas.

Numerosas técnicas especiales y aparatos especiales han sido desarrollados para la aplicación de la radiografía en problemas de inspección específicos, incluso para la inspección de materiales radioactivos.

En algunos casos, la radiografía no puede ser usada aunque parezca conveniente hacerlo, esto es debido a que la pieza es accesible desde un solo lado.

La radiografía típicamente involucra la transmisión de radiación a través de la pieza de prueba, en la mayoría de los casos, el lado de la pieza debe ser accesible. Sin embargo, la inspección radiográfica y radiométrica pueden ser ejecutadas con la dispersión Compton, en la cual los fotones dispersados son usados para obtener la imagen. Con la dispersión Compton, la inspección puede ser ejecutada cuando un solo lado es accesible.

Otro método para inspeccionar una región teniendo un lado inaccesible es usar una sonda con un tubo de rayos x con microenfoque.

## 2.5.- LIMITACIONES.

Comparado con otros métodos no-destructivos de inspección, la radiografía es un método caro. Por lo regular se requiere de un gran capital, de un local grande para el laboratorio radiográfico, aunado al hecho de que los costos de operación



INSPECCION	CONVENIENCIA PARA LOS METALES LIGEROS			CONVENIENCIA PARA LOS METALES PESADOS		
	PELICULA CON RAYOS X	RADIOGRAFIA DE TIEMPO REAL	PELICULA CON RAYOS GAMMA	PELICULA CON RAYOS X	RADIOGRAFIA DE TIEMPO REAL	PELICULA CON RAYOS GAMMA
<b>GENERAL</b>						
GRIETAS SUPERFICIALES (b)	F(c)	F	F(c)	F(c)	F	F(c)
GRIETAS INTERNAS	F(c)	F	F(c)	F(c)	F	F(c)
BURBUJAS O INCLUSIONES	G	G	G	G	G	G
GROSOR	F	G	F	F	G	F
VARIACIONES METALURGICAS	F	F	F	F	F	F
<b>PLACAS PLANAS</b>						
GROSOR	G(d)	G	G(d)	G(d)	G	G(d)
LAMINACIONES	U	U	U	U	U	U
BURBUJAS O INCLUSIONES	G	G	G	G	G	G
<b>HIERRO VACIADO</b>						
GRIETAS SUPERFICIALES	F(c)	F	F(c)	F(c)	F	F(c)
CONTRACCION INTERNA	G	G	G	G	G	G
BURBUJAS, INCLUSIONES, POROS	G	G	G	G	G	G
CORRIMIENTO DEL NUCLEO	G	G	G	G	G	G
<b>SOLDADURAS</b>						
CONTRACCIONES AGRIETADAS	G(c)	G	G(c)	G(c)	G	G(c)
INCLUSIONES DE ESCORIA	G	G	G	G	G	G
FUSION INCOMPLETA	G	G	G	G	G	G
POROS	G	G	G	G	G	G
PENETRACION INCOMPLETA	G	G	G	G	G	G

(a) G, buena, F, regular, P, pobre, U, insatisfactoria. (B) Incluye solo fallas visibles. (a) el haz de radiación debe de estar paralelamente a las grietas, a las depresiones, o a la falla.

Tabla 2.1

pueden ser altos, ya que, en algunos casos, el 60% del tiempo total de la inspección es usado en el montaje de la radiografía. Sin embargo, los costos pueden ser relativamente bajos cuando se utilizan unidades portátiles, debido a que, el espacio que se requiere es solo para el procesamiento de la película y la interpretación de los datos. Otra opción es la radiografía de tiempo real, en ella los costos de operación son generalmente muy bajos, esto porque el tiempo de preparación es mucho menor y no hay costos extras por procesamiento e interpretación de la película.

La inspección de campo de una sección gruesa puede ser un proceso que consume mucho tiempo porque la radiación efectiva de salida de la fuente portátil puede requerir de un tiempo de exposición más prolongado de la película radiográfica. Las fuentes radiactivas (rayos gamma) están limitadas en su salida primaria porque la alta actividad de la fuente implica que el personal deba llevar consigo una gran protección.

La baja salida de la fuente portátil de rayos x puede también limitar la inspección de campo de las secciones gruesas. El tubo portátil de rayos x emite relativamente baja energía de radiación (300 keV) y está limitado en la radiación de salida. Ambas características se combinan para limitar su aplicación en la inspección radiográfica.

Ciertas clases de defectos son difíciles de detectar con la radiografía. Como anteriormente mencionamos, las grietas no pueden ser detectadas a menos que estén paralelas a la radiación. Las grietas pequeñas en secciones gruesas pueden no ser detectadas en su totalidad, incluso con una buena orientación. Las discontinuidades como inclusiones en materiales forjados, hojuelas,

microporosidad y microfisuras pueden no ser detectadas a menos que haya suficientemente segregado para producir un efecto detectable. Por lo general se piensa que por el hecho de radiografiar una pieza, no habrá ningún defecto en ella que no haya sido detectado. Así como también se puede dar el caso, en el cual el radiólogo sea demasiado escéptico y al ver cualquier marca en la radiografía solicite que sea desechada la pieza.

En ambos casos la radiografía ha sido interpretada equivocadamente, ya que no en todos los casos la radiografía registra el 100% de los defectos y, por otro lado, la radiografía puede tener defectos de proceso o revelado que nada tienen que ver con defectos en la pieza. Para interpretar una radiografía de la mejor forma posible es necesario conocer debidamente los factores que pueden afectar su calidad, tales como, marcas o defectos ya sea por el proceso, o por el revelado, fallas en el contraste o en el detalle y por último fallas en la película.

## 2.6.- PRINCIPIOS DE LA RADIOGRAFÍA.

Tres son los elementos básicos en una radiografía:

- I.- Una fuente de radiación.
- II.- La pieza de prueba o el objeto que se está evaluando.
- III.- Material sensitivo.

Estos elementos son mostrados en la fig. 2.1. La pieza de prueba en la fig. 2.1 es una placa de grosor uniforme que contiene un defecto o una falla interna que provoca diferentes características de absorción de la falla en el material circundante. La radiación de la fuente es absorbida por la pieza de prueba y como la radiación pasa a través de ella; la falla y el material circundante absorben

diferentes cantidades de radiación. Así, de esta manera, la intensidad de la radiación hace una impresión en un material sensible en el área debajo de la falla y es diferente de la cantidad de la que incide en las áreas adyacentes. Esto produce una imagen, o sombra, de la falla en el material sensitivo.

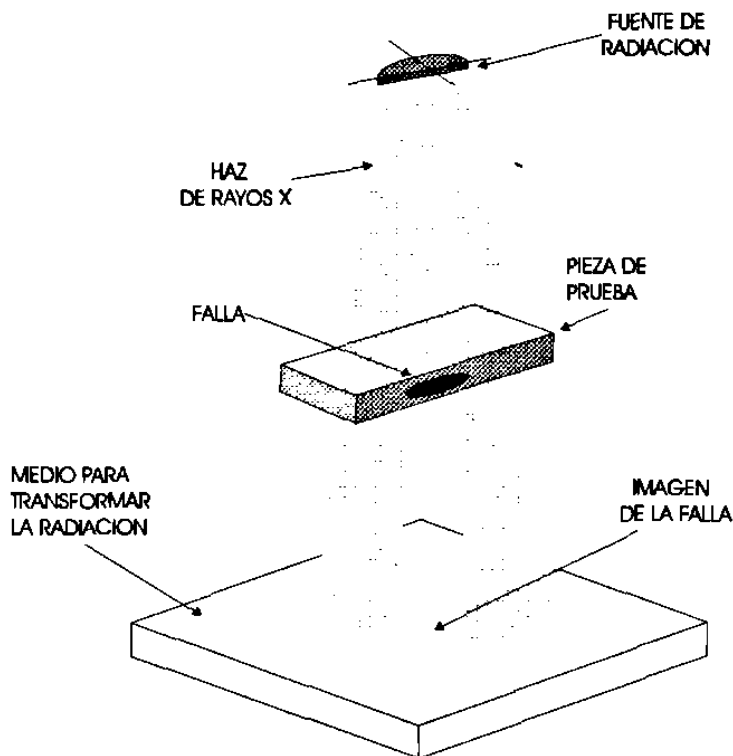


Fig. 2.1

**Fuentes De Radiación.-** Dos clases de radiación electromagnética son usadas en la inspección radiográfica :rayos x y rayos gamma. Los rayos x y los rayos gamma difieren de otras radiaciones electromagnéticas ( luz visible, microondas y ondas de radio) solo en sus longitudes de onda. Unicamente los rayos x y los rayos gamma, tienen la capacidad de penetrar materiales opacos para revelar fallas internas, esto es debido a que tienen una longitud de onda muy pequeña. Los rayos x y los rayos gamma son físicamente indistinguibles; ellos difieren solo

en la manera en que son producidos. Los rayos x resultan de una interacción entre el rápido movimiento de un haz de electrones y los átomos en el objetivo sólido, mientras que los rayos gamma son emitidos durante la desintegración radioactiva de un núcleo atómico inestable.

**Conversión de Imágen.-** El más importante proceso en la radiografía es la conversión de la radiación en una forma conveniente para la observación. Esta conversión es realizada por medio de grabado (usualmente película) o por medio de una imágen de tiempo real (tal como pantallas fluorescentes o cristales de centelleo). El proceso de la imágen puede también ser apoyado con el uso de pantalla de intensificación o filtración, las cuales, intensifican el proceso de conversión o el filtrado de la radiación esparcida.

**Registro de la Media.-** Provee una imágen permanente relacionando las variaciones en la intensidad de la radiación no-absorbida y el tiempo de la exposición. Con un medio de grabado como la película, por ejemplo, una imágen latente invisible es formada en las áreas expuestas a la radiación. Esas áreas expuestas a la radiación llegan a ser oscuras cuando la película es procesada (esto es, desarrollada, enjuagada, arreglada, lavada, y secada), el grado de oscurecimiento (la densidad fotográfica) depende de la cantidad de exposición a la radiación. La película luego es puesta en una pantalla iluminada, así pues, la imágen formada por las variaciones en la densidad fotográfica puede ser examinada e interpretada.

**Imágen Media de Tiempo Real.-** Provee una indicación inmediata de la intensidad de la radiación pasando a través de la pieza de prueba. Con las pantallas fluorescentes, por ejemplo, la luz visible es emitida con un brillo que es

proporcional a la intensidad de la radiación incidente (ya sea rayos x o rayos gamma). Esta luz emitida puede ser observada directamente, amplificada, y/o convertida en una señal de video para ser presentada en un monitor de televisión o para ser grabada.

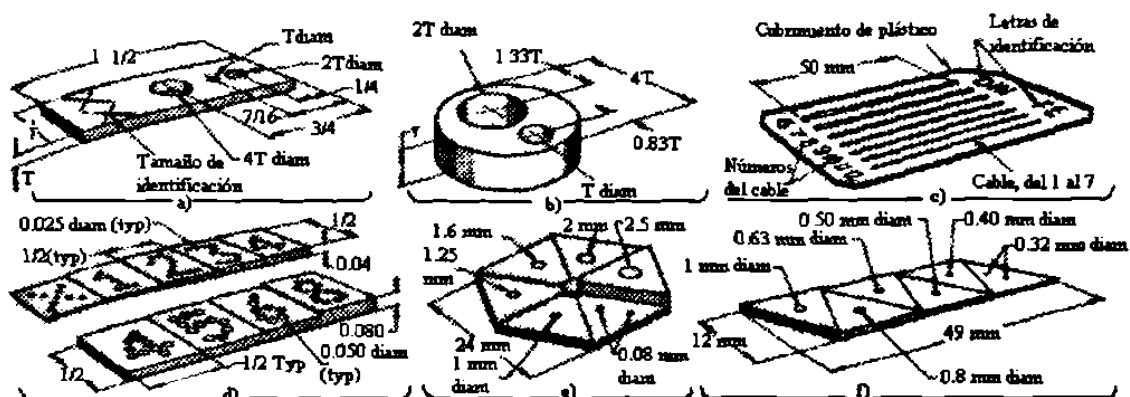
**Pantallas de Intensificación o Filtración.-** Son usadas para mejorar el contraste de la imagen, particularmente cuando la intensidad de la radiación es baja o cuando la energía de la radiación es alta. Las pantallas son útiles en las energías más altas porque la sensibilidad en las películas y pantallas fluorescentes decrece cuando la energía de la radiación de penetración se incrementa.

**Calidad de Imagen.-** La calidad de las radiografías depende de muchas variables, una forma de medir la calidad de la imagen es con indicadores, conocidos como penetrómetros cuya imagen deberá verse en la radiografía.

**El Penetrómetro.-** Es una tira rectangular de material radiográficamente similar al del material bajo prueba y su espesor es una proporción definida generalmente 2% a 4% del espesor del material bajo prueba.

En la figura 2.2 se muestran algunos penetrómetros estandars indicados por las normas (ASTM-ASME), (DIN 54109), (BWRA) y (AFNOR) que deberán emplearse en inspecciones radiográficas específicas. La técnica radiográfica podrá considerarse satisfactoria si los agujeros y el contorno del penetrómetro son mostrados claramente en la radiografía, esto significa que el proceso radiográfico ha sido capaz de mostrar una variación de 2% del espesor del material bajo inspección. Por ejemplo, si en la radiografía se muestra la estructura y los detalles el penetrómetro de 2%, se dice que la sensibilidad es de 2%, y es considerada

como satisfactoria.



a) Penetrómetro de placa rectangular para placas con grosores de 0.13 mm a 1.3 mm. b)

Penetrómetro de placa circular para placas con grosores de 4.6 mm o más. c) Típico penetrómetro

de cable. d) Penetrómetro de escalon cuadrado. e) Hexagonal y f)

Fig. 2.2

Deberá tenerse en cuenta que aún cuando un agujero del penetrómetro es visible en una radiografía, una cavidad del mismo diámetro y profundidad dentro del material bajo inspección podrá ser invisible, debido a que los agujeros del penetrómetro tienen un cambio de sección brusco, mientras que una cavidad natural tiene un cambio de sección gradual, por lo tanto la imagen del agujero del penetrómetro será vista más fácilmente que la imagen de la cavidad natural.

Similarmente una rotura fina puede ser de considerable longitud, pero si los rayos-X pasan perpendiculares al plano de la rotura su imagen en la radiografía será invisible, por la muy gradual transición de la densidad.

Por lo tanto, el penetrómetro se usa para indicar la calidad de la técnica radiográfica y no como una forma de medir la profundidad de las cavidades o

discontinuidades que pueden ser registradas.

**Sensitividad Radiográfica.-** Esta debe distinguirse de la calidad de la imagen, generalmente se refiere al tamaño de los más pequeños detalles que pueden ser detectados. Aunque la sensitividad radiográfica, frecuentemente es sinónimo de calidad de imagen en aplicaciones que requieren la detección de pequeños detalles, debe hacerse una distinción entre ambas. La sensitividad se refiere más a la resolución en los detalles, la cual debe distinguirse de la resolución espacial y de la resolución de contraste. Por ejemplo, si la densidad de un objeto es muy diferente de la densidad circundante, la falla puede ser resuelta a causa del gran contraste, incluso si la falla es más pequeña que la resolución espacial del sistema. Por otro lado, cuando el contraste es pequeño el área debe ser grande para lograr una mayor resolución.

**Contraste Radiográfico.-** En una radiografía, las diversas intensidades de radiación que ha dejado pasar un material bajo inspección son transformados en imágenes de diferentes densidades (más o menos oscuras, según sea la intensidad de radiación que las produce). La diferencia en la densidad de la película de un área a otra constituye el contraste radiográfico. Cualquier sombra o detalle dentro de la imagen es visible a causa del contraste entre éste y el área que le rodea. Dentro de límites razonables, a mayor contraste o diferencia de densidad en la radiografía, más definidos serán los detalles a la vista y por tanto los defectos más finos podrán ser vistos.

Sin embargo, si el contraste se incrementa demasiado, habrá una pérdida de visibilidad de detalles en las densidades más altas y más bajas de la radiografía. El contraste radiográfico es resultado del rango de la intensidad de radiación que



permitió pasar el material bajo inspección.

Una placa plana de material homogéneo y espesor uniforme tendrá muy poco o nulo contraste, en cambio un material con grandes variaciones en su espesor, transmitirá o dejará pasar un amplio rango de intensidades de radiación y producirá un alto contraste. De un material bajo inspección se podrá obtener un contraste alto si la radiación es poco penetrante o sea de bajo kilovoltaje.

En general el uso de radiación de bajo kilovoltaje en la inspección radiográfica dará por resultado radiografías de alto contraste y alta sensibilidad.

En la inspección radiográfica de materiales de espesor aproximadamente uniforme, como es el caso de la soldadura en paredes de igual o aproximadamente igual espesor, el rango de intensidades de radiación transmitido será pequeño, por lo cual se deberá usar una técnica que produzca un alto contraste radiográfico, satisfactorio para obtener todos los informes requeridos del área de interés, o sea el área donde se localiza la soldadura y la sensibilidad radiográfica será mucho mayor que la que se obtendría con una técnica que proporcione bajo contraste.

## DEFINICIÓN RADIOGRÁFICA.

La imagen formada en una radiografía es parecida a la sombra proyectada en una pantalla por un objeto opaco colocado en un rayo de luz. Aunque la radiación usada en radiografía penetra los cuerpos opacos mientras que la luz no, los principios geométricos en la formación de sombras son básicamente los mismos. Los rayos x, rayos gamma así como la luz viajan en línea recta, esta propagación

es la que permite la formación de sombras delineadas. Las relaciones geométricas entre fuente, objeto y pantalla determinan las tres principales características en la formación de las sombras y que són: el grado de alargamiento de la imagen, la distorsión de la imagen y la no-delineación de la imagen.

**Alargamiento.-** La sombra del objeto de prueba está siempre más alejado de la fuente que el objeto mismo. Por lo tanto para una fuente punto fig. 2.3 (a) las dimensiones de la sombra son siempre más grandes que las dimensiones correspondientes del objeto. Matemáticamente el tamaño de la imagen o grado de alargamiento puede ser calculado por la relación:

$$M = Si / So = Li / Lo$$

donde M es el grado de alargamiento, Si es el tamaño de la imagen, So es el tamaño del objeto, Li es la distancia de la fuente a la película radiográfica y Lo es la distancia de la fuente al objeto.

Cambiar la posición de un objeto dado con respecto a la fuente y a la superficie de grabación afectará el tamaño de la imagen. Por ejemplo, si reducimos la distancia de la fuente a la película (Li) y no cambiamos la distancia del objeto a la película (Lo), el tamaño de la imagen Si será aumentada. Por el contrario cuando aumentamos la distancia de la fuente al objeto (Lo) sin cambiar la distancia de la fuente a la película (Li), el tamaño de la imagen es reducido.

**DISTORSION.-** Cuando el plano del objeto de prueba y el plano de la superficie de impresión (película) son paralelos entre sí la imagen no será distorsionada

independientemente del ángulo con el cuál el haz de radiación choque con el objeto. Por lo tanto, el grado de aumento de diferentes puntos para una imagen dada será constante ya que la relación  $L_i / L_o$  no cambia. Sin embargo como lo muestra la figura 2.3 (b) si el plano del objeto y el plano de la superficie de grabación no son paralelos, la imagen será distorsionada, el grado de distorsión es directamente proporcional al grado de no paralelismo; pequeños aumentos en el no paralelismo producen pequeños grados de distorsión, así como aumentos grandes producen grandes grados de distorsión.

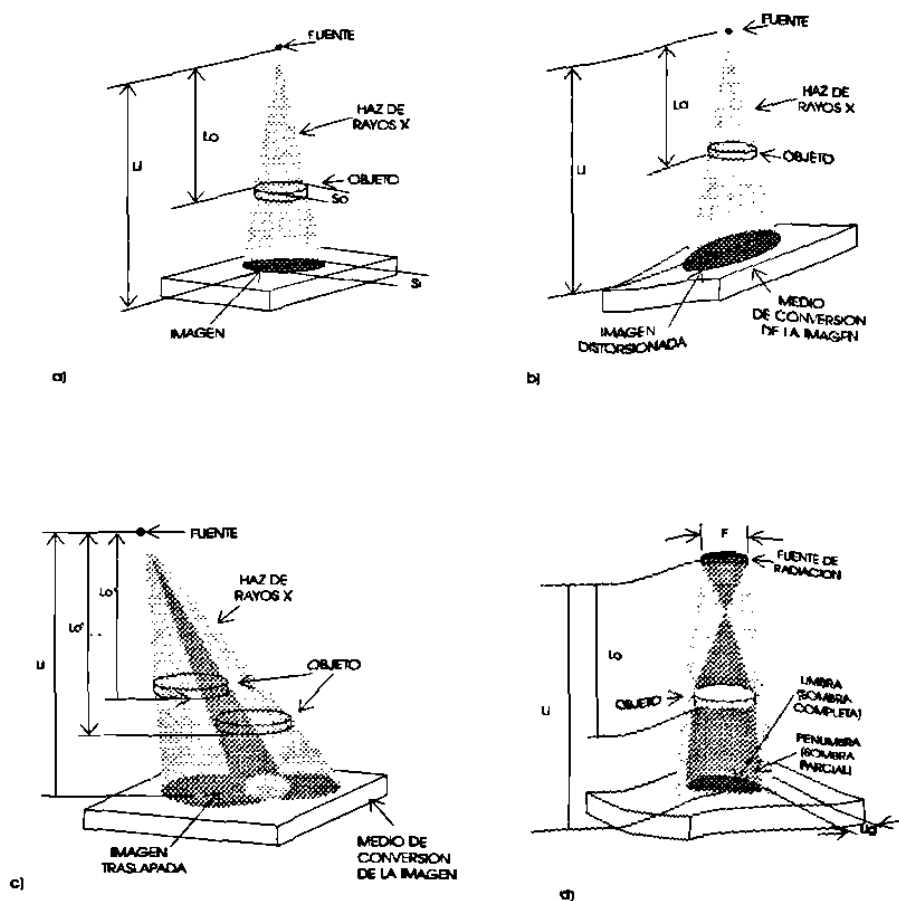


Fig. 2.3

**PRINCIPIOS DE LA NO-NITIDEZ.-** En realidad cualquier fuente de radiación es muy grande para ser considerada como un punto. La definición radiográfica varía de acuerdo con los principios geométricos entre el tamaño de la fuente, la distancia entre la fuente y el objeto, la distancia entre la película y el objeto. Cuando la radiación de una fuente de cualquier tamaño produce una sombra, la porción de la imagen que está en la sombra se conoce con el nombre de umbra, sin embargo hay ocasiones que se forman sombras parciales en algunas regiones de la sombra principal (umbra) se conoce con el nombre de penumbra. Matemáticamente la no-nitidez geométrica ( $V_g$ ) se determina por relación de triángulos semejantes como lo muestra la fig.2.3(d) y puede ser expresada como:

$$V_g = (Ft) / L_o$$

donde  $F$  es el tamaño del punto focal,  $t$  es la distancia entre la película y el objeto,  $L_o$  es la distancia entre la fuente y el objeto.

El tamaño de la penumbra puede ser reducido aumentando la distancia entre la fuente y el objeto, reduciendo el tamaño del punto focal o reduciendo la distancia entre el objeto y la película. En la práctica, el tamaño de la fuente es determinada por las características del tubo de rayos x empleado o por las dimensiones físicas de la pastilla radiactiva. La distancia entre la película y el objeto debe ser minimizado, esto se logra colocando la película tan cerca como sea posible de la pieza de prueba.

En resumen, la definición de la imagen depende primordialmente de los principios geométricos que gobiernan la formación de la imagen de los defectos en la radiografía. Es importante por lo tanto verificar que esos principios que a continuación exponemos sean observados durante la exposición de una

radiografía para obtener la máxima definición.

Los principios son aplicables tanto al sistema de rayos-X como al de rayos gamma.

- Los rayos deberán proceder de un punto focal pequeño, ya que la definición o delineación de los detalles en la radiografía es función de la relación entre el tamaño del foco, la distancia del mismo al defecto y la distancia de este último a la película. Un tamaño de foco grande no permite la delineación de muchos detalles lo mismo sucede con un foco pequeño. Si la distancia de la fuente de radiación a la película es bastante grande, podrá ayudar a mostrar algunos detalles cuando se emplea un foco de gran tamaño, sin embargo es más ventajoso el uso de un punto focal lo más pequeño permisible para la exposición requerida.
- La película deberá ser colocada tan próxima como sea posible al material que se esté radiografiando. En la práctica el chasis con la película dentro es colocado en contacto con el material.
- La radiación central o principal deberá ser perpendicular a la película o la más aproximado posible a esa posición.

La distancia entre la fuente de radiación y el material bajo examen deberá ser tan grande como sea práctico para obtener buena definición. En la práctica una relación de 10:1 entre la distancia de la fuente de radiación a la película y la distancia entre la película a la superficie del material bajo inspección más próxima a la fuente de radiación es a menudo la adecuada. La figura 2.4 indica las distancias mencionadas y la relación entre ellas:

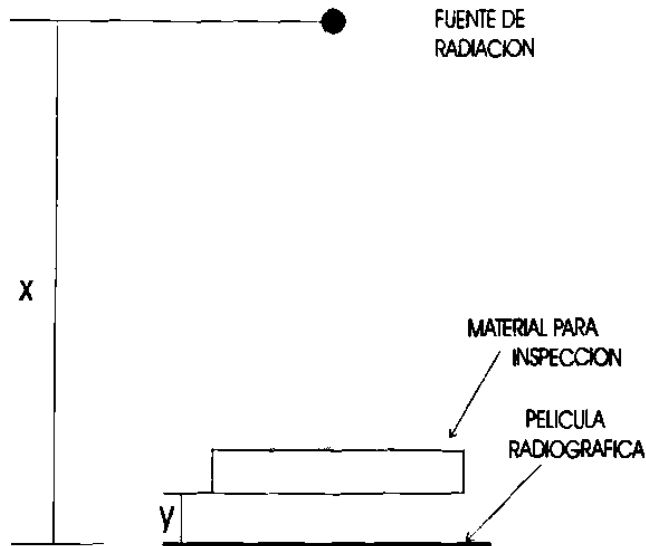


Fig. 2.4

$$\frac{X}{Y} = \frac{\text{DISTANCIA DE LA FUENTE DE RADIACION A LA PELICULA}}{\text{DISTANCIA DE LA PELICULA A LA SUPERFICIE MAS PROXIMA A LA FUENTE DE RADIACION}}$$

## 2.7 PELÍCULAS

Los fabricantes de material sensible para radiografía industrial, fabrican las películas bajo las mismas características físicas. La base de la película es de vital importancia, primeramente se fabricó de celulosa de nitrato, solo que esta base era de combustión muy rápida por lo que era muy peligrosa. Posteriormente se fabricó de celulosa de acetato y aunque su combustión no era muy rápida, aún presentaba problemas.

Actualmente la base de la película se fabrica de poliestireno que no presenta ningún peligro. Esta base está ligeramente entintada de azul, lo que ayuda a aumentar un poco el contraste, es común que la base se emulsione por ambos lados con la finalidad de aumentar aún más el contraste.

La emulsión es extremadamente sensible a los rayos x, rayos gamma y luz visible. Cuando esta es herida por cualquiera de ellas, sufre un cambio en su

estructura física, este cambio no puede detectarse por métodos físicos ordinarios.

Dado que los rayos x y los rayos gamma tienen diferentes características, los fabricantes ofrecen diferentes sensibilidades fotográficas o tipos de película para poder seleccionar la más conveniente según sea el caso. Sin embargo todas ellas pueden ser usadas indistintamente con rayos x o con rayos gamma.

Los tipos de películas que más se usan en trabajos rutinarios de radiografía son: lentas, medias, rápidas y ultrarápidas.

**Lentas.-** Las características de las películas lentas son: alto contraste y grano muy fino, estas características son adecuadas cuando se requiere trabajos de alta calidad o de investigación, cuando deseamos obtener gran sensibilidad de detalle como por ejemplo en metales y materiales ligeros (aluminio, madera, plásticos, etc.) o en trabajos de investigación (obras pictóricas, pergaminos, textiles etc.) Los tiempos de exposición largos no importan en este tipo de trabajo. Si se cuenta con fuentes de alta intensidad, esta película puede también ser usada en trabajos de inspección rutinaria.

**Velocidad Media.-** Las grandes industrias de producción radiográfica han seleccionado siempre esta película, por llenar los requisitos ordinarios en trabajos comerciales donde la facturación depende de la producción.

Sus características son: rapidez, alto contraste y grano fino, pudiendo usarse con o sin pantallas de plomo. Es de 4 a 6 veces más rápida que la película lenta, dependiendo de la calidad de radiación a la que se expone, también responde con éxito a bajas y altas energías.

**Película Rápida.-** La velocidad extraordinaria de esta película es una de sus principales características. De 5 a 10 veces más rápida que la anterior,

dependiendo de la calidad de radiación. Su contraste es mediano y su grano grande, lo que baja considerablemente la sensibilidad de detalle. Responde muy bien a altas energías. Se usa especialmente en grandes espesores ya sean de acero o materiales densos como el bronce y el plomo.

**Película Extra Rápida.-** Esta emulsión con alta sensibilidad a la luz azul, es fabricada para usarse especialmente con pantallas de calcio (estas emiten luz azul al absorber rayos x o rayos gamma) es la más indicada cuando el kilovoltaje que se dispone es limitado, también puede usarse con éxito en espesores considerables de acero o bronce.

Las películas radiográficas mientras más lentas son, su grano es más pequeño y nos da mayor sensibilidad de detalle y más alto contraste.

Las películas rápidas, mientras más rápidas son, más grande es su grano y menor su sensibilidad de detalle, además su contraste se reduce.

**Proceso Químico.-** El proceso químico a que se somete una película que ha sido expuesta a los rayos x o rayos gamma, tiene por objeto hacer patente la imagen latente que existe en la emulsión fotográfica. El proceso se divide en tres pasos que son: revelado, fijado y lavado.

**Revelado.-** Cuando la emulsión fotográfica ha absorbido rayos x o rayos gamma los halogenuros de plata que se encuentran en suspensión, sufren un cambio físico en su estructura, el cuál no se puede determinar a simple vista, sino mediante un agente revelador químico.

El agente revelador, es una fórmula balanceada la cual consta en primer lugar de dos sustancias conocidas: la hidroquinona y el sulfito paramidofenol, los cuales convierten en metal la plata, que en mayor o menor dosis de radiación,



absorbieron los halogenuros.

Para que el agente revelador pueda cumplir con su acción específica, requiere del tiempo necesario para actuar y la facilidad para hacerlo. Si se usa solamente el agente revelador para hacer patente la imagen, la oxidación inmediata que se presenta lo impediría, por lo tanto, antes de disolver el agente revelador se debe disolver una sustancia conservadora que en este caso es el sulfito de sodio, que actúa como catalizador del oxígeno.

Posteriormente es necesario añadir carbonato de sodio que actúa como ablandador de la emulsión, permitiendo que el agente revelador penetre hasta el fondo de la misma y revela la totalidad de la imagen en un tiempo determinado y a temperatura controlada.

La cuarta y última sustancia de que se compone la fórmula es el bromuro de potasio, que actúa como agente retenedor o sea que retiene el tiempo necesario la acción del revelador.

Fijador.- La fórmula comúnmente usada para fijar las películas durante el proceso de laboratorio, contiene: hiposulfito de sodio, alumbre de potasio y ácido acético. El hiposulfito de sodio actúa sobre la emulsión fotográfica removiendo todos aquellos halogenuros que no fueron afectados por la radiación y fijando la plata reveladora que dará la imagen.

El alumbre de potasio, actúa como endurecedor de la emulsión, la cuál había sido ablandada como ya lo explicamos anteriormente.

El ácido acético actuará como neutralizador del agente revelador y terminará definitivamente con su acción.

Lavado.- Cuando la película sale de los pasos de revelado y fijado, entra al tanque de lavado, lo ideal es que se use agua corriente, y en ese caso el lavado durará el doble del tiempo de fijado. Si una película que sale del fijador no se lava el tiempo requerido, unas semanas después se tomará amarilla.

Cuando termina el lavado, la película se sumerge por segundos en una solución de fotoflo, para evitar manchas de gotas de agua que pueden desorientar al momento de la interpretación. Si no se dispone de esta solución en el momento, la película se escurre con dos esponjas que darán el mismo resultado.

El secado de la película puede hacerse en una cámara cerrada con corriente de aire seco y caliente, o en su defecto, al aire ambiente dentro de una habitación, con el objeto de que no se le pegue el polvo.

## CAPITULO 3

### RADIACIONES IONIZANTES

#### 3.1.- UNIDADES: Roentgen, RAD, RBE, REM.

Roentgen (abreviadamente 1R) es la cantidad de radiación ionizante, que produce una unidad electrostática de carga negativa o positiva en 0.001293 gramos de aire seco. Bajo condiciones normales el aire tiene una densidad de 0.001293 gramos/cm<sup>3</sup>. Puesto que la carga de un electrón o ion simple es de  $1.60 \times 10^{-19}$  coulomb, el roentgen también se puede definir como la cantidad de radiación ionizante, que bajo condiciones normales produce en el aire  $2.08 \times 10^9$  pares de iones / cm<sup>3</sup>.

Las mediciones experimentales muestran que en promedio se necesitan 32.5 electrón-volt para producir un par de iones. Por lo tanto, para producir  $2.08 \times 10^9$  pares de iones/cm<sup>3</sup> se necesitan 67,600 MeV (1R = 67,600 MeV). Otra forma de definirlo sería:

Un Roentgen es la cantidad de radiación ionizante que transferirá 83 ergios de energía al atravesar un gramo de aire. Realmente la unidad roentgen es una cantidad de radiación muy grande. Por lo tanto es común usar una cantidad mas pequeña llamada miliroentgen se abrevia "mR". 1mR= 1/ 1000 roentgen. El RAD, RBE y el REM son unidades que nos permiten relacionar a la radiación con los efectos biológicos que ésta puede causar en el tejido humano.

## **RAD (Radiation Absorbed Dose)**

Significa dosis de radiación absorbida. El rad es la unidad usada para expresar la dosis absorbida de radiación ionizante en un material. Técnicamente se define como la cantidad de radiación que resulta en un material que absorbe 100 ergs de energía en cada gramo del material.

El rad se aplica a todos los tipos de radiación (radiación-X, alfa, beta y gamma) absorbida por un material. Si el tejido humano absorbiera una cierta cantidad de radiación alfa la dosis absorbida sería medida en rads. En comparación con el roentgen, se podría decir que el rad es una medida de absorción y el roentgen es una medida de exposición. La relación se puede visualizar como una situación de causa y efecto. La exposición en roentgen sería la causa y la absorción en rads sería el efecto.

Puesto que el rad no es una medida de exposición (como lo es el roentgen) no hay manera de medir rads en el aire. Los medidores usados para detectar rayos-X y rayos gamma no miden rads, miden roentgens.

## **RBE. (Relative Biological Effectiveness)**

Significa Efectividad Biológica Relativa, es una unidad determinada experimentalmente que compara los efectos de los diferentes tipos de radiación en el tejido humano.

El RBE no es técnicamente una unidad de medida de la radiación. Es un factor necesario para calcular los efectos de la radiación. Los científicos han investigado los factores RBE para los diferentes tipos de radiación. La Tabla 3.1 proporciona diferentes tipos de radiación y sus correspondientes valores de RBE.

Tipo de radiación.	RBE
Rayos-X y gamma	1
Beta	1
Neutrones (rápidos)	10
Alfa	20

Tabla 3.1

Ya que el rad es una unidad de medida de la dosis absorbida en el tejido humano y, además, sabemos que el RBE nos da un factor para la efectividad biológica de cada tipo de radiación, estas dos la magnitud de la dosis y su efectividad biológica nos proporcionan los elementos necesarios para determinar la "dosis biológica". Esto es una manera para relacionar la exposición a la radiación y los efectos que ésta puede causar en el tejido humano

#### REM (Roentgen Equivalent Man)

Significa Roentgen Equivalente - Hombre. Esta es una unidad que expresa el efecto biológico producido en el ser humano por cualquier tipo de radiación. El rem no es medido directamente como lo es el roengten sino que es una unidad calculada. La dosis biológica para cualquier tipo de radiación puede obtenerse multiplicando la dosis absorbida por la efectividad biológica relativa.

$$\text{rem} = \text{rad} \times \text{RBE}$$

Hay ocasiones que se necesita convertir la exposición o la absorción de los diferentes tipos de radiación a rems, para poder así sumarlos y obtener una dosis total que sea significativa. La dosis es usada para mantener un registro sobre las

personas que trabajan con la radiación. Se han establecido límites los cuales se expresan rems. Se hablará acerca de ellos después. Pero por ahora veamos la manera en que los diferentes tipos de radiación pueden ser sumados para determinar la dosis biológica, por medio del siguiente ejemplo, (ver la tabla 3.2). Asuma que una persona está trabajando en un área de radiación recibiendo una dosis mixta consistente de radiación alfa, beta y gamma. Para evaluar la dosis y aplicarla a los registros permanentes, toda la radiación deberá convertirse a rems.

Tipo de radiación absorbida	Exposición/Dosis	RBE	Dosis	Biológica en rems.
Gamma	0.3 r (o rad)	x 1	=	0.3
Beta	0.1 rad	x 1	=	0.1
Alfa	.02 rad	x 20	=	<u>0.4</u>
		Total	=	0.8 rems

Tabla 3.2

El total de la dosis biológica será de 0.8 rems.

Dosis es la radiación absorbida en el cuerpo. Razón de Dosis es el tiempo en el cual una dosis de radiación es recibida. Es la dosis por unidad de tiempo. Por lo tanto si queremos expresar una razón de dosis biológica, debemos de expresarla en rems por unidad de tiempo. La razón de exposición es la exposición por unidad de tiempo.

Cabe recordar que, tanto en los rayos-X o rayos gamma, la razón de exposición en roentgens por hora es igual a la razón de dosis en rems. Es por eso que la

exposición a la radiación-X o gamma está expresada como una razón de dosis en roentgens por hora.

### 3.2.- DOSIS DE RADIACION

El problema de los riesgos de la radiación para las personas que trabajan con radiografía es muy importante. Esto hace necesario establecer límites de dosis para aquellas personas relacionadas con la radiación y asegurarse que esos límites sean observados.

Las condiciones y límites de exposición a la radiación son establecidas por varias agencias federales y estatales.

La agencia primaria en México es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguarda (CNSNS) quien a su vez busca implementar las recomendaciones marcadas por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), pero todas las agencias combinadas no pueden asegurar la seguridad radiológica. En cualquier ocasión que ocurra una exposición innecesaria a la radiación, ésta se considerará excesiva aunque no este por arriba, de los límites permitidos.

Cuando se trabaja con radiografía se estará expuesto a cierta cantidad de radiación. La idea es mantener la exposición en el mínimo requerido y seguir desempeñando el trabajo satisfactoriamente. La dosis biológica es algo acumulativo. Cada dosis se suma a aquellas recibidas en el pasado para así formar una especie de hoja de registro permanente.

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguarda, como agencia primaria de control, ha especificado que cualquier organización con licencia para

obtener y usar materiales radioactivos, debe asegurarse que los individuos no sean expuestos a niveles de radiación que excedan los límites permitidos. Los requerimientos básicos son: que las personas que laboren con radiación no reciban una dosis ocupacional que exceda los límites mostrados en la tabla 3.3.

Area del Cuerpo Expuesta	Rems por Trimestre
Cuerpo entero; cabeza y tronco; organos activos formadores de sangre; retinas de los ojos	1-1/4
Manos y brazos; pies y tobillos	18- 3/4
Piel del cuerpo entero	7- 1/2

Tabla 3.3

Límites de "Dosis Ocupacional". Esta es la terminología estándar utilizada para los límites de radiación recibida mientras sea empleado en un trabajo que requiera el uso de la radiación.

El límite mas restrictivo es para las personas que laboran con radiación corresponde a la exposición de cuerpo entero. Mientras que el límite para los pies y tobillos es de 18-3/4 rem s por "trimestre", el límite de dosis de cuerpo entero es de solamente 1-1/4 rem s por trimestre. Esto puede interpretarse que 1-1/4 rem s de exposicion de cuerpo entero es tan dañina como 18-3/4 rem s de exposición en los pies y tobillos. De este análisis se puede ver que el daño causado por la radiación varía con la cantidad del cuerpo expuesto.



Los efectos de la radiación no solo varían con la cantidad del cuerpo expuesto, sino que también varían con la parte del cuerpo expuesta.

Una dosis de radiación de una cantidad determinada tendrá menos efecto si es recibida sobre un período largo de tiempo. La misma dosis puede causar daño permanente si es recibida en un período de tiempo corto.

La razón de esto es que los tejidos del cuerpo son capaces de reparar los daños de radiación si se da el tiempo adecuado para hacerlo. La reparación de los tejidos es ejecutada por las células de tejidos no dañados creando nuevas células para reponer las células muertas o dañadas.

Cuando una exposición dada es sobre un período largo de tiempo, una considerable reparación de daños será llevada a cabo durante el período de exposición. O, si la exposición es intermitente, ocurrirían reparaciones entre las exposiciones. Pero cuando la misma exposición es recibida en un período de tiempo mucho muy corto, los daños son palpables, y la reparación de tejidos se vuelve más difícil.

Otra variable que interviene en la cantidad de daño causado por la radiación, es la edad de la persona expuesta. La ciencia ha descubierto que las células del cuerpo, aquellas que están más activas para dividirse y reproducirse por sí mismas y las que son menos maduras, son las más vulnerables a la radiación.

Un niño de 3 años es un ejemplo de una persona cuyas células son activas en reproducción. Mientras el infante crece, las células deben dividirse y multiplicarse para promover el crecimiento. El niño al desarrollarse tiene un número grande de células inmaduras debido a esa reproducción. Por lo tanto, una persona de 3 años es más vulnerable a la radiación que una de 25 años.

Debido al posible daño que puede ser causado en personas que no están completamente desarrolladas, los reglamentos federales han establecido una edad mínima para trabajadores de radiación. El mínimo es de 18 años.

Una variable final en los efectos que la radiación puede causar en el cuerpo humano es la diferencia biológica entre individuos.

Una sobredosis de radiación de una cantidad determinada puede matar a una persona y no a otra, eso es lo que quiere decir la diferencia biológica entre individuos. Algunas personas son afectadas de forma diferente a las demás por una dosis de radiación.

Las cinco variables que influyen en el efecto que tienen las dosis de radiación en los individuos son :

- \*La cantidad del cuerpo expuesto
- \*La parte del cuerpo expuesta
- \*La duración del tiempo sobre el cual una dosis de radiación es recibida
- \*La edad del individuo expuesto
- \*La diferencia biológica entre individuos.

### 3.3.- EFECTOS DE LA RADIACIÓN

La mayor parte del conocimiento científico sobre los efectos de radiación ha venido de investigaciones en plantas y animales. Sin embargo, en los últimos 25 años, una cantidad considerable de información ha sido obtenida sobre seres humanos. Alguna información ha resultado de accidentes de radiación mientras que otra vino de la gente que sobrevivió al ataque con bombas nucleares durante

la segunda guerra mundial, otra fuente fueron las pruebas de armas nucleares después de la segunda guerra mundial.

La información sobre los efectos de la radiación en humanos es aún escasa e inconclusa en muchas áreas, sin embargo, algunos hechos están bien establecidos y esos son los que nos interesan.

Bien conocido es el hecho de que las radiaciones nucleares tales como los rayos gamma, las partículas alfa, las partículas beta, y los neutrones pueden causar daños al cuerpo humano. Menos de un año después del descubrimiento de los rayos x por Roentgen, un fabricante de rayos x, notó que estos rayos habían dañado sus manos y buscó tratamiento médico. Becquerel recibió una quemadura en el pecho al llevar un frasco que contenía radio en el bolsillo de su saco.

Los efectos dañinos de las radiaciones nucleares parecen deberse a la ionización o excitación de los átomos en las células vivas causadas por el efecto Compton, la bremsstrahlung, el efecto fotoeléctrico, etc. Algunos constituyentes de las células son alterados o destruidos por la ionización, y algunos de los productos formados pueden actuar como venenos. Ejemplos de los daños son el rompimiento de los cromosomas, la inflamación del núcleo de una célula o de toda la célula, los cambios en la permeabilidad de las membranas celulares, y la destrucción de las células.

Frecuentemente, el reemplazo normal de las células se ve inhibido por la incapacidad de las células para reproducirse después de estar sujetas a las radiaciones ionizantes. Las células más sensitivas son las de la médula de los huesos, las glándulas linfáticas, la piel de los labios y los intestinos, los órganos

reproductores, los folículos del cabello, y la piel. Los tejidos del hígado y del riñón son moderadamente sensibles, mientras que los tejidos de los nervios, del cerebro y de los músculos son menos sensibles.

Los efectos biológicos causados por una sobredosis de radiación pueden dividirse en dos grupos que son: Efectos somáticos y Efectos genéticos.

Los efectos somáticos son efectos físicos en el cuerpo del individuo que recibe la radiación. Una reducción en el número de glóbulos blancos en la sangre, como resultado directo de exposición a radiación ionizante es un ejemplo de efecto somático. Los efectos genéticos son aquellos que pueden ser pasados a próximas generaciones o a descendientes futuros tales como características hereditarias.

Los efectos más severos de radiación son causados por una dosis grande en un período corto de tiempo. Por ejemplo, una persona podría acumular 200 rems en un tiempo de 40 años trabajando en radiografía, esto no excedería los límites permisibles de dosis. Sin embargo, si esa misma persona recibe una dosis de 200 rems en un período de 24 horas, podría ser muy grave.

Los efectos de una sobredosis de radiación no son necesariamente detectados inmediatamente después de la exposición. La mayoría de ellos aparece en el cuerpo después de algún tiempo. El período entre la exposición y la aparición de los síntomas es llamado el "período latente".

Por ejemplo, para una sobredosis de cerca de 200 rems el período latente sería de una semana, después de ese tiempo aparecerán los primeros síntomas como la caída del pelo, diarrea, dolor de garganta y pérdida de apetito.

Los efectos que hemos discutido nos da una idea general de que tan seria

puede ser una sobredosis de radiación. Simplemente con guardar la dosificación dentro de los límites prescritos y siguiendo buenas prácticas de seguridad, se podrá llevar a cabo todos los trabajos de radiografía sin problema. La tabla 3.4 muestra los efectos corporales de dosis de radiación ionizante.

EFFECTO \ RANGO	100-200 rems	200-600 rems	600-1000 rems	1000-5000 rems	Más de 5000 rems
incidencia de vómito	100 rems: 5% 200 rems: 50%	300 rems: 100%	100%	100%	100%
tiempo que tarda en presentarse	3 hr	2 hr	1 hr	½ hr	½ hr
órgano afectado	tejido hematopoiético	tejido hematopoiético	tejido hematopoiético	gastrointestinal	nervioso central
signos característicos	leucopenia moderada	leucopenia severa	hemorragia; infección	diarrea, fiebre	convulsiones; temblores; ataxia, letargo
periodo crítico después de la exposición	—	4-6 semanas	4-6 semanas	5-14 días	1-48 días
terapia	descanso; vigilancia hematologica	transfusiones de sangre; antibioticos	posible trasplante de la médula ósea	mantener el balance electrofítico	sedativos
pronóstico	excelente	bueno	cauteloso	sin esperanza	sin esperanza
periodo de convalescencia	varias semanas	1-12 meses	largo	—	—
incidencia de muerte	ninguna	0-80% (variable)	80-100% (variable)	90-100%	90-100%
la muerte ocurre en	—	2 meses	2 meses	2 semanas	2 días
causas de la muerte	—	hemorragia; infección	hemorragia; infección	colapso circulatorio	falta respiratoria, endemia cerebral

Tabla 3.4

### 3.4.- CLASIFICACION DE APARATOS DE MEDICION.

La detección y medida de la exposición a la radiación recibida por trabajadores de radiación es obviamente de mucha importancia. Puesto que el hombre no puede detectar radiación con sus sentidos, deben ser usados aparatos para detectar y medir radiación en el aire alrededor de un área de radiación.

Los aparatos se clasifican por su uso y son, aparatos monitores personales y medidores de detección de radiación.

Los aparatos monitores personales son, como el nombre implica, prendidos a la ropa de la gente que trabaja en áreas radiográficas.

Los medidores de detección de radiación son instrumentos portátiles utilizados para detectar niveles de radiación en áreas de trabajo. Como procedimiento normal son usados siempre cerca de donde se ejecutan operaciones radiográficas ya sea con rayos-x o con rayos gamma. Son diseñados para dar la medida de exposición a radiación.

Cualquiera de los tipos de aparatos medidores de radiación, medirá exposiciones de radiación gamma o x en roentgen. Ambos tipos de aparatos dependen de un principio que discutimos anteriormente.

Cuando la materia ya sea gaseosa o sólida es irradiada, los electrones son golpeados y liberados de sus átomos - padre. Los electrones libres, tienen una carga negativa y las partículas de las cuales son liberados tienen una carga positiva, transformándose en iones positivos y negativos. Tanto los aparatos monitores personales como los medidores de detección de radiación, dependen del principio de ionización.

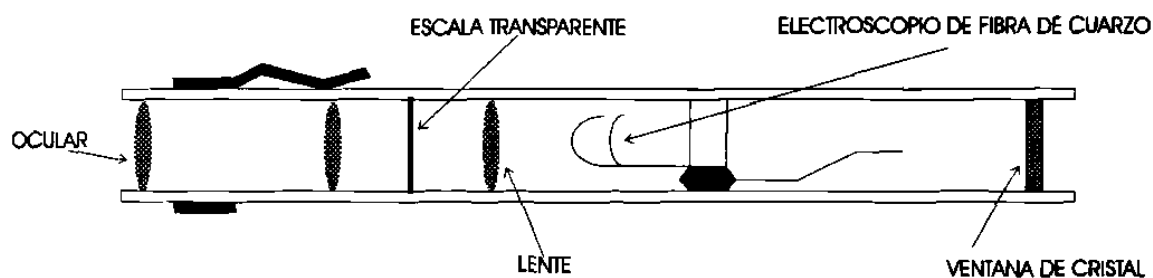
### 3.5.- APARATOS MONITORES PERSONALES

El dosímetro de bolsillo y la placa monitora son llamados aparatos monitores personales, porque son usados sobre la ropa del personal trabajando en áreas de radiación y, como lo mencionamos anteriormente, ambos trabajan sobre el principio de ionización y los dos proporcionan lecturas acumulativas de

exposición a radiación.

## DOSÍMETRO DE BOLSILLO.

El dosímetro de bolsillo es un instrumento del tamaño aproximado de una pluma fuente que puede prenderse a la ropa o al bolsillo del usuario. Básicamente hay dos tipos de dosímetros de bolsillo, ambos son similares en apariencia y en operación. Uno es aparato de lectura directa, es decir que la indicación puede ser leída directamente del mismo dosímetro. El otro da una lectura no-directa (también llamado "Cámara de bolsillo") y debe ser leído usando un aparato de lectura. El tipo de dosímetro de bolsillo que primordialmente nos interesa aquí es el de lectura directa. la figura 3.1 nos pmuestra el corte de un dosímetro de lectura directa.



DOSIMETRO TIPICO DE BOLSILLO DE LECTURA DIRECTA

Fig. 3.1

El dosímetro se lee mirando a través del ocular, las lentes y la escala transparente son necesarios para poder leer la indicación marcada por el electroscopio de fibra de cuarzo. La indicación en sí misma es producida en una cámara de ionización de la cual el electroscopio es una parte. Una cámara de

ionización es un compartimiento lleno de gas (en este caso lleno de aire) para reunir iones formados por radiación de alta energía. El electroscopio de fibra de cuarzo opera bajo el principio de que cargas eléctricas iguales se repelen y cargas desiguales se atraen. El electrodo consiste en dos fibras de cuarzo, una fija y la otra móvil (Fig. 3.2).

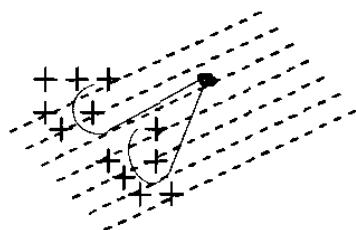


Fig. 3.2

Cada vez antes que el dosímetro sea usado, se coloca en un aparato cargador el cual pone una carga eléctrica igual en cada fibra de cuarzo. La fibra movible articulada se separa de la fija porque ambas están cargadas con una carga igual.

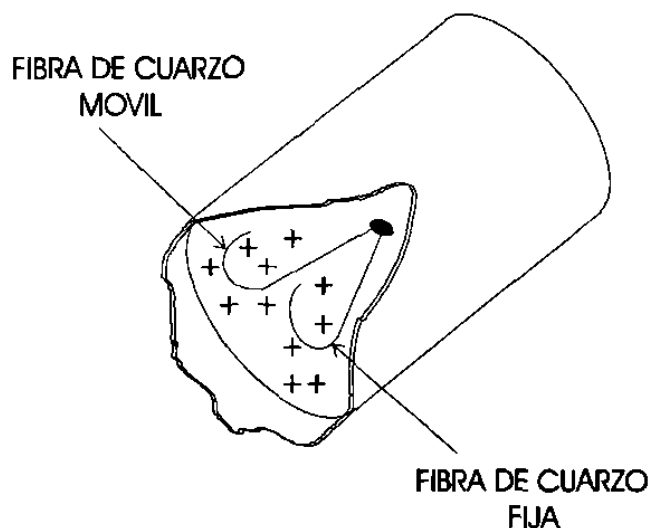


Fig. 3.3



En la página anterior se muestran las fibras separadas y con signos positivos agregados para mostrar (Fig. 3.3) que una carga positiva ha sido aplicada, la cual es suficientemente fuerte para separar completamente la fibra móvil.

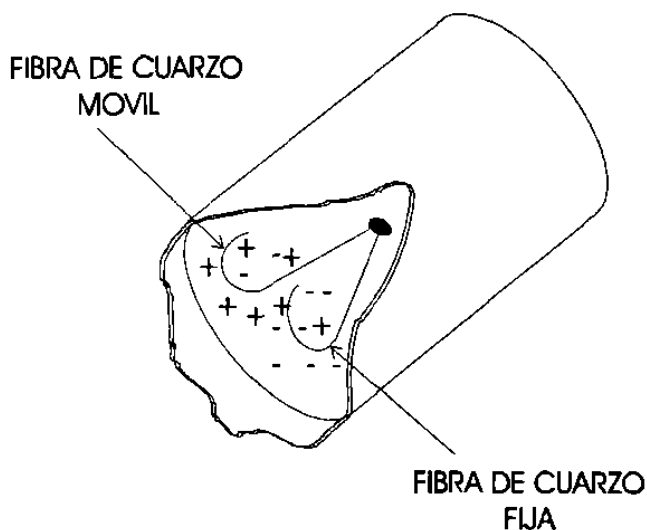


Fig. 3.4

El electrodo está diseñado de tal modo que mientras esté la carga positiva en las fibras, éstas permanecerán separadas. Ahora veamos qué sucede cuando los rayos x o gamma pasan a través de la cámara de ionización.

Sabemos que el paso de radiación a través del aire (o gas) causa ionización. Y eso es exactamente lo que sucede cuando los rayos entran en la cámara de ionización. Son creados pares de iones con algunas partículas positivas y algunas partículas negativas (fig. 3.4). Cuando ocurre ionización en la cámara, el aire en esta se vuelve un conductor de electricidad. Por lo tanto un flujo de electrones es creado. Las partículas negativas son entonces atraídas a la carga positiva de la fibras de cuarzo. Cuando los iones negativos alcanzan las fibras, ellas pierden su carga y neutralizan una cantidad de la carga positiva de las

fibras. Si la carga en las fibras de cuarzo es reducida, la fibra móvil se mueve hacia la fibra fija. Eso es lo que hace a la cámara de ionización de bolsillo trabajar. Puede medir y detectar la ionización (radiación) por medio del movimiento de las fibras del electroscopio y una escala apropiadamente calibrada. La figura 3.5 muestra la escala sobrepuesta en el electroscopio Fig. 3.5.

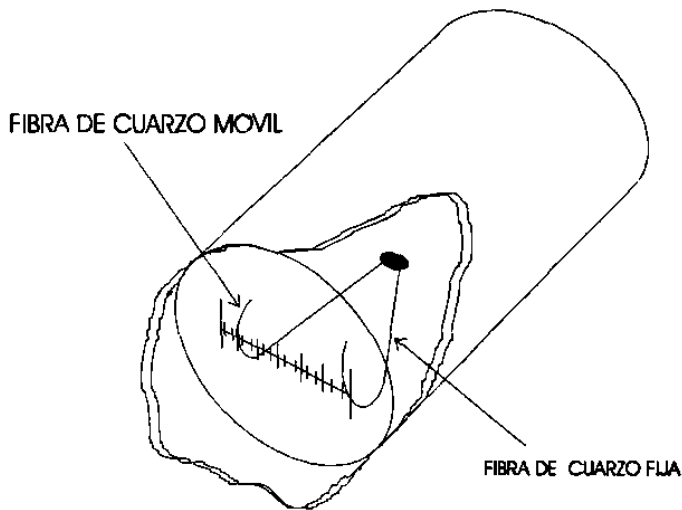


Fig. 3.5

Ahora, suponga que la fibra fija no es visible y que la escala y el área de visión se enfocan solamente en la fibra móvil. Esta es la vista que se tiene cuando se mira en el ocular del dosímetro después de una exposición a rayos x o gamma (Fig. 3.6).

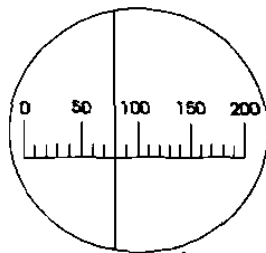


Fig. 3.6

La lectura del dosímetro indica una exposición de 70 mR. Es la exposición acumulada recibida por el instrumento desde la última vez que fue cargado.

El dosímetro de bolsillo deberá ser usado por todo el personal que pueda estar expuesto a radiaciones ionizantes durante el desempeño de su trabajo. Antes de usarse, el dosímetro debe recargarse a cero. Esto permite al usuario obtener una lectura instantánea en cualquier momento del día de la cantidad de radiación que ha recibido. La lectura instantánea es una ventaja importante del dosímetro.

#### PLACA MONITORA.

La placa monitora (algunas veces llamada dosímetro fotográfico) mide radiación ionizante a través de una película fotográfica especial.

Cuando la radiación alcanza la película, la ionización dentro de la emulsión oscurece o expone la película en forma similar como lo hace la luz. El oscurecimiento de la película es proporcional a la cantidad de exposición o radiación recibida. Después que la placa monitora ha sido usada por un período de tiempo (una semana), la película es removida y revelada. Una comparación es hecha entonces entre la película de la placa monitora y las características de una película similar ( llamada película de control ) la cual ha sido expuesta a una cantidad conocida de radiación similar.

La comparación revela la cantidad de exposición de rayos -X o gamma recibida por la película .

La exposición de rayos -X o gamma recibida por la película puede ser relacionada directamente a la exposición del usuario de la placa. En otras palabras, si la placa monitora recibió 200 mR durante una semana, el usuario se presume ha recibido 200 mR en el mismo período.

La interpretación de la dosis en la película es una operación crítica y se lleva a cabo por especialistas en la materia y no por los trabajadores de radiación. La interpretación es realizada con el uso de un "densitómetro". El densitómetro mide la densidad de la película revelada para determinar la cantidad de radiación que ha recibido la película.

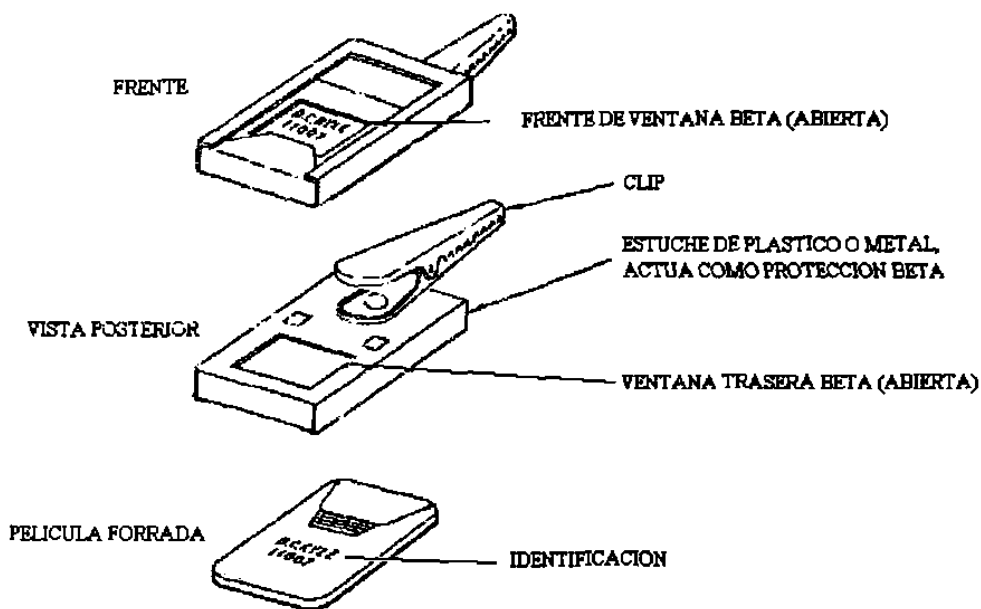


Fig. 3.7

Después de haber obtenido la lectura del densitómetro, es comparada a una "curva característica". Esta curva compara la densidad contra la dosis para una película de control del mismo tipo, la cual fue expuesta a radiación similar de una dosis y energía conocidas.

En su forma más simple , la placa monitora está constituida así: la película está envuelta en un papel a prueba de luz dentro del estuche, y tiene un broche para prenderse a la ropa del usuario, ver figura 3.7.

Hemos hablado de la placa monitora respecto a su uso en la medición de rayos-x y gamma. Sin embargo el dispositivo también tiene una ventana abierta la cual permite la entrada de radiación beta de alta energía, así como rayos-x y gamma. El estuche protegerá de la radiación beta a la película que éste cubre (la cual es toda excepto la ventana) y las lecturas de esas áreas indicarán sólo radiación gamma y x.

La placa monitora es un aparato importante en el monitoreo de la radiación recibida por el personal de radiografía. Como mencionamos anteriormente la placa monitora y el dosímetro deberían de usarse juntos como un doble chequeo.

Cuando se compara con el dosímetro de bolsillo, la placa monitora no proporciona una indicación inmediata de exposición. La película debe ser revelada e interpretada antes que se obtenga la lectura.

Una ventaja de la placa monitora es que ésta proporciona un récord permanente de la exposición del usuario. Una vez que la película se ha revelado, puede ser archivada por un período indefinido. Al usar la placa monitora y el dosímetro de bolsillo como un doble chequeo de exposición, los récords deben ser llevados para cada tipo de aparato. Normalmente, se lleva a cabo una lectura diaria de los dosímetros, es anotada en los récords de los usuarios de dosímetros. Este récord puede ser comparado con las lecturas de la placa monitora después que la película es revelada. La placa monitora es considerada generalmente más confiable.

### 3.6.- MEDIDORES DE DETECCIÓN DE RADIACION.

Los medidores de detección de radiación son portados por el personal radiográfico durante cualquier operación radiográfica.

Los detectores son diseñados para dar una lectura rápida de la intensidad de radiación en el área. Por ejemplo, cuando se usa un contenedor con fuente de rayos gamma, un detector de radiación dará una lectura instantánea (en roentgens o miliroentgens por hora), de la cantidad de radiación a cualquier distancia de la fuente. Un detector de radiación mantenido cerca de un contenedor de fuente de rayos gamma proporciona un chequeo positivo de si está o no encerrada la fuente. El uso y operación de detectores de radiación difiere del de aparatos monitores personales. Existen dos tipos de detectores de radiación: Detectores de cámara de ionización y los contadores Geiger-Mueller.

#### DETECTOR DE CÁMARA DE IONIZACIÓN

El detector de cámara de ionización usa una cámara para reunir los pares de iones producidos por los rayos ionizantes de radiación- x y gamma, al igual que el dosímetro de bolsillo. Sin embargo, existen algunas diferencias entre este tipo de detector y el dosímetro de bolsillo. He aquí una ilustración de un típico detector de radiación de cámara de iones, ver fig. 3.8. La cámara de iones en el detector consiste en dos electrodos que están aislados uno del otro y tienen cargas opuestas. Los electrodos están conectados a una batería. Cuando la radiación ionizante entra en la cámara, se crean pares de iones. Los iones positivos fluyen al electrodo negativo, y los iones negativos al electrodo positivo. Cuando los

iones alcanzan los electrodos , un flujo de corriente es creado a través de un circuito. Esta corriente es registrada por un medidor que da la razón de radiación en roentgens (o miliroentgens) por hora.

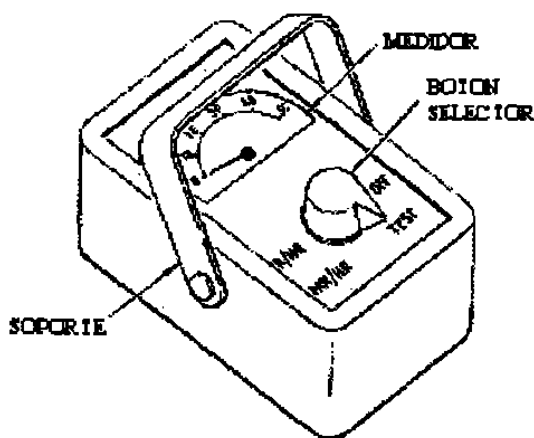


Fig. 3.8

## CONTADORES GEIGER-MUELLER

Los contadores Geiger-Mueller (G-M) comúnmente llamados "contadores geiger" son medidores de radiación usados para medir niveles de radiación relativamente bajos. Operan con el mismo principio que la cámara de ionización. El contador G-M usa un "tubo Geiger- Mueller" en vez de una cámara de ionización.

El tubo Geiger-Mueller es similar al principio del funcionamiento de la cámara de iones, está diseñado para amplificar o multiplicar los efectos de los rayos ionizantes. Esto es hecho por la aceleración de los iones primarios causados por radiación ionizante dentro del tubo. Esta aceleración causa que los iones primarios se transformen en partículas ionizantes en si mismos y son capaces de causar

muchas ionizaciones secundarias. Por medio de este efecto multiplicante, una ionización total del gas en el tubo puede ocurrir aunque entre un solo fotón.

Por lo tanto el contador G-M es capaz de medir niveles de radiación relativamente bajos y en ese aspecto es más preciso que el medidor de cámara de ionización.

Sin embargo, hay una importante desventaja en los contadores Geiger-Mueller. Si el contador se enciende en un campo de radiación muy alta, la aguja puede que no reaccione de una manera normal. La aguja puede esperarse se mueva hasta el extremo derecho, sin embargo, en muchos casos no se moverá del todo y en otros puede indicar una lectura errónea en la escala. Este comportamiento es llamado algunas veces "inundación" y no es pronosticable. La única manera de protegerse sobre ello, es encender el contador G-M bastante lejos del área de radiación y observarlo hasta que marque según se acerque uno a la fuente. Hay muchas formas y modelos de contadores G-M y detectores de cámara de ionización. Los ejemplos que hemos mencionado son los más elementales.



## CAPITULO 4

### PROTECCION AL PERSONAL

#### 4.1.- MEDIDAS PROTECTORAS CONTRA LA RADIACION.

Las medidas protectoras contra la radiación son primordialmente diseñadas para mantener la exposición de radiación dentro de los límites permitidos, o aún menores. Esto es necesario porque no hay manera de deshacer o regresar los daños de radiación después que han ocurrido.

Los cálculos de razón de dosis son importantes puesto que son usados para diseñar los requerimientos en la protección del personal. Por cada curie de actividad de un isótopo, hay una razón de dosis predeterminada. Y la razón de dosis, de cada isótopo para una actividad dada es diferente. La razón de dosis estandar de la mayoría de los isótopos es expresada en roentgens por hora por curie y es dado para una distancia exacta de un pie. A continuación se presenta la tabla 4.1 que nos muestra los isótopos más usados en radiografía.

RADIOISOTOPO	R/HR/CURIE A 1 PIE
COBALTO - 60 (Co-60)	14.5
IRIDIO - 192 (Ir-192)	5.9
CESIO - 137 (Cs-137)	4.2
TULIO - 170 (Tm-170)	0.03

Tabla 4.1

Hay tres maneras básicas de proporcionar protección contra la radiación, y éstas son:

- Controlando la duración del tiempo que una persona está expuesta a una fuente de radiación.
- Controlando la distancia entre el personal y la fuente de radiación.
- Blindaje (colocar materiales absorbentes entre el personal y la fuente radiación).

#### 4.2.- TIEMPO DE EXPOSICION.

La relación del tiempo a exposición de radiación es simple. Mientras se esté más tiempo en un área de radiación, más será la exposición a la radiación que se recibe. La exposición aumenta en proporción directa al tiempo que se pase en la radiación ionizante. Suponga que una persona recibe 1 mR en un minuto de fuente de radiación. Si esa misma persona permaneciera 5 minutos a la misma distancia de la misma fuente recibiría 5mR, (ver fig. 4.1).

#### 4.3.- DISTANCIA A LA FUENTE DE RADIACION.

La distancia que hay entre la fuente de radiación y una persona, es otra forma muy importante y efectiva de protección personal, ya que la rapidez de radiación decrece drásticamente cuando la distancia de la fuente aumenta.

Una ley matemática conocida como la "Ley de cuadrados inversos" expone que la rapidez de la radiación varía inversamente al cuadrado de la distancia de la fuente. La ley es válida cuando la radiación viene de un "punto" fuente y consideraremos todas las máquinas de rayos- x y fuentes de rayos gamma como

fuentes "punto".

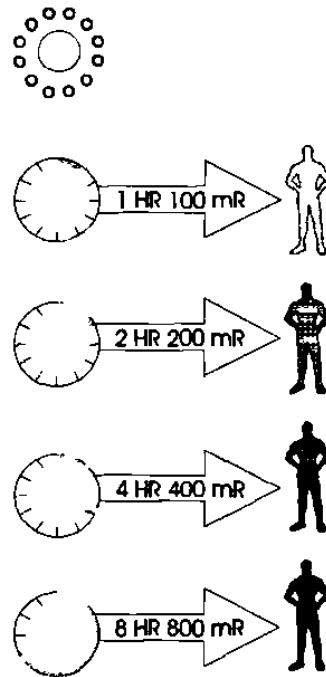


Fig. 4.1

Para definir más la relación de los cuadrados inversos, suponga que una persona está parada a cierta distancia de una fuente y recibe una determinada cantidad de radiación. Si esa persona aumenta su distancia al doble de la fuente, ella recibirá solo  $\frac{1}{4}$  de la cantidad de radiación.

Además para ilustrar el efecto de distancia en seguridad, la figura 4.2 muestra una fuente con intensidades a varias distancias de la misma. A un pie de distancia de la fuente, se registra una razón de dosis de 1000 mR/hr. Así, al alejarse un pie más de la fuente la razón de la dosis se reduce a 250 mR/hr (al doblar la distancia la radiación se reduce a  $\frac{1}{4}$ ). Al alejarse a una distancia de 10 pies de la fuente, la razón de dosis es solamente de 10mR/hr.

Las mismas consideraciones se aplican si se va acercando a la fuente en lugar

de alejarse.

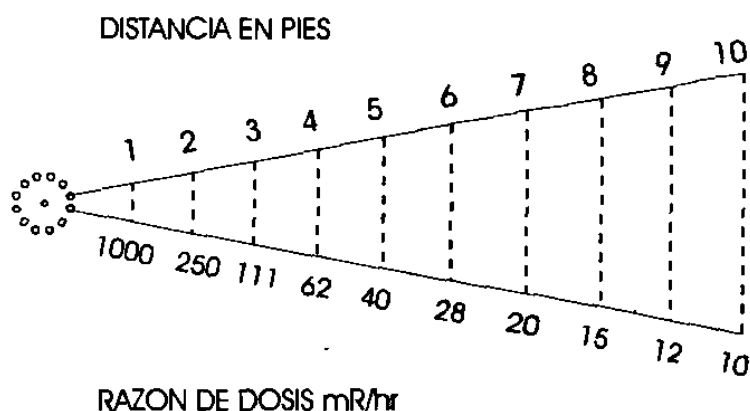


Fig. 4.2

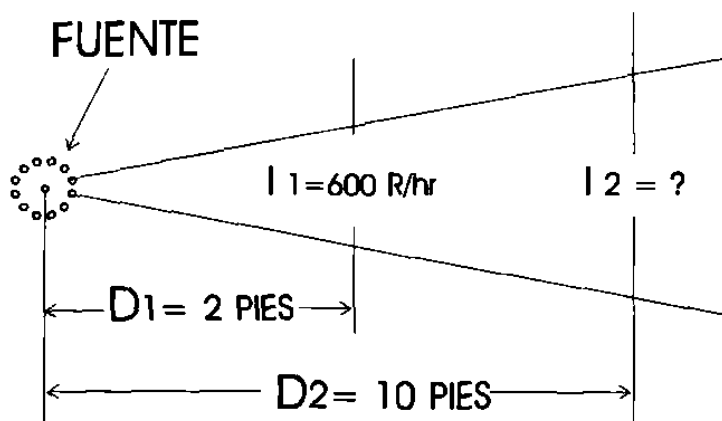
Hay una fórmula simple usada en radiografía para determinar la rapidez de radiación o razón de dosis a distancias variables de una máquina de rayos-x o fuente de rayos gamma. La fórmula de la ley de cuadrados inversos para determinar la razón de dosis se muestra a continuación:

$$I_1 D_1^2 = I_2 D_2^2$$

donde  $I_1$  es la rapidez de exposición a la distancia  $D_1$ ,

$I_2$  es la rapidez de exposición a la distancia  $D_2$

El siguiente es un ejemplo para aplicar la fórmula. A 2 metros de una fuente de radiación, la rapidez de la radiación es 600 R/hr. ¿Cuál sería la rapidez de radiación a 10 pies de esta fuente?



$$I_1 = 600 \text{ R/hr}$$

$$I_1 D_1^2 = I_2 D_2^2$$

$$D_1 = 2 \text{ pies}$$

despejando

$$I_2 = ?$$

$$I_2 = (I_1 D_1^2) / D_2^2 = 600 (2^2) / (10)^2$$

$$D_2 = 10 \text{ pies}$$

$$I_2 = 24 \text{ R/hr}$$

Así, la rapidez de exposición a una distancia de 10 pies es de 24 R/hr.

La misma fórmula puede usarse para encontrar la rapidez de exposición o razón de dosis cuando se la persona se acerca al isótopo.

Ejemplo: suponga que a 2 pies de un isótopo, la rapidez de exposición es 600 R/hr. ¿Cuál será la rapidez de exposición a 1 pie de esa fuente ?

$$D_2 = 2 \text{ pies}$$

$$I_1 D_1^2 = I_2 D_2^2$$

$$I_2 = 600 \text{ R/hr}$$

$$I_1 = (I_2 D_2^2) / D_1^2 = 600 (2^2) / (1^2)$$

$$D_1 = 1 \text{ pie}$$

$$I_1 = 2400 \text{ R/hr}$$

$$I_1 = ?$$

En el ejemplo anterior, al moverse de 2 pies a 1 pie del isótopo, la rapidez de exposición se vuelve 4 veces más alta. Si usted se aleja al doble de la fuente de radiación, la rapidez de exposición será reducida a  $\frac{1}{4}$  de la cantidad original.

#### 4.4.- BLINDAJE

Los materiales de blindaje absorben la energía de radiación cuando los rayos - x o gamma chocan con los electrones del material, debido a que los fotones son absorbidos por el material de blindaje, existe menos radiación al otro lado del material y por ende, las personas que están en el lado protegido reciben menos radiación. Algunos materiales proporcionan mayor blindaje para un grosor dado que otros, por ejemplo: se requieren 6.20 pulgadas de espesor de concreto para reducir la intensidad de radiación a un décimo de su valor original, cuando la fuente es Ir - 192 mientras que solo se requiere 0.640 milésimas de pulgada de espesor de plomo para reducirla en la misma proporción, por lo que de esto se deduce que el plomo proporciona mayor blindaje contra la radiación que el concreto. El mayor número de electrones en un átomo de plomo en comparación con el de concreto, incrementa la posibilidad de que los fotones sean detenidos cuando penetran en el plomo. En pocas palabras, el plomo es un material más denso . Y mientras más denso el material, protege mejor contra la radiación.

Por lo general se usan el plomo, el concreto y el hierro como materiales de blindaje.

El plomo es el más absorbente de los tres , luego sigue el hierro y a éste el concreto.

El plomo es el más absorbente de los tres , luego sigue el hierro y a éste el concreto.

En la aplicación práctica los dos materiales más comunes para blindaje son plomo y concreto (y combinaciones de los dos ). Para operaciones radiográficas en áreas cerradas, son construidos cuartos especiales para hacer exposiciones de rayos- x y gamma. Estos cuartos son diseñados con la intención de mantener la radiación fuera de los cuartos a un nivel aceptable. Las paredes de los cuartos (también el piso y el techo si se requiere) puede ser de concreto y tienen la protección adicional de láminas de plomo colocadas entre las paredes. El control remoto permite la operación del equipo radiográfico desde afuera de los cuartos.

Cuando se llevan a cabo operaciones radiográficas fuera de los cuartos blindados, se usan pantallas portátiles para proporcionar algo de blindaje.

Por lo general es necesario limitar la radiación que pasa a través del blindaje a un nivel permisible. Es entonces, necesario tener una forma de calcular la cantidad de blindaje requerido para reducir la radiación a un nivel permitido. Este concepto expone que hay un cierto grosor de material que reducirá la radiación que pase a través de ese material a la mitad de la intensidad original.

*La capa hemirreductora (C.V.M.) es el espesor de un material que reducirá la radiación a la mitad de su intensidad original.*

Para cada radioisótopo o cada rayo-x de una energía dada, hay una capa hemirreductora característica de cualquier material. Estos son valores estandar y

como, el grosor del material que reducirá la radiación que pasa a través del material a un décimo de su intensidad original.

La tabla 4.2 muestra tres isótopos y dos de los materiales de blindaje más comunes, plomo y concreto.

MATERIAL DE BLINDAJE	FUENTE DE RADIOISOTOPOS					
	COBALTO-60		IRIDIO-192		CESIO-137	
	1/10	1/2	1/10	1/2	1/10	1/2
PLOMO (ESPEORES EN PULG.)	1.62	0.49	0.64	0.19	0.84	0.25
CONCRETO (ESPEORES EN PULG.)	8.6	2.6	6.2	1.9	7.1	2.1

A continuación se proponen los siguientes casos prácticos.

#### Caso # 1

La intensidad de la radiación en cierto punto es de 81 R/hr. Cuantas capas de C.V.M. son requeridas para reducir la intensidad a 3 R/hr, suponga que las capas serán de plomo ¿Cuál será el espesor del plomo requerido ?

Recordemos que cada C.V.M. colocada en un haz de radiación, reduce a esta en la mitad de su intensidad original. Aplicando la siguiente fórmula:

$$I = \frac{I_0}{2^n}$$

$n$  = número de capas

$$I_0 = 81 \text{ R/hr}$$

$$I = 3 \text{ R/hr}$$

$$n = ?$$

Como en este caso nos interesa conocer " $n$ ", la despejamos de la fórmula anterior y se obtiene:

$$n = \frac{\log\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\log 2} = \frac{\log\left(\frac{81}{3}\right)}{\log 2} = \frac{\log 27}{\log 2} = \frac{\log 40.5}{\log 2} = \frac{1.6}{0.3} = 5.3$$



Esto significa que se necesitan 5.3 capas hemirreductoras de plomo.

Espesor de plomo requerido = (número de capas valor medido) (espesor dado en tablas)

Espesor del plomo requerido =  $5.3(0.49) = 2.597$  pulg.

## Caso # 2

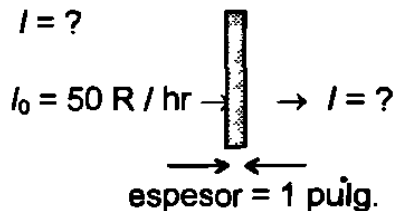
Se tiene una fuente de radiación de Cs- 137. La fuente produce una intensidad de radiación de 50 R/hr en el lado de la fuente de una capa de plomo de una pulgada de espesor. ¿De cuántas capas valor medio consiste la protección, ¿Cuál será la rapidez de exposición de la radiación en el lado opuesto del plomo protector?

$$I_0 = 50 \text{ R / hr} \quad \# \text{ capas valor medio} = n = \frac{\text{Espesor del plomo requerido}}{\text{Espesor dado en tablas}}$$

$$\text{Espesor de plomo} = 1 \text{ pulg} \quad n = \frac{1 \text{ pulg}}{0.25}$$

$$I = ?$$

$$n = 4$$



$$I = \frac{I_0}{2^n} = \frac{50}{2^4} = \frac{50}{16}$$

$$I = 3.125 \text{ R / hr}$$

Cuatro capas de valor medio de plomo reducirán una intensidad de Cs - 137 de 50 R/hr a 3.125 R/hr.

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los Ensayos no Destructivos ayudan a detectar aquellos discontinuidades superficiales o subsuperficiales que afectan la calidad o la operación de un equipo o servicio.

Debido a la gran diversidad en el campo de trabajo, los Ensayos no Destructivos se han dividido en Sistemas de Inspección Volumétrica, Superficial, y de Hermeticidad.

Los Ensayos no Destructivos no sustituyen a los Ensayos Destructivos, sino que los complementan.

La confiabilidad de estos sistemas de inspección depende de su selección correcta, ya que cada una de estas tiene sus ventajas y desventajas, por lo que una mala elección traerá como consecuencia resultados poco confiables, así como pérdidas de tiempo y recursos.

Es importante mencionar que para lograr que los Ensayos no Destructivos sean confiables, los equipos así como los sistemas de inspección deben ser verificados semestralmente, además que existen normas y códigos de uso internacional exigiendo que el equipo sea calibrado y revisado en sus partes electrónicas al menos una vez al año por un taller autorizado por el fabricante.

El factor humano es otro elemento importante a considerar en los Ensayos no Destructivos ya que los inspectores deben ser capacitados y calificados,

también deberán tener una experiencia que permita asegurar que sus resultados sean lo más confiable posible. En México se está empezando a laborar para crear un organismo, el cual esté facultado y cuente con autoridad a nivel nacional para realizar actividades de certificación del personal que realiza los Ensayos no Destructivos.

Estos apuntes son una modesta invitación para adentrarse en el estudio serio de las Técnicas, tanto de Inspección Volumétrica como Superficial a partir de los libros que para ese fin se han elaborado.

**BIBLIOGRAFIA**

AUTOR: ASM  
TITULO: ASM HANDBOOK VOLUME 17  
EDITORIAL: ASM  
AÑO EDICION: 1989

AUTOR: ASM  
TITULO: METALS HANDBOOK VOLUME 7  
EDITORIAL: ASM  
AÑO EDICION: 1976

AUTOR: ASM  
TITULO: METALS ENGINEERING-DESIGN  
EDITORIAL: Mc. GRAW-HILL  
AÑO EDICION: 1965

AUTOR: R. HALMSHAW  
TITULO: INDUSTRIAL RADIOLOGY: THEORY AND PRACTICE  
EDITORIAL: APPLIED SCIENCE  
AÑO EDICION: 1982

AUTOR: E. F. KAEUBLE  
TITULO: HANDBOOK OF X-RAYS  
EDITORIAL: Mc. GRAW-HILL  
AÑO EDICION: 1967

AUTOR: K. Z. MORGAN AND J. E. TURNER  
TITULO: PRINCIPLES OF RADIATION PROTECTION  
EDITORIAL: JOHN WILEY & SONS  
AÑO EDICION: 1973

AUTOR: A. SURVEY  
TITULO: NON DESTRUCTIVE TESTING  
EDITORIAL: NASA  
AÑO EDICION: 1973

## GLOSARIO

<b>ANODO.-</b>	Polo Positivo
<b>BREMSSTRAHLUNG.-</b>	Palabra Alemana que significa radiación por frenamiento.
<b>CATODO.-</b>	Polo negativo
<b>EMULSION.-</b>	Preparación química sensible a la luz que recubre las películas fotográficas
<b>ESPECTRO.-</b>	Cuando un rayo de luz atraviesa un prisma y se recoge sobre una pantalla luz emergente, se obtiene una banda coloreada llamada espectro.
<b>ELECTROSCOPIO.-</b>	Instrumento que sirve para saber si un cuerpo está electrizado.
<b>ELECTRODO.-</b>	Cuerpo conductor que está en comunicación, por una parte con una pila o generador de electricidad, y por la otra con un medio sobre el cual ejerce la corriente una acción química.
<b>FLUORESCENCIA.-</b>	Propiedad que tienen algunos cuerpos de emitir luz cuando reciben ciertas radiaciones.
<b>FOTON.-</b>	Partícula de luz.
<b>GENETICO.-</b>	Herencia de los caracteres anatómicos y citológicos.
<b>HOJUELA.-</b>	Hoja larga angosta y sumamente delgada de algún material.
<b>INCLUSION.-</b>	Cuerpo extraño a la naturaleza química del material que se está examinando.
<b>ION.-</b>	Partícula electrizada en que se descomponen las moléculas de ciertos cuerpos y a los cuales, se debe la conductividad eléctrica.
<b>PELICULA.-</b>	Hoja de celuloide con una capa de gelatina- bromuro de plata sensible a la luz, la cual se impresiona, revela y fija.
<b>PENUMBRA.-</b>	Parte de la sombra de un cuerpo que recibe luz de algún elemento del cuerpo luminoso
<b>REOSTATO.-</b>	Es una resistencia que puede ser regulada o variada y que se intercala en un circuito.
<b>RADIOACTIVO.-</b>	Elemento cuyos átomos se desintegran con la expulsión de rayos gamma o partículas alfa y beta.
<b>SOMATIC.-</b>	Qué pertenece al cuerpo.

## RESUMEN BIOGRAFICO

### DATOS PERSONALES

NOMBRE: ING. ALFONSO GONZALEZ ZAMBRNO  
DOMICILIO: ISAAC GARZA # 1722 OTE.  
TELEFONO: 74 - 06-02  
LUGAR DE NACIMIENTO: MONTERREY, N.L.  
FECHA DE NACIMIENTO: ABRIL 30 DE 1950.  
EDAD: 45 AÑOS  
NACIONALIDAD: MEXICANA  
ESTADO CIVIL: CASADO  
No. R.F.C. GOZA-500430  
No. CEDULA PROFESIONAL: 700538

NOMBRE DEL PADRE: SR. ALFONSO GONZALEZ FLORES  
NOMBRE DE LA MADRE: SRA. OLIVIA ZAMBRANO GARCIA

LICENCIATURA: INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA, UANL..

POST-GRADO: MAESTRIA EN CIENCIAS DE INGENIERIA  
ESPECIALIDAD EN DISEÑO, DE LA FAC.  
DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DE LA U.A.N.L.  
PASANTE

### EMPLEOS Y PUESTOS:

MAESTRO DE TIEMPO  
COMPLETO DE F.I.M.E. 1978 A LA FECHA

JEFE DE LA ACADEMIA DE  
FISICA V E INSTRUMENTACION 1978 - 1990

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE  
FISICA 1990 A LA FECHA



