

ENSAYO DE RADIACIONES X Y GAMA EN LA INDUSTRIA

BARRANQUILLA Dic. de 1988



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE "S E N A"

CENTRO INTERNACIONAL COLOMBO ALEMAN

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES

TEMA: ENSAYO DE RADIACIONES X Y GAMMA EN LA INDUSTRIA

PRESENTADO POR: INGENIERO GERARDO GONZALEZ RANGEL

BARRANQUILLA, DICIEMBRE DE 1988

(1659) 5/01/01532

I N D I C E

	PAGS.
INTRODUCCION.....	1
OBJETIVOS.....	4
1. FUNDAMENTOS TEORICOS.	
1.1. SEGURIDAD RADIOLOGICA	5
1.1.1. ELEMENTOS Y NÚCLIDOS	5
1.1.2. FENÓMENO DE LA RADIOACTIVIDAD	7
1.1.3. RADIACIONES IONIZANTES	9
1.1.4. MECANISMOS DE IONIZACIÓN GAMMA Y X.....	11
1.1.5. MAGNITUDES Y UNIDADES DE RADIACIÓN	12
1.1.6. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN	17
1.1.6.1 NORMAS DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA	21
1.1.7. NORMAS DE SEGURIDAD EN RADIOGRAFÍA INDUS- TRIAL.....	22
1.1.8. COMPENDIO SOBRE LOS PELIGROS DEBIDOS A LA RADIACIÓN.....	24
1.1.9. REGLAMENTO PARA LA EXPOSICIÓN DEL PERSONAL A UNA RADIACIÓN IONIZANTE.....	27
1.2 NATURALEZA Y PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE LAS RADIACIONES X Y GAMMA.....	31
1.2.1 ESTRUCTURA DEL ATÓMO.....	32
1.2.3 UNIDADES.....	34
1.2.4 PRINCIPIOS DE RADIOLOGÍA.....	36
1.2.5 PELÍCULAS RADIOGRÁFICAS.....	54
1.2.5.1. GENERALIDADES.....	54
1.2.5.2 CARACTERÍSTICAS.....	56
1.2.5.3 REVELADO.....	57
1.2.5.4 FIJADO	62
1.2.5.5 PELÍCULAS RADIOGRÁFICAS COMERCIALES	64

2.	ESTRATEGIAS DE APRENDIZAJE.....	67
2.1	EQUIPOS.....	67
2.2	ELEMENTOS.....	68
2.2.1	DENSITÓMETROS.....	68
2.2.2	INTESÍMETRO DE RADIACIÓN.....	69
2.2.3	DOSÍMETROS DE LECTURA DIRECTA.....	72
2.2.4	INDICADORES.....	74
2.3	PROCEDIMIENTO PARA TOMAR UNA RADIOGRAFIA	78
2.3.1	SEGURIDAD RADIOLÓGICA.....	78
2.3.2	INSTALACIÓN DEL EQUIPO.....	78
2.3.2.1	TENSIÓN ANÓDICA.....	78
2.3.2.2	COLOCACIÓN DE LA MANGUERA PARA REFRIGERAR	79
2.3.2.3	COLOCACIÓN DE LA ALARMA.....	79
2.3.2.4	COLOCACIÓN DE CABLES ELÉCTRICOS.....	79
2.3.3	CÁLCULOS DE LA DISTANCIA DE LA PIEZA.....	79
2.3.4	CÁLCULO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN.....	80
2.3.4.1	CÁLCULO DEL KILOVOLTAJE.....	81
2.3.4.2	CÁLCULO DEL MILIAMPERAJE.....	81
2.3.5	COLOCACIÓN DE LA PELÍCULA EN LA PIEZA Y EL PENETRÁMETRO.....	81
2.3.6	ACCIONAMIENTO DEL PANEL EN LA CAJA DE CONTRO- LES.....	84
2.3.7	CONDICIONES INICIALES DEL EQUIPO.....	84
2.3.8	REVELADO DE LA RADIOGRAFÍA.....	85
3.	ESTRUCTURAS DE EVALUACION.....	86
3.1.	CÁLCULOS.....	86
3.2.	OBSERVACIONES.....	86
3.3	CONCLUSIONES.....	87
3.4	CUESTIONARIO.....	88
	PLACA RADIOGRÁFICA.....	89
	PATRONES INTERNACIONALES.....	90
	BIBLIOGRAFIA.....	91

INTRODUCCION

Dada la importancia que presentan las clases de radiaciones X y Gamma en la industria y más que todo en lo que se refiere a soldaduras, hemos decidido hacer este informe de la forma más detallada posible, aunque no pretendiendo desmenuzar un curso de radiología industrial, sino tan solo emitir las concepciones más importantes de este tan interesante tema. Entre tales concepciones podemos enunciar Seguridad Radiológica, que es quizás la más importante, equipos y dispositivos empleados, manejos o accionamiento de los mismas, propiedades de la radiación y tanto otros apartes que son de suma importancia para llevar a cabo este tipo de ensayo al cual pertenece a los no destructivos.

En el informe aparece una serie de gráficas relacionadas íntimamente con el tema, al igual que prácticas recomendadas para la inspección de uniones soldadas, que no deben ser consideradas, repito, como curso de radiología industrial sino como una información necesaria de las características de utilización de los equipos de rayos X y alguna información breve sobre fuentes de rayos Gamma, también sobre las leyes física fundamentales que rigen la formación de la imagen radiográfica y sobre aquellos detalles de las condiciones operatorias que han de conducir a la obtención de los mejores resultados.

Viene detallado también en este informe el análisis de placas a radiográficas de cordones de soldadura con sus defectos generables. Este análisis se hace por medio de una pantalla fluoroscópica. Esto es importante, pese a que aún no sabemos interpretar de un todo una película radiográfica al menos nos formamos una idea de lo que esto puede ser. Cada placa presenta consigo la imagen radiológica de un cordón de soldadura el cual tiene un defecto definido y nosotros debemos aprender a reconocerlo.

Del equipo de rayos X, se puede decir que se conocieron los elementos dispositivos fundamentales y accesorios que intervienen en una toma de muestra radiográficas. De su accionamiento se efectuó tan solo un simulacro debido que para dicho accionamiento se requieren las medidas de seguridad necesarias para evitar en lo posible el menor efecto de radiación.

Se optó entonces por hacer un reconocimiento detallado del equipo, ello es, su estructura, funcionamiento (simulado), principios y lo más importante, que es tener que puede temer para con nosotros y para los demás materiales.

Intervienen también en el informe las normas de aceptación, como algo importante ya que son demasiadas las causas que afectan a una unión soldada para que esta pueda ser enjuiciada por la sola presencia de unos defectos, cuya importancia a su vez depende de un gran número de factores pues un defecto de tamaño y naturaleza determinadas puede ser admitido en una zona de una pieza poco sometida a tensiones y no ser **admisibles** en otra zona más crítica de la misma pieza.

Los anexos del informe corresponden en su totalidad al análisis de los defectos en los cordones en distintas placas que vienen numeradas. Si en algunos parece sencillo la práctica de la radiología, esto puede ser verdad, si ha tomado todas las medidas de seguridad radiológica y está conciente del peligro que para nosotros representa una práctica irresponsable de la emisión de radiación X o Gamma.

Debido a la expuesta anteriormente se ha desarrollado un poco extenso este informe, sin intentar salirnos de la temática; No obstante sabemos que el estudio de esto es muy amplio y que solo aquí se han tenido en cuenta los principios, concepciones y factores más sencillos en dicho estudio.

OBJETIVOS

- Conocer en forma precisa y detallada el equipo de Rayos X Scanray.
- Aprender su funcionamiento de una forma teórica dada la imposibilidad de ejecución por falta de protección idónea.
- Aprender y asimilar las normas de seguridad radiológica como lo más importante en radiología industrial.

1. FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 SEGURIDAD RADIOLOGICA.

Consideramos la seguridad como el factor más importante en cualquier campo industrial. La seguridad radiológica es primordial en estas experiencias y por ende es necesario tener muy claras las pautas que se dan en los distintos cursos de radiología el cual comprende tres niveles.

Para la seguridad radiológica el operario o radiólogo debe comprender algunas concepciones importantes que se lleva a cabo en estas experiencias acompañadas de fenómenos físicos y químicos los cuales pueden en un momento dado servir para analizar cualquier anomalía que se presentare.

Es imprescindible para el radiólogo conocer los agentes o partículas por decirlo así, que intervienen en el fenómeno de la radioactividad. Así, tenemos como partícipes de dicho fenómeno :

1.1.1 Elementos y Núclidos.

Elemento químico es un conjunto de átomos caracterizados por el número de protones, los protones son partículas indivisibles cuya masa en reposo es de aproximadamente 1836 veces mayor que la del electrón, la cual para el electrón en reposo es de $0,11 \times 10^{-30}$ kg. El protón está dotado de una carga eléctrica fundamental positiva; excepcionalmente hay protones negativos llamados anti-protones. Los electrones están dotados de una carga eléctrica elemental negativa de $1,60 \times 10^{-19}$ coulombios. Existen también

electrones positivos llamados positrones. También pertenece a un elemento químico los neutrones que son partículas indivisibles cuya masa en reposo es 1839 veces mayor a la del electrón y carecen de carga eléctrica. Los neutrones, este el nombre genérico que abarca a protones y neutrones. El conjunto de protones, neutrones y electrones constituyen el átomo o mejor, uno de los átomos del elemento. El elemento del átomo es una partícula divisible compuesto de un núcleo central integrado principalmente por nucleolos y de un conjunto de electrones negativo que giran alrededor de dicho núcleo. El radio de núcleo depende del número de nucleones y esta comprendido entre 1,4 y 9 tentómetros (tento = 10^{-10}). El radio total del átomo va de 0,64 unidades Angström para el más pequeño que es el fluor, hasta 2,67 A para el mayor que es el del Cesio ($1 \text{ A} = 10^{-10} \text{ m}$).

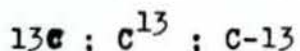
Debe tenerse en cuenta que el carácter químico esencial de un elemento está determinado por el número de protones del núcleo. Para cada elemento hay un número fijo de protones en cada átomo del elemento, y para cada número fijo de protones en cada átomo corresponde un solo elemento químico, o sea hay correspondencia biunívoca entre cada elemento y el número de protones de los átomos que lo forman. Los electrones solo determinan características químicas que podrían llamarse accesorios, como son las valencias, la mayor o menor reactividad y si se quitan o aumentan electrones a un átomo, no por eso dejan de pertenecer al mismo elemento; en cambio basta con quitar a un solo protón o aumentarlo para que se convierta en un elemento químico diferente al original.

Núclido es un conjunto de átomos caracterizados por el número de protones y por el número de neutrones y, en ciertos casos en que estos dos números no basten por el nivel de energía. Todo núclido pertenece a determinado elemento químico; de cada elemento químico hay varios núclidos.

Los números Z, N y A corresponden al número de protones, neutrones y nucleones respectivamente que hay en cada elemento de un átomo de un núclido de donde se desprende :

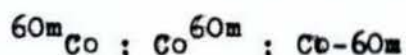
$$A = Z + N$$

La notación de los núclidos se designa mediante el símbolo del elemento químico al cual pertenece y su número de nucleones (número A). Ejemplo: para designar el núclido que tiene 6 protones y neutrones en cada uno de sus átomos se escribe así :

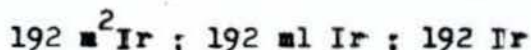


La primera es la moderna, la segunda sigue siendo usual, la tercera es para la facilidad en la escritura a máquina.

Otro ejemplo sería : Para designar el núclido que tiene 27 protones y 33 neutrones y que está a mayor nivel de energía (por que hay dos núclidos diferentes con 27 protones y 33 neutrones:



La "m" alusiva al número de nucleones es una abreviatura de "Metaestable". Cuando se escribe ${}^{60}\text{Co}$ simplemente se alude al núclido de menor nivel de energía. Si son tres los núclidos que tienen igual los números "A" y "Z", se asigna "m" al de mayor energía, "ml" al de nivel intermedio y solamente el símbolo químico y el número "A" al de menor nivel. Ejemplo :



Entre los núclidos intervienen los Isótopos, que son núclidos cuyos átomos tienen igual número "Z" y diferente número "N" y "A". Los Isótopos son núclidos cuyos átomos que tienen igual "Z", igual "N" y por tanto igual "A". Al igual que existe la tabla periódica de elementos, existe también la tabla de núclidos que tiene más de 1900 casillas.

1.1.2 Fenómeno de la Radioactividad.

Para el estudio del fenómeno de la radioactividad se precisa conocer conceptos como :

- **Núclidos estables** : Son aquellos cuyos núcleos conservan su composición y energía a través del tiempo, mientras no sufran ataques externos. Hay que advertir que la acción química por violenta que sea jamás llega a afectar la estructura del núcleo.
- **Núclidos radioactivos** : Son aquellos que se cambian en otros núclidos, de manera espontánea y gradual a través del tiempo. Se llaman también radionúclidos y radioisótopos. Ejemplo :
N - 16 ; Cl - 36 ; Au - 198
- **Radioactividad** : Es el cambio espontáneo y gradual de un núcleo en otro núcleo.
- **Desintegración** : Es el cambio espontáneo de un átomo individual en otro átomo. Ejemplo : Uno de los átomos del radionúclido C-14 en un instante dado y de manera espontánea se cambia en un átomo individual de N-14.
- **Actividad** : Es el número de desintegraciones por unidad de tiempo. Nótese que según las definiciones que preceden, radioactividad es el fenómeno, entanto que actividad es la medida o cuantificación del fenómeno.
- **Unidad de Actividad** : (Existentes)
 - * **Becquerilia (Bq)** : es la unidad de actividad en el sistema internacional; es igual a una desintegración por segundo.
 - * **Curio (Ci)** : Se define como $3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo o $3,7 \times 10^{10}$ Bq.
- **Período Físico** : Se denomina también período de Semidesintegración o vida media. Es el tiempo que se requiere para que la actividad de un radionúclido quede reducida a la mitad de su valor inicial.
El período físico es una constante propia de cada radionúclido

do. No se altera con la presión, la temperatura, la dilución, la acción química ni otra acción externa. Existen periodos desde fracciones de segundo hasta miles de años. Ejemplo : Para el N-12 el periodo es 11 milisegundos y para el Hafnio -174 el periodo es de 2×10^{15} años.

- Decaimiento radioactivo : Es la actividad de los núclidos disminuye a través del tiempo rápida o lentamente dependiendo del término del periodo.

La fórmula para el decaimiento radioactivo es :

$$A = A_0 \cdot 1^{-\frac{t \ln 2}{T}}$$

en la cual* : A_0 = Actividad a tiempo cero (inicial)

t = Tiempo transcurrido a partir del tiempo cero hasta el momento del cálculo.

T = Periodo del radionúclido

1 = Base de los logaritmos naturales

A = Actividad a tiempo deseado

La única condición para el cálculo es que tanto T como t se encuentren en las mismas unidades de tiempo.

1.1.3 Radiaciones Ionizantes.

Las radiaciones nucleares como Alfa, Beta más, Beta menos y Gamma (y también las extranucleares como los rayos X), al incidir sobre átomos y moléculas, formarían pares de iones, por procesos específicos para cada una de ellas. En general se puede decir que la ionización causada por las radiaciones nucleares y extranucleares se reduce casi exclusivamente a la extracción de un electrón del átomo o de la molécula afectada.

- La radiación nuclear alfa, son partículas compuestas de dos neutrones y dos protones que salen del núcleo de los átomos de ciertas radionúclidos. Estas partículas doblemente carga

das, son relativamente lentas y son muy ionizante y a pesar de sus energías altas su poder de penetración es extremadamente limitado.

- La radiación nuclear Beta-menor : son electrones negativos de ciertos radionúclidos. Salen de los núcleos inmediatamente después que un neutrón se convierte espontáneamente en protón.

- La radiación nuclear Beta-más : Son electrones positivos que salen del núcleo de los átomos de ciertos radionúclidos cuando un protón se convierte espontáneamente en neutrón.

- La radiación nuclear Gamma : Son ondas electromagnéticas que por sí misma no tienen masa ni carga y que salen del núcleo de ciertas radionúclidas en el momento en que dicho núcleo pasa a nivel inferior de energía, sin cambiar en su composición.

También se producen rayos Gamma después de la emisión de rayos Beta-más porque el electrón positivo, en cuanto haya perdido casi toda su energía cinética, se aniquila mutuamente con el primer electrón negativo, sea orbital o libre, que halle en su trayectoria. La masa de ambos electrones se convierte cuantitativamente en dos rayos Gamma, conversión de masa energía, pero este proceso ocurre fuera del núcleo.

- La radiación nuclear X : Son ondas electromagnéticas que salen de la región de electrones de un átomo cuando se produce el reajuste electrónico, pasada de electrones a niveles inferiores de energía.

Los rayos X se diferencian de los Gamma por su procedencia. Los rayos Gamma son originarios del núcleo del átomo o como resultado de la aniquilación de electrones de signo contrario, los rayos X se originan en la región electrónica del átomos. Su penetración depende de la energía promedio que posean.

- Energía de las radiaciones : Toda radiación nuclear al salir del átomo está anotada o dotada de una energía determinada

que cede la materia a lo largo de su trayectoria, cesión que se manifiesta en cambios físicos, químicos y biológicos.

Las partículas alfa tienen energías entre 4 y 9 MeV. La mayor parte de las partículas Beta-menor, Beta-más y Gamma tienen energías comprendidas entre 4 y 50 MeV.

La energía de los rayos X depende del kilovoltaje aplicado, de la filtración inherente y de la filtración agregadas.

- Ionización : Es la división de un átomo o de una molécula en dos porciones eléctricamente cargadas. Por ejemplo : al disolver NaCl algunas de las moléculas se dividen en átomos de Cl de 17 protones y 18 electrones. Los primeros tienen una carga meta elemental positiva y los segundos tienen carga de igual cuantía pero negativa. Cada una de estas partículas es un ión. Al conjunto ión positivo-negativo se le denomina "Par Iones".
- Ionización causada por Radiaciones : Las radiaciones nucleares Alfa, Beta más y Beta menos y Gamma (también las extranucleares como los rayos X), al incidir sobre átomos y moléculas formarían Pares Iones, por procesos específicos para cada una de ellas. En general se puede decir que la ionización causada por radiaciones nucleares y extranucleares se reduce casi exclusivamente a la extracción de un electrón del átomo o de la molécula afectada. La sustancia o aparato capaz de emitir radiaciones ionizantes son las llamadas Fuentes.
- Blindaje : Es toda sustancia interpuesta entre una fuente y un sitio de interés. Ejemplo : el chaleco plomado de una persona que opera un equipo de rayos X y el pecho a porción del cuerpo que cubra tal prenda en el operados.

1.1.4 Mecanismos de Ionización Gamma y X.

- a. Efecto Fotoeléctrico : Consiste en que un fotón cede la totalidad de su energía a un electrón, al cual arranca del átomo.

mo. El fotón queda degradado y cambia la dirección de su trayectoria, lo que se puede tener en cuenta para efectos de protección radiológica.

- b. Producción de pares : Cuando un fotón tiene energía mayor que 1,022 Mev (energía equivalente a la masa de los electrones en reposo y pasa por el campo eléctrico de un núcleo), puede formar dos electrones de distinta carga: Un positrón y un electrón negativo. Los dos son arrojados del átomo. El electrón negativo con cierta energía cinética se comporta como una partícula Beta menos. El positrón, mientras tenga energía Cinética continua disipando energía, como lo haría cualquier partícula Beta más. En cuanto se agota su energía el positrón entra en contacto con un electrón orbital o con uno libre y estas dos partículas se aniquilan mutuamente, con la formación de dos rayos Gamma de 0,511 Mev cada rayo parte en sentido opuesta al otro.

1.1.5 Magnitudes y unidades de radiación.

- Exposición :: Es la medida de la ionización producida por los rayos X y Gamma sobre el aire. Es el cociente entre la carga eléctrica de todos los iones de un signo producido por fotones (X o Gamma). Es un elemento de volumen de aire y la masa de dicho elemento.

Nota 1 : La definición de Exposición habla de la acción de fotones y se refiere al efecto en el aire; por consiguiente es aplicable únicamente a rayos X y Gamma como causa y al aire como absorbedor. De ningún modo es apropiado hablar de Exposición para radiaciones Beta, Alfa y neutrones.

Nota 2 :: Se ha convenido permitir la expresión Exposición en tal punto del interior del cuerpo, pero debe entenderse como la exposición que habría en ese punto si estuviera ocupado por un pequeño volumen de aire.

La unidad de exposición es el Roentgen,, el cual corresponde a $2,58 \times 10^{-4}$ columbios por kg de aire. Esta es la definición moderna del Roentgen y reemplaza a la antigua que emitía el sistema C.G.S., una unidad de carga electrostática de 0,00129 gramos de aire. Por lo tanto nos existe diferencia alguna.

$$1 R = \frac{1 \text{ U. e. S.}}{0,081293 \text{ gr}} \times \frac{10^3 \text{ grs}}{1 \text{ kgs}} \times \frac{1 \text{ coul}}{3 \times 10^9 \text{ u.e.s}} = 2,58 \times 10^{-4}$$

$$1 R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ coulomb/kgs}$$

- Dosis : Es la medida de la transferencia de energía de cualquier radiación a cualquier sustancia. Es el cociente entre la energía impartida por la radiación ionizante a un elemento de volumen de materia y la masa de dicho elemento.

Se aplica a cualquier radiación ionizante y se refiere al efecto sobre cualquier absorbedor. Las unidades de dosis son :

- a. El Gray (Gy) : Es la unidad de dosis en el sistema internacional, que corresponde a la transferencia de 1 joule a 1 kg de sustancia irradiada.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule} \times 1 \text{ kg}^{-1}$$

- b. El Rad (Rd) : Es la unidad de dosis en el sistema C.G.S., que corresponde a la transferencia de 100 ergios a 1 gramo de sustancia irradiada.

$$1 \text{ Rd} = 1 \text{ ergio} \times 1 \text{ gr}^{-1} \times 100$$

Ahora, puesto que 1 joule = 10^7 ergios, entonces :

$$1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ joule}}{\text{kg}} \times \frac{10^7 \text{ ergios}}{1 \text{ joule}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{g}} \times \frac{1 \text{ rd}}{100} \times \frac{1 \text{ gr}}{\text{ergio}}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$$

- Factor de Calidad : Es un factor que nos indica cuanto peligro radiactivo tienen las diversas radiaciones. Se toma como

referencia el peligro de las rayos X cuyo factor de calidad es 1.

A continuación se da una tabla de factores de calidad para las diferentes radiaciones :

TIPO DE RADIACION	FACTOR DE CALIDAD
Gamma, Beta, X	1
Neutrones Térmico	2,5
Neutrones rápidos	10
Protones	10
Partículas Alfa neutrales	10
Núcleo pesados	3,0

- **Equivalente en Dosis :** Es la medida del daño biológico de cualquier radiación sobre un mamífero. Cuantitativamente es el producto de la dosis absorbida por el factor de calidad.
- **Unidades de equivalente en Dosis :** Puesto que existen dos unidades de dosis existen por ende dos unidades de equivalente en dosis, las cuales son :
 - a. **Sievert (Sv) :** Es la dosis de cualquier radiación ionizante, que aplicada a un mamífero causa el mismo efecto biológico que 1 Gy de rayos X.
 - b. **Rem, rem :** Es la dosis de cualquier radiación ionizante, que aplicada a un mamífero causa el mismo efecto biológico que 1 rad de rayos X.

En el caso de la radiografía industrial solamente se opera con

radiaciones X y Gamma y por lo tanto a cada Roentgen corresponde un rad y también un rem, y también es válida la correspondencia :: A cada Roentgen corresponde 1 Gy y también un 1 CSV.

- Índice de Exposición : Es el cociente entre la exposición y el tiempo para un instante dado. Si la exposición se acumula en un punto de interés a ritmo constante (en cada segundo se adiciona la misma exposición que en el segundo anterior) por lo que es válida la fórmula :

$$I = E/t$$

En la que I es el índice de exposición, E la exposición, t el tiempo durante el cual se acumula la exposición a ritmo constante. Las unidades correspondientes serán :

$$R/h , mR/h , R/min , etc.$$

- Índice de Dosis : Es el cociente entre la dosis y el tiempo para un instante dado. Las respectivas serán :

$$rd/min , mrd/min , etc.$$

Cuando se diga para el índice de exposición será aplicable al índice de dosis, sin más cambio que el correspondiente a las unidades del numerador.

1.1.6 Efectos biológicos de la Radiación.

- Mecanismo del daño biológico. La radiación ionizante es nociva para los seres vivos. El daño biológico ocurre por dos mecanismos :

- a. El de acción directa : La radiación transfiere su energía a masas muy pequeñas (alto cociente energía/masa); cuando esta acción ocurre el núcleo de las células o muy cerca de él, resulta grave daño a nivel celular; asimismo la ionización afecta otras sustancias de vital importancia como las enzimas.
- b. El de acción indirecta : La radiación rompe moléculas de agua. Los productos inmediatos de tal ruptura son de dos tipos : Iones (eléctricamente cargados) y radicales libres (partículas sin carga eléctrica pero con fuerte tendencia entre sí con enlaces covalentes). Los iones tienen gran reactividad química que se ejerce sobre las moléculas de la célula entre los radicales libres, de los cuales figura el OH neutro que, al combinarse con otro OH neutro da agua oxigenada, el cual actúa sobre las moléculas del DNA, RNA, sobre las cromosomas y sobre las enzimas.

Es distinta la radiosensibilidad de las diferentes tejidos y células de una persona. La ley de Bergonie y Tribondeau dice : "La sensibilidad de un tejido o de una célula ante la radiación es directamente proporcional a su capacidad reproductora e inversamente proporcional a su grado de diferenciación".

Las dosis agudas que son las recibidas en un día o menos, produce mayor daño que las dosis crónicas que son las recibidas en un lapso de más de un día para igual tejido e igual órgano afectado.

Siendo iguales los demás factores, el efecto es más grave cuanto mayor es la dosis; y para una misma dosis es más grave cuando

to mayor sea la porción de un órgano que sufra irradiación.

400 rads en todo el cuerpo causan elementos o efectos nocivos claramente observables; 20 rads en todo el cuerpo no producen efectos clínicamente observables; 750 rads que afectan todo el cuerpo causan la muerte. Si alcanzan a afectar tan solo la mano puede no matar a nadie.

Simplificando los datos de un gráfico de nucleonios fundamentales se llega a la tabla siguiente :

**RADIOPATIA Y MUERTE POR DOSIS AGUDAS
EN TODO EL CUERPO**

DOSIS	% CASOS RADIOPATIA	% CASOS MUERTE
50	0	0
100	5	0
150	20	0
200	45	0
250	75	3
300	90	10
350	98	20
400	100	38
450	100	50
500	100	70
550	100	80
600	100	90
650	100	96
700	100	98
750	100	100

Entre los efectos somáticos y genéticos de la radiación ióni

zante al individuo tenemos :

- Daños a la piel : Eritema, depilación, necrosis de la piel y de los tejidos vecinos. La piel se enrojece y presenta aspecto séco y quebradizo, en especial debajo de las uñas; se puede desarrollar cáncer en la piel que se extiende a veces a otras partes del cuerpo.

- Esterilidad temporal o permanente, si se irradian las gónadas muy sensibles.

- Daño de los ojos (formación de cataratas).

- Cáncer (leucemia).

- Alteraciones sanguíneas, fuerte descenso de la cuenta de glóbulos rojos, entre cuyas funciones figuran las de combatir infecciones y eliminar las sustancias tóxicas del cuerpo por lo que el individuo queda sin defensas ante estos agentes. La leucemia puede aparecer varios años después de la irradiación.

- Probabilidad de acortamiento vital (entre 5 y 10 días para cada Roentgen de exposición a todo el cuerpo).

- La muerte.

Entre los efectos sobre la especie tenemos que :

Las células humanas tienen 23 pares de cromosomas; cada cromosoma tiene al rededor de mil genes. Hay tres causas de aberraciones de los cromosomas y mutaciones en los genes; Enfermedades, agentes químicos y radiación ionizante. La radiación actúa por

la ionización en el núcleo o cerca de él (teoría del Impacto). La inmensa mayoría de las mutaciones es nociva. En los seres humanos se presenta en diversas formas físicas o mentales de los descendientes. El número de las mutaciones genéticas es proporcional a la dosis absorbida por las padres desde el comienzo de desarrollo de las gónadas hasta el momento de la procreación de allí la necesidad de limitar en lo posible la irradiación de los miembros de la población.

La dosis media letal es aquella dosis que habiendo afectado la totalidad del cuerpo de un individuo implica una probabilidad de muerte igual al 50% (450 Rads). Los síntomas de irradiación aguda en todo el cuerpo según OIEA colección de seguridad No 2, 1960 son : 0-25 rems : Ningún efecto clínico detectable, ningún efecto diferido probable.

- 50 rems : Ligeros cambios pasajeros en la sangre, ningún otro efecto clínico detectable, posibles efectos diferidos no grave en un individuo medio.
- 100 rems : Náusea y fatiga con posibles vómitos, cambios marcados en la sangre con reestablecimiento diferido, acortamiento de vida.
- 200 rems : Náusea y vómitos en las primeras 24 horas. A continuación del período latente de una semana, caída del cabello, pérdida del apetito, debilidad y síntomas tales como diarrea, irritación de garganta, posible fuerte; de no haber complicaciones por salud anterior posible reestablecer.
- 400 rms : Náusea y vómito al cabo de una o dos horas. Después de un período latente de una semana, caída del cabello, pérdida del apetito, debilidad, fiebre, inflamación grave de boca y garganta; en la tercera semana : palidez, diarrea, hemorra

gia nasal y rápida extenuación hacia la cuarta semana. Muerte y del 50% de los individuos irradiados a partir de la tercera semana.

- 600 rems : Náusea y vómito al cabo de una o dos horas. Corto período latente a partir de la náusea inicial. Diarrea, vómitos, inflamación de boca y gargante hacia el final de la primera semana. Finalmente fallecimiento probable de todos los individuos irradiados.
- El índice de exposición causada por emisores Gamma es directamente proporcional a la actividad absoluta "Ca" e inversamente proporcional al cuadrado de las distancia entre la fuente y el punto considerado.

Si llamamos "K" la constante de proporcionalidad tenemos que:

$$I_0 = K Ca \times (d^2)^{-1}$$

Tomando Ca del curio o sea, tomando Ca de 1 curio y "d" de 1 metro, tendremos la definición de "K" y sería:

Constante específica de emisores Gamma es el índice de exposición que causa un curio, de actividad de una fuente ideal a 1 metro de distancia. La constante específica de emisores Gamma es característica de cada radionúclidos emisor Gamma.

Las constantes específicas para las dos emisores Gamma más comunes usados en Gammagrafia industrial son :

$$\begin{aligned} \text{Ca-60 : } K &= 1,33 \text{ R} \times \text{m}^2/\text{hx Ci} \\ \text{Ir-192: } K &= 0,50 \text{ R} \times \text{m}^2/\text{hx Ci} \end{aligned}$$

En cuanto al blindaje de los materiales se puede decir que un material es de mejor blindaju cuando mayor número "z" tenga y

más alta densidad tenga: así tenemos que :

Uranio : Z = 92 - densidad : $19,07 \text{ g/cm}^3$

Plomo : Z = 82 densidad : $11,40 \text{ g/cm}^3$

Hierro : Z = 26 densidad : $7,860 \text{ g/cm}^3$

El uranio es de mejor blindaje que el plomo y este a su vez que el hierro.

Por casualidad los cinco blindajes más usados para emisores Gamma van de inferior a superior en orden alfabético: Agua, concreto, hierro, plomo y uranio.

1.1.6.1 Normas de seguridad radiológica.

- Dosis máxima permisible DMP, es la mayor dosis que puede recibir el cuerpo o un órgano del individuo y a la luz de los actuales conocimientos no causará efecto noclínicamente observable.

Las personas profesionalmente expuestas a las radiaciones ionizantes son las que en virtud de la naturaleza de su trabajo se hallan en peligro de recibir radiaciones diferentes a la radiación natural.

La dosis máximas permisibles para personas profesionalmente expuestas a las radiaciones ionizante son :

ORGANO AFECTADO	DMP ANUAL	DMP TRIMESTRE
Cuerpo, gónadas medula ósea roja	5 rams	3 rams

Manos, antebrazos	75 rns	40 rems
pies, tobillos		
Huesos, tiroides,	30 rems	15 rems
piel de todo el		
cuerpo		
Organos restantes	15 rems	8 rems

Para los miembros de la población la DMP se especifican únicamente por año y son la décima parte de la DMP de exposición ocupacional.

- Seguridad que brindan todas las DMP : Toda radiación ionizante, por pequeña que sea, algún daño causa en el organismo. Según esta premisa se debe tratar que la dosis se mantenga al nivel más vajo que se pueda conseguir y que no sobrepasen los límites de las DMP. La DMP ha sido determinada muy prudentemente y están muy por debajo de las dosis que producen daños clínicamente observables. Por ejemplo : Una dosis aguda de 25 rems que afecte todo el cuerpo, no produce ningún efecto clínicamente observable y probablemente ningún efecto diferido y no obstante la DMP anual para todo el cuerpo es de solo 5 rems.

1.1.7 Normas de seguridad en Radiografía Industrial.

- Protegerse y proteger a los demás con los tres factores : tiempo, distancia y blindaje. Así tenemos que :
 - a. Tiempo : El tiempo total de exposición personal deber ser

el mínimo compatible con el trabajo.

- Distancia : La distancia fuente-persona debe tener o ser la máxima razonable. Así : durante la extracción y retracción de la fuente, hay que aprovechar las longitudes combinadas de la conducción de la fuente y del cable de empuje y tracción durante la exposición; permanecer alejado de la fuente en un sitio donde el índice de exposición sea lo menos posible, sin entorpecer el trabajo. No obstante esto lleva consigo el blindaje.
- Tener y usar por lo menos un intensímetro por cada fuente y un dosímetro por cada persona que opere fuentes. Estos instrumentos deben chequearse rutinariamente en cuanto a su funcionamiento y calibración.
- Es necesario anotar las dosis recibidas por el personal cada mes. Se puede establecer una hoja o libro-tarjeta por persona.
- Casos de sobre exposición : Toda violación de las DMP, debe investigarse de manera completa para establecer su causa y en consecuencia tomar las medidas necesarias.

Además de cumplirse y hacer cumplir las normas anteriores se deben tener en cuenta las siguientes normas de sentido común :

- No situarse jamás frente al tubo, en el haz de rayos X, ni acercarse al mismo durante las irradiaciones, a causa del peligro de la irradiación dispensada por efectos Compton.
- No dirigir el haz a oficinas, talleres, corredores u otros sitios donde halla gente, a menos que halla blindaje adecuado y

suficientemente comprobado.

- Operar la Consola a la mayor distancia del tubo.
- Con alguna frecuencia conviene hacer funcionar el equipo a bajo kilovoltaje, para examinar con un intensímetro si hay escapes de radiación por sitios diferentes a la ventana.
- Conviene disponer de un dosímetro de lectura directa para leerlo después de cada operación y cerciorarse de que los procedimientos de operación son adecuados a la seguridad radiológica. *
- Hay que indicar claramente con señales luminosas y avisos, que el equipo está en operación.

1.1.8 Compendio sobre los peligros debidos a la Radiación.

Todo el mundo sabe que la radiación Gamma (rayos X) es potencialmente peligroso para la salud. Sin embargo la naturaleza de este peligro no se comprende claramente. En particular las notables medidas de seguridad desplegadas cuando se emplea fuentes radiactivas con fines industriales son desconocidas por el público. La seguridad no es noticia aunque las accidentes si lo son de verdad. La utilización de la radiactividad con fines industriales es una de las especialidades más seguras en cuanto a tiempo perdido por accidente.

La cantidad de radiación se mide en Roentgens (R). Si 2080 millones de pares de iones se produce en un cm^3 de aire a 0°C a presión atmosférica como resultado de una radiación se dice entonces que la dosis de la radiación es de 18.

1 Roentgen es un valor de radiación mucho más alto del que un operario puede recibir en un período razonable de tiempo, aunque esta dosis cabe suponer que no le perjudicaría. Las dosis letales están alrededor de los 500 R. Las dosis más pequeñas se miden en mili Roentgen. Para expresar el Roentgen en términos de corriente eléctrica sería necesario una dosis de 3 millones de Roentgen para obtener en un sencillo aparato para detectar la radiación una lectura de 1 mA.

El peligro para la salud que supone una dosis de 1 R nos preocupa mucho más que el efecto de dicha dosis en el aire. El cuerpo humano es de tejidos mucho más pesados que el aire y la cantidad de ionización y efectos causados son mucho mayor en el cuerpo humano. Una exposición de una dosis de 1R equivale a una dosis de 95 ergios x gramo de tejido humano lo que equivale a una ionización de una molécula en cada 20×10^{12} molécula del cuerpo. Los aspectos médicos del daño causado por radiaciones ionizante son de tipo somática o genético, los cuales requieren dosis muy elevadas para producirse.

Observando en la tabla de dosis se concluye que las dosis mortales están entre los 500R pero algunas personas son más resistentes que otras a la radiación.

La medida que la dosis de radiación sobre los tejidos se mide en rads. Un rad es una dosis que corresponde a la absorción de 100 ergios de energía por gramo de tejido, ya que 1R representa 87 ergios de energía, $1R = 0,87 \text{ rad}$. Las diferencias entre un Curie, un Roentgen y un rad deben tenerse muy en cuenta así :

El curie mida la cantidad de material radiactivo.

El Roentgen mida la cantidad de radiación producida por dicho material.

El Rad mide la dosis absorbida de esta radiación.

La tabla siguiente muestra que la dosis absorbida en Rads por Roentgen de exposición es mayor en los huesos que en los músculos; la justificación de este hecho se debe a que los materiales de peso atómico más alto absorben los rayos X mejor que los materiales de peso atómico más bajo.

RADIACION ENERGIA	RADS	RADS
KeV	en los músculos	en los huesos
50	0,926	3,58
100	0,948	1,45
200	0,963	0,979
500	0,957	0,925
1000	0,956	0,922

Otros dos términos se usan en la medida de dosis de radiación. La efectividad biológica relativa abreviadamente RBE. Se define para cualquier tipo de radiación como la cantidad relativa de daños causados por dicho tipo radiactivo comparada con las producidas por los rayos X.

La dosis en rad debe ser multiplicada por el RBE para obtener la dosis en unidad "rems". Dosis del mismo número de rems producen el mismo daño biológico para los rayos X y la radiación Gamma aproximadamente se verifica en los tejidos blandos que :

$$1 \text{ rad} = 1R = 1 \text{ rem}$$

Las exposiciones para el personal dadas por los organismos correspondientes están dadas en rems.

El suelo de un patio cualquiera tiene unas pocas gramos de Uranio por toneladas y aún el cuerpo humano sano contiene pequeña cantidades de material radiactivo.

Se ha calculado que por cada rem recibido durante su vida esta se acorta en 2 1/2 días.

Para el trabajo que se debe realizar en la obtención de radiografías industriales hay 3 métodos generales para la protección del personal de la radiación ionizante:

- a. Reducción del tiempo de exposición.
- b. Separación del personal de la fuente de radiación tanto como sea posible.
- c. Protección del personal con materiales que le sirvan de estudio como el Pb y el hormigón.

1.1.9 Reglamento para la exposición del personal a una radiación ionizante.

La comisión de energía atómica de U.S.A. establece los siguientes máximos permisibles para radiación Gamma o radiación Gamma más rayos X :

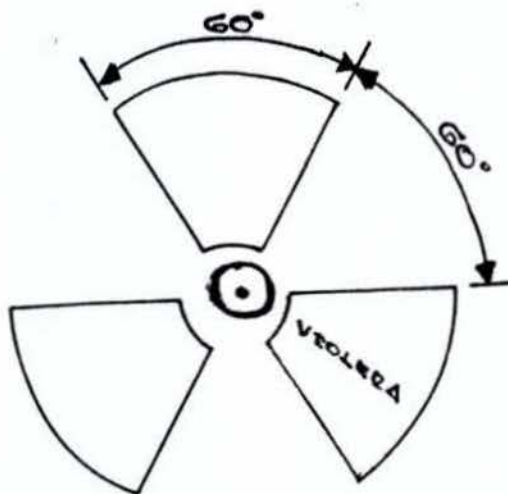
REMS POR TRIMESTRE

Todo el cuerpo, órganos formadores de sangre, órganos reproductores y ojos	11/4
Manos, brazos, pies y tobillos	18 3/4
Piel de todo el cuerpo	7 1/2

La dosis acumulativa permitida para los obreros ha sido establecida mediante un acuerdo internacional como : $D = 5 (N-18)$, donde D es la dosis total recibida en rads y N es la edad del trabajador en años. A las personas menores de 18 años y a las mujeres embarazadas no se les permite efectuar trabajos que supongan una exposición a radiaciones ionizantes. En Canadá y en U.S.A. se exige someter a examen médico periódico de los obreros relacionados con radiaciones y el mantenimiento de cierto registros médicos.

Ningún dispositivo para la obtención de radiografías puede alcanzar un nivel que exceda los 200 mR en cualquier superficie exterior del dispositivo ni exceder los 10 mR por hora a 1 metro de cualquier superficie exterior.

La figura muestra el simbolo elegido por Canadá y U.S.A. para ser colocado en las zonas sometidas a radiaciones ionizantes.



Todos los materiales, aún el aire con pequeñas densidades absorben rayos Gamma. La magnitud de esta absorción depende principalmente de la longitud de onda de los rayos Gamma, del material absorbente y del espesor del mismo. Los rayos Gamma duros son más difíciles de absorber que los rayos Gamma blandos. Los materiales pesados de número atómico elevado como el plomo y el uranio absorben mejor la radiación que los materiales ligeros de bajo número atómico como el berilio y el aluminio, los cuales se pueden considerar razonablemente como transparentes a la radiación. La absorción es mayor cuanto más grande sea el espesor del material. No obstante con un espesor doble no se obtiene un doble efecto de absorción.

La transmisión de los rayos Gamma a través de cualquier sustan

cia sigue una relación matemática semejante a la establecida para la desintegración radioactiva. En tal desintegración se expreso el periodo de vida media como el tiempo en que la mitad de los núcleos radiactivos inicialmente presentes sufrían un proceso de desintegración. De la misma forma el valor del espesor de capa media HCL (iniciales de Half-Value-Layer) de un material se define como el grosor del mismo que reduce la exposición a una radiación, a su mitad. Dos placas de espesores de capa media reducen la exposición a un cuarto y tres la reducen a un octavo. A veces se utiliza el valor de capa décimo que reduce la exposición a un décimo de su valor inicial.

Para calcular el espesor requerido en una protección para que resulte capaz de reducir la radiación a un nivel dado de Roentgen, debe conocerse previamente el nivel de exposición a la radiación dada por la fuente. Tales niveles se expresan en mili Roentgens por hora, por curie a un metro (ver la siguiente tabla).

MATERIAL	mR/h a 1 m sin protección	VALOR DEL ESPESOR DE CAPA MEDIA EN CM				
		ACERO	PLOMO	AGUA	HORMIGÓN	ALUMINIO
Cobalto-60	1300	2,21	1,27	13,5	6,9	5,6
Iridio-192	550	1,12	0,51	8,1	4,8	3,1
Cesio-137	390	1,73	0,64	9,1	5,3	4,1

Un ejemplo del cálculo de una protección sería: Para una fuente sin protección de 20 curies de Ir-192, cuál es la exposición en Roentgen a 3,5 m si se utilizan dos capas de espesor de valor máximo medio?

Solución : 20 C de Ir-192 sin protección producirán una exposición de 11000 mR/h a 1 m. A 2,5 la misma fuente, sin protección, dará una exposición de $1/6,25 \times 11000$ o sea 1760 mR/h.

Dos capas de valor media (HVL) reducen la exposición a 1/4 o :

$$1/2 \times 1760, \text{ esto es : } 880 \text{ mR/h}$$

El coeficiente de absorción lineal. Dado que la transmisión de rayos X o Gamma sigue una relación semejante a la descarga de un condensador o a la de la desintegración radiactiva, puede expresarse como se indica a continuación :

$$I = I_0 e^{-ut}$$

donde : I = Intensidad de los rayos Gamma después de la transmisión

I_0 = Intensidad antes de la transmisión

t = Espesor del material a través del cual se efectúa la transmisión en pulgadas (o en cms)

e = 2,718284, base de los logaritmos neperianos

u = Coeficiente de absorción lineal = fracción de la intensidad disminuida por pulgada o por cms del material absorbente.

Para radiación monocromática, la producción por los isótopos es normalmente monocromática (es decir, con una longitud de onda determinada), aunque es difícil de producir con tubo de rayos X, el valor de u viene dado por la expresión :

$$u = \frac{0.693}{\text{HVL}}$$

El coeficiente de absorción lineal y el espesor de capa media dependen de la longitud de onda de la radiación. Además de la naturaleza del material absorbente. El carácter más penetrante que posee la radiación más dura está indicado en la tabla de valores de los espesores de capa media. La radiación del Co-60 es más de 1 MeV con un HVL en el acero de 2,21 cm, mientras que el Ir-192 irradia partículas con energía de 0,5 MeV y tie-

ne un HVL en el acero de 1,12 cms.

El epílogo entonces para este tipo de experiencia con radiación ionizante, o lo que es más, a nivel profesional, sería: Concientizar que la exposición a la radiación X o Gamma de cualquier parte del cuerpo humano puede resultar nociva, y es, por tanto esencial en todo el trabajo en el que sean utilizadas estas radiaciones tomar las precauciones adecuadas para garantizar la protección, tanto del operador como de las personas que se encuentran en las proximidades del lugar en que el trabajo de inspección radiográfica se realice.

Las medidas de protección a tomar son las que se encuentran en vigor en los distintos países y, en ausencia de toda reglamentación se tendrán en cuenta las recomendaciones de la comisión internacional para la protección radiográfica. En Colombia existe el "Instituto Colombiano de Asuntos Nucleares", el cual es el encargado de establecer las normas y recomendaciones y de formar docentes capacitados para el manejo de equipo radiológicos en los distintos niveles requeridos.

1.2 NATURALEZA Y PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE LAS RADIACIONES X Y GAMMA.

El conocimiento de las leyes físicas que rigen la producción de las radiaciones ionizantes y las propiedades de los mismos es esencial para el radiólogo. Si bien el estudio detallado de estas leyes parece salirse del tema aparentemente, no por ello van dejarse de exponerse aspectos fundamentales cuyo dominio es la esencia para dotar mejores resultados en el amplio campo de la radiografía industrial.

1.2.1 Estructura del Atomo.

Un elemento puede ser definido como una sustancia que no puede descomponerse en otros más sencillos por procedimiento químico.

Todos los elementos tienen en general la misma estructura, que consiste en un núcleo pesado cargado positivamente rodeado de electrones, partículas ligeras con carga negativa, distribuido en orbita alrededor del núcleo y cuyo número determina las propiedades químicas del elemento.

La carga del electrón, unidad de carga eléctrica negativa, es una constante física fundamental cuyo valor es $e = 4,8 \times 10^{-10}$ u.e.e. y su masa es $m = 9,11 \times 10^{-28}$ gramos. El núcleo en la cual se encuentra prácticamente toda la masa del átomo está constituido por la unión de un cierto número de partículas perteneciente a dos tipos: los protones y los neutrones. El protón cuya masa es $1,67 \times 10^{-24}$ grs., tiene una carga positiva igual en valor absoluto a la del electrón. El neutrón es una partícula sin carga igual en valor absoluto a la del electrón. El neutrón tiene una masa aproximadamente igual a la del protón.

El átomo más sencillo es el de Hidrogeno cuyo núcleo contiene un solo protón. El número total de protones y neutrones o de nucleones es el número de masa "A". Este número total de masa es un número entero cuyo valor está muy próximo al de la masa atómica del elemento considerado.

A medida que aumenta el número de protones en el núcleo y dada que su carga positiva es igual en valor absoluto a la carga del electrón, para conseguir el estado de equilibrio, aumentará el número de lectrones, que se distribuyen en capas o niveles de energía. La mecánica cuántica nos enseña que existen ciertas

limitaciones y reglas que determinan la distribución de los electrones en los distintos niveles de energía que son designados por las letras K, L, M,.. La carga K es la que se encuentra más próxima al núcleo es la que contiene los electrones con mayor cantidad de energía y por tanto son las que se encuentran más firmemente unidas al núcleo. El número de electrones distribuidas en las distintas capas que neutralizan la carga positiva del núcleo, es el número atómico "Z" llamado también número de carga.

En su núcleo los distintos elementos contienen más o menos, el mismo número de protones que de neutrones, en este caso la relación $(A-Z)/Z$ será igual a la unidad o próximo a ésta. Esta resulta ser cierta en los elementos más ligeros o sea en los de número atómico pequeño. En los elementos pesados el núcleo contiene un exceso de neutrones (caso de uranio ${}_{92}^{238}\text{U}$), dándose así lugar a variedades del mismo elemento químico, con igual número de protones pero distinto número de neutrones; Es decir con diferente masa y que reciben el nombre de Isótopos. En estos debido al exceso de neutrones existe cierta inestabilidad en el núcleo lo cual da lugar a que estos elementos sean radiactivos y se les conozca bajo la designación de radio Isótopos.

Existen otras partículas fundamentales como el positrón, neutrón, mesones, antiprotón, etc, que no es necesario tomar en consideración para un primer estudio de la radiaciones X o Gamma.

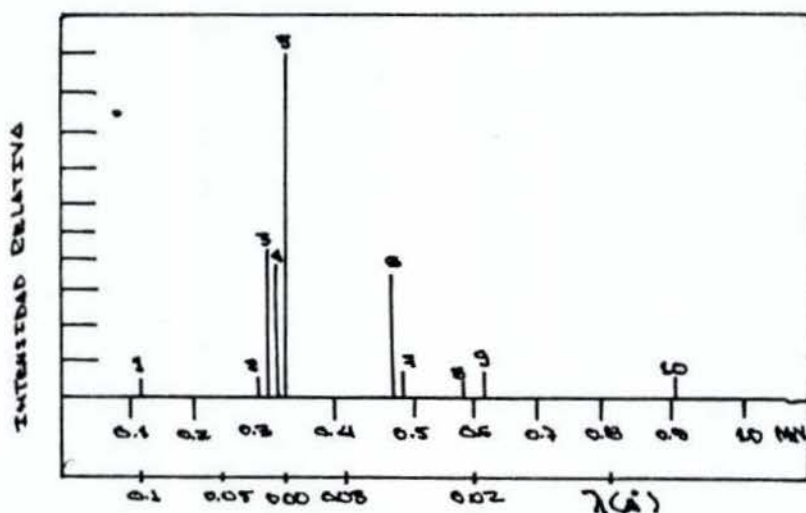
1.2.2 Naturaleza de la radiación X y Gamma.

Los rayos X y Gamma son radiaciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda están comprendidas entre 10^{-10} y 10^{-7} cms.

Los rayos X se producen cuando un haz de electrones animados de gran velocidad y por tanto con una gran energía chocan contra

un obstáculo material cualquiera, siendo este obstáculo en el caso del tubo de rayos X el metal que constituye el anticátodo. Los rayos Gamma son emitidos por el núcleo de los elementos radiactivos. Ambas radiaciones son invisibles y se desplazan en una línea recta

ESPECTRO CARACTERISTICO DE LA RADIACION POR
EL IRIDIO - 192



1.2.3 UNIDADES.

La longitud de onda de las radiaciones ionizantes puede ser expresada en cms, siendo sin embargo es más frecuente usar el Å ; siendo 1Å = 10^{-8} cms. La unidad "X" que se utiliza a veces para medir longitudes de onda tiene un valor de 1×10^{-11} cms.

La energía de los rayos X se expresa en función de la energía de los electrones, siendo sin embargo que se usa el electrón voltio (eV). Entendiéndose como tal energía la adquirida por un electrón cuando se mueve en un campo bajo una diferencia de potencial de 1 voltio. Su valor es de $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-12}$ ergios. Esta unidad corresponde a la radiación en cuanto a su calidad. Análogamente la energía de la radiación Gamma se expresa en KeV o Mev, aun-

que el electrón no haya intervenido en su generación. En radiografía se mide en "Roentgens". El roentgen es la unidad de dosis de exposición definida internacionalmente como la cantidad de radiación X o Gamma que produce en 0,001293 gramos de aire, en condiciones normales iones con una U.E.e de cantidad de electricidad de cualquier signo.

La dosis absorbida por unidad de masa irradiada puede ser medida en ergios por gramo; la unidad convencional para medir esta dosis es el rad siendo 1 rad 100 erg/g.

Por lo que a calidad de radiaciones X y Gamma se refiere es frecuente utilizar los términos de "radiación blanda" y "radiación dura". La radiación blanda es aquella cuya longitud de onda es grande y su poder de penetración pequeña y dura la que presenta un poder de penetración grande y pequeña longitud de onda. La tabla siguiente muestra la escala de dureza de la radiación X en función de la tensión de excitación aplicada al tubo establecido de acuerdo con la misma DIN 6809.

El Curio "Ci" es una unidad de radiactividad definida por acuerdo internacional como la cantidad de un núcleo que se desintegra a razón de $3,7 \times 10^{10}$ átomos x segundo. La fuerza o potencia de un isótopo radiactivo se expresa en curios, no obstante en los trabajos radiográficos es frecuente utilizar otra unidad que mide la potencia de emisión en Roentgen por hora a un metro de distancia (rhm) y que se designa "factor K" correspondiente a cada isótopo un factor K determinado.

ESCALA DE DUREZA DE LA RADIACION

RADIACION	TENSION DE EXCITACION
Muy blanda	Inferior a 20 KV
Blanda	20 a 60 KV

semiblanda	60 a 150 KV
Dura	150 a 400 KV
Muy dura	400 a 3000 KV
Ultradura	Superior a 3000 KV

1.2.4 Principios de Radiología.

La radiografía es la materialización de una sombra o "imagen radiográfica" proyectada sobre una película fotográfica por un objeto situado entre la película y el foco emisor de la radiación.

La formación de esta imagen sigue las mismas leyes geométricas que rigen la formación de sombra por la luz visible, desprendiéndose de la nitidez de la imagen proporcionada sobre la película el tamaño del foco a fuente emisora de la radiación y de las distancias radiactivas relativas existentes entre el objeto la fuente de radiación y la película.

La película radiográfica consiste en un soporte transparente recubierto por sus dos caras con una capa delgada de gelatina en la cual se encuentran en suspensión pequeños cristales de halogenuros de plata de reducir e ir depositándose plata metálica finamente dividida, cuya cantidad es función de la intensidad de la radiación que sobre ellos haya incidido dándose así la formación de la "imagen latente". El depósito de estos granos de plata metálica se consigue por la acción del baño de revelado. Después del revelado, los cristales o granos de halogenuro sobre los cuales no ha actuado la radiación son disueltos por el fijador; en la etapa final del tratamiento la película es lavada para quitar todo el exceso del reactivo y por último secada.

En consecuencia será preciso estudiar los factores geométricos y las que afectan a la exposición radiográfica, con el fin de

que se puedan obtener radiografías de buena calidad.

Enunciando en forma breve los factores geométricos se puede decir que para conseguir una radiografía con una nitidez satisfactoria es necesario tener en cuenta los principios fundamentales de la formación de la imagen radiográfica.

Si consideramos una pantalla P, iluminada por una fuente luminosa puntual F, y situamos entre la pantalla y la fuente luminosa un objeto opaco ab sobre la pantalla aparecerá una silueta de tal objeto.

Teniendo en cuenta la semejanza de los triángulos podemos escribir :

$$\frac{ab}{a'b'} = \frac{do}{do + t} \quad \text{o bien} \quad a'b' = \frac{ab (do + t)}{do}$$

lo cual nos dice que el tamaño de la sombra es mayor que el del objeto. A no ser que este despreciando su espesor, este en contacto con la pantalla, o que por el contrario el foco emisor se encuentre en el infinito y no habría deformación en la proyección.

Los tubos de rayos X y fuentes de radiación Gamma al igual que las fuentes luminosas, tiene en la práctica unas dimensiones finitas. En este caso cada punto del foco o fuente emisora se comporta como si estuviera aislado y da lugar a la formación de una sombra propia. La superposición de estas sombras reduce las dimensiones de la sombra propiamente dicha, apareciendo ésta rodeada de una sombra menos iluminada que es la penumbra y que podemos designar como "penumbra geométrica". La distancia foco-película necesaria para reducir un mínimo el valor de la penumbra geométrica depende de las dimensiones del foco emisor y de las

distancias foco-objeto y objeto-película. El valor de esta penumbra viene dada por la ecuación :

$$Ug = Ft/do$$

en la cual : Ug = Penumbra geométrica

F = Tamaño del foco o fuente de radiación

t = Espesor del objeto.

con la velocidad de la luz ($c = 2,998 \times 10^{10}$ cm/sg), la diferencia esencial entre la luz, las radiaciones ultravioletas, infrarrojos, ondas de radio, rayos X y Gamma es solamente su longitud de onda o su frecuencia.

Ambas radiaciones tienen la propiedad de atravesar aquellos materiales que son opacos a la luz y ejercer una acción sobre las emulsiones fotográficas muy parecidas a la luz. Estas radiaciones atraviesan la materia tanto más fácilmente, cuanto menos densa es esta dependiendo de su poder de penetración de su longitud de onda.

De acuerdo con la teoría cuántica propuesta por Planck Max, las radiaciones electromagnéticas no son radiadas de una forma continua, como tiene lugar en el caso de ondas puras, sino en forma de pequeños "paquetes" o "cuántas" cuya energía viene dada por la expresión :

$$E = h.v = h.c/\lambda$$

Donde : h es la constante de Planck de valor = $6,624 \times 10^{-28}$ erg/sg
v es la frecuencia de la radiación.

El "cuánto" es la menor cantidad de energía asociada con cualquier fenómeno dado. Con la frecuencia es más conveniente considerar la radiación electromagnética como corpuscular que como ondas en movimiento, en cuyo caso debemos emplear el término Fotón en

lugar de el Cuanta.

Rayos X : El tubo de radiación o tubo de rayos X está constituido esencialmente por una ampolla de vidrio en cuyo interior se disponen el filamento (cátodo) y el anticátodo y de la cual se ha extraído el aire hasta alcanzar un grado de vacío del orden de 0,01 a 0,001 mm Hg.

El filamento está compuesto por un hilo generalmente de wolframio, el cual llevado a una temperatura suficiente emite electrones (emisión termiónica). La cantidad de electrones emitidos depende de la temperatura alcanzada por el filamento, temperatura que puede ser regulada variando la intensidad de la corriente de alimentación de este filamento. Este haz de electrones se origina en el filamento y que va desde éste al anticátodo; él (haz de electrones) crea un paso de corriente cuya se mide en miliamperios (mA).

De este valor de la intensidad depende la intensidad de la radiación emitida por el tubo, ya que ésta, a su vez es función del flujo de electrones.

En los tubos modernos el filamento va alojado en un receptáculo de sección adecuada que sirva para concentrar el flujo de electrones y obligar a estos a incidir sobre una zona determinada del anticátodo, zona que recibe el nombre de "mancha focal".

Este filamento está colocado o conectado al polo negativo del circuito de alta tensión. La corriente necesaria para la calefacción del filamento proviene de un transformador reductor normal pero con su secundario convenientemente aislado para la alta tensión.

El anticátodo está constituido por un bloque de metal buen conductor térmico, generalmente cobre, en el cual se dispone adecuadamente una placa de metal de alto punto de fusión de forma variable y con una inclinación de 20 a 30° con respecto de la dirección del eje del haz de electrones que provienen del cátodo. El metal que forma esta placa suele ser wolframio, el cual constituye el verdadero anticátodo y por ella va conectado al polo positivo del circuito de alta tensión.

El tubo de rayos X que se ha descrito pertenece al tipo de tubo Coolidge, que son los más frecuentes usados en radiografía industrial.

En un tubo de rayos X la energía cinética de un electrón que parte de la superficie del cátodo con una velocidad cero alcanza en el momento de chocar contra el anticátodo, cuando entre ánodo y cátodo existe una diferencia de potencial de V voltios. Un valor que viene dado por la expresión :

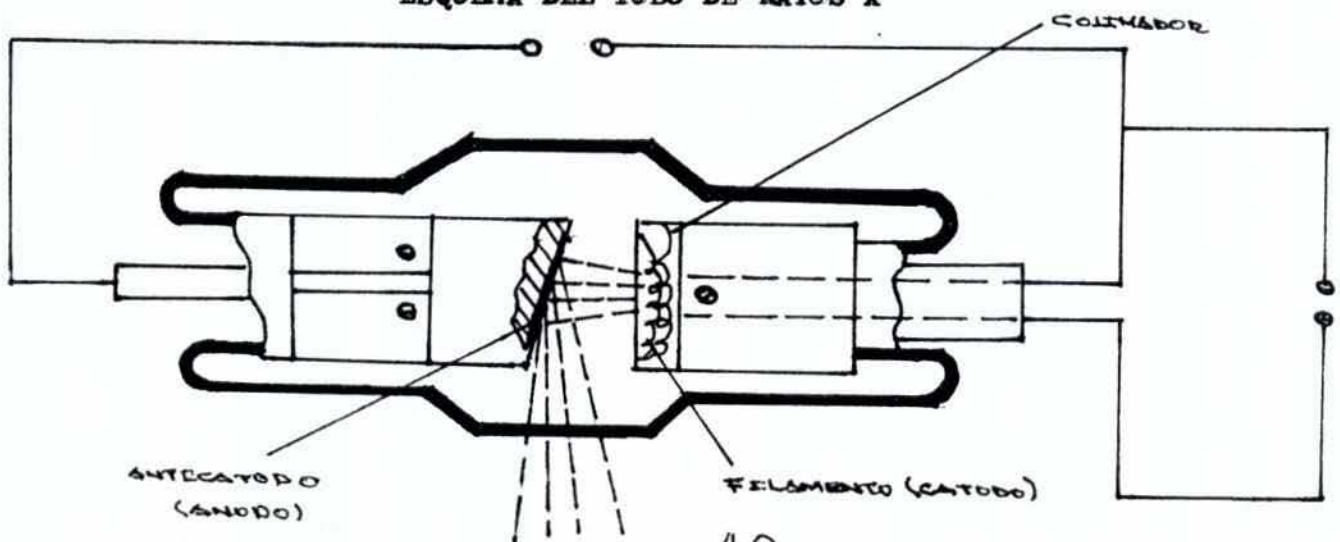
$$V_2 = m v^2 = eV$$

donde : m = La masa del electrón

e = Carga del electrón

v = Velocidad alcanzado bajo la tensión de excitación V del electrón.

ESQUEMA DEL TUBO DE RAYOS X



Cuando un electrón lleva una energía cinética dada por la fórmula anterior y choca contra el anticátodo tiene lugar una transformación de energía. Si el choque del electrón se produce directamente sobre el núcleo de uno de los átomos del anticátodo la energía del electrón se transforma en una cuanta de radiación cuya longitud de onda mínima es ::

$$h = eV = hc/\lambda_{\text{min}} \quad \text{y} \quad \lambda_{\text{min}} = hc/eV$$

donde :: λ_{min} = Longitud de onda mínima de la radiación
 h = Constante de Máx Planck
 c = Velocidad de la luz
 e = Carga del electrón
 V = Tensión de excitación

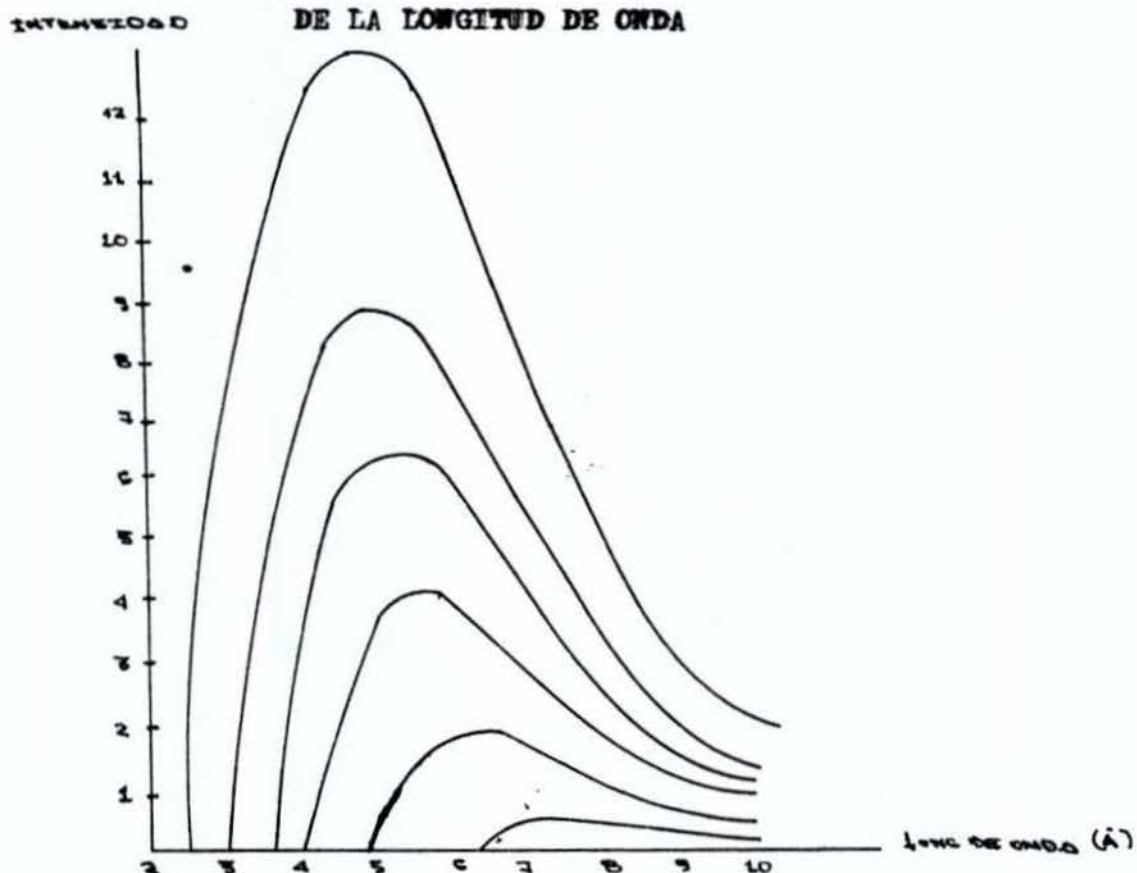
Si expresamos la longitud de onda en unidades Angstrom y la tensión en voltios teniendo en cuenta que 1 voltio es igual a 1/300 u.e.e., resulta al sustituir valores que ::

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{12395}{V}$$

Esta radiación se denomina con frecuencia "radiación de frenado" o "Bremsstrahlung". Sin embargo la mayor parte de los electrones que parten del cátodo sufren, al llegar al anticátodo, interacciones con los electrones de los átomos de este, perdiendo así parte de su energía para arrancar algún electrón del átomo y ser frenado después al chocar contra el núcleo. El protón de rayos X tiene una energía producida menor que la energía cinética original del electrón; o sea una longitud de onda menor que λ_{min} . Por lo tanto, en general los rayos X emitidos presentan una gran variedad de longitudes de onda; el espectro de esta radiación es un espectro continuo. Por analogía con la luz visible, un espectro de rayos X como éste, es designado con frecuencia como "radiación X blanca".

Las curvas de la siguiente figura nos muestran la distribución de la intensidad de la radiación en función de la longitud de onda para una serie de tensiones de excitación del tubo de rayos X.

DISTRIBUCION DE LA INTENSIDAD DE LA RADIACION EN FUNCION DE LA LONGITUD DE ONDA



Como puede observarse a medida que la tensión crece la intensidad de la radiación aumenta para todas las longitudes de onda que se comprenden : La longitud a la cual le corresponde una intensidad máxima va disminuyendo, y las longitudes de onda mínima que se presentan tienden a ser menores.

El área limitada por estas curvas aumenta proporcionalmente al cuadrado de la tensión aplicada al tubo. Esto es :

$$I \text{ continua} = K V^2$$

Posteriormente y de una forma experimental, se ha podido comprobar que esta intensidad del fondo continuo es proporcional al número atómico Z del metal que forma el anticátodo y en consecuencia la expresión anterior debe generalizarse, ya que :

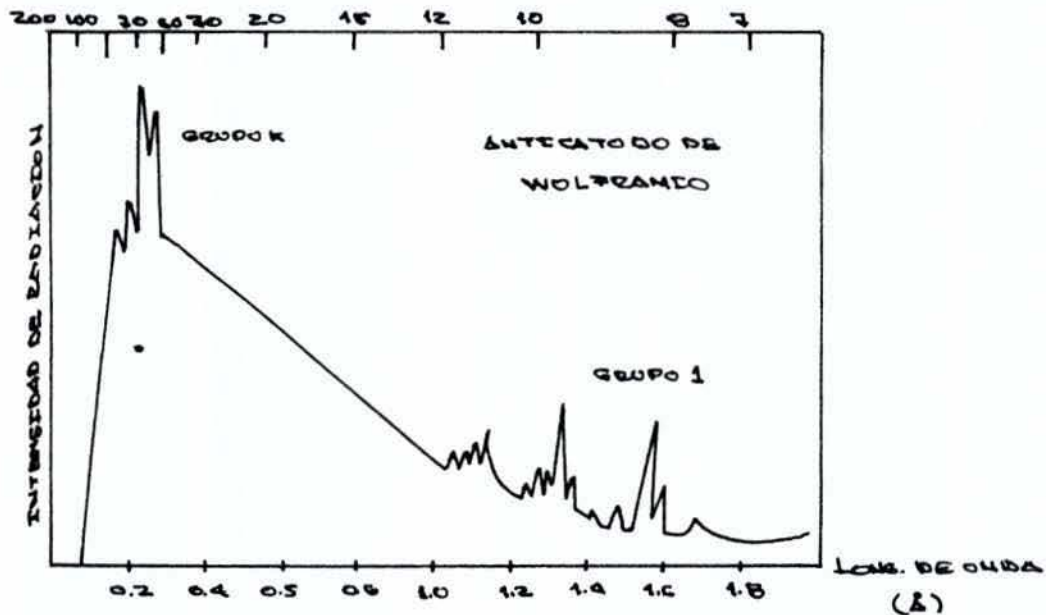
$$I \text{ continuo} = K.Z.V^2$$

En el espectro continuo se superponen discontinuidades de la intensidad de radiación para longitudes de onda determinadas. Estas longitudes de onda caracterizan la naturaleza del anticátodo, presentando para cada elemento un valor fijo; y no son longitudes de onda sencillas sino de grupos de diversos longitudes de onda muy próximas unas de otras.

El mecanismo de la producción de este "espectro característico" es el siguiente : Hemos indicado anteriormente que los electrones que llegan al anticátodo sugieren interacciones con los electrones de los átomos que lo forman y que la energía que pierde el electrón incidente puede arrancar algún electrón del átomo. Cuando esto ocurre, el átomo que pierde un electrón pasa a un estado de excitación ya que la órbita en que ha quedado está vacante, tiende a completarse con un electrón que ha de provenir de otra órbita electrónica. La diferencia de energía entre los dos electrones orbitales es emitida en forma de un cuanto de rayos X. La longitud de onda para esta radiación, por tanto es característico para cada átomo. Esta radiación es emitida al mismo tiempo que la que forma el espectro continuo, dándose así lugar a una curva tal como la de la siguiente figura:

Dado que las distintas órbitas electrónicas son designadas con las letras K, L, M, \dots , estas radiaciones características son llamadas radiación K, L, M dependiendo de la órbita electrónica en la que haya tenido lugar el proceso de excitación.

**ESPECTRO CARACTERISTICO DE LA RADIACION X EMITIDA POR
UN TUBO CON ANTICATODO WOLFRAMIO**



Las conclusiones a las que se puede llegar como consecuencia de todo lo expuesto son los siguientes :

- a. La emisión de un tubo de rayos X comprende un fondo continuo en el cual se superponen en condiciones favorables, las radiaciones características.
- b. La intensidad del fondo continuo crece con el número atómico del metal que forma el anticatodo pero el aspecto de la curva es el mismo para todos los elementos.
- c. Un aumento de la intensidad utilizada es consecuencia de un aumento en la tensiones siguiendo una ley de cuadrados.
- d. Un aumento de la tensión hace que la radiación sea más penetrante.
- e. Para una tensión dada, la intensidad de la radiación en todas

sus longitudes de onda es directamente proporcional a la intensidad de la corriente de alimentación del tubo.

f. La cantidad de energía que lleva un electrón del haz emitido por el cátodo y que es transformada en radiación X es muy pequeña. Su valor suele estar comprendido entre el 0,01 y el 10%. Para su cálculo, Beatty ha propuesto la expresión :

$$\text{eficiencia} = 1,4 \times 10^{-9} Z.V$$

siendo Z el número atómico del metal que forma el ánodo. El resto de la energía que lleva el electrón, es decir su mayor parte es transformada en calor.

Atendiendo al número 3 donde se habla de la ley de cuadrados se puede enunciar que la radiación X o Gamma se transmiten en línea recta desde su punto de origen como otras radiaciones electromagnéticas. La radiación de más-baja frecuencia como la radiación ultravioleta o la luz visible, pueden ser reflejadas, refractadas o enfocadas por diversos dispositivos tales como espejos, lentes antenas, etc. Los rayos Gamma debido a su longitud de onda extremadamente corta no pueden ser reflejadas ni enfocadas. Al encontrar una posible superficie reflectora tal radiación penetra en el material. Todo radiografía consiste simplemente en producir imágenes de sombras del material que se fotografía por medio de la radiación que atraviesa el metal y alcanza la película.

Como en toda radiación los rayos X divergen cuando son emitidos y cubren un espacio cada vez mayor con una intensidad que disminuye al aumentar la distancia de la fuente que los produjo. Si un haz de rayos X cubre 1 m^2 de área a un metro de la fuente cubrirá 4 m^2 a 2 m de la misma, 9 m^2 a 3 m y así sucesivamente.

Por otro lado si a 1 m de la fuente la exposición que correspon

de es de 1R, a 2 m de dicha fuente la exposición será de 1/4R y a 3 m de 1/9R, etc. Esta simple relación entre la intensidad y la distancia se denomina ley de los cuadrados inversos o ley del cuadrado de la distancia.

Esta ley determina el tiempo de exposición a los rayos X o Gamma. Si se requiere una exposición de 10 min. cuando la película está a 1 m del tubo, se necesitarán 40 min cuando esté a una distancia del tubo de 2 m o 90 min cuando dicha distancia sea de 3 mts.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

I_1 e I_2 son las intensidades de los rayos Gamma en Roentgens a las distancias d_1 y d_2 respectivamente.

En relación a los tiempos fotográficos de exposición donde :

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

t_1 y t_2 son los tiempos de exposición requeridos a las distancias d_1 y d_2 .

Rayos Gamma : La desintegración del núcleo de una sustancia radiactiva natural va acompañada de la emisión de una o mas formas de radiación que se denominan rayos Alfa, Beta y Gamma. La radiación Gamma es una radiación electromagnética de la misma naturaleza física que los rayos X presentando en general menores longitudes de onda que estas. Los rayos Alfa son núcleos de helio en los cuales aunque poseen gran energía cinética su poder de penetración es pequeño. Los rayos Beta son electrones y al igual

que la radiación alfa su poder a penetración es baja.

La transformación de una sustancia radiactiva es un fenómeno absolutamente independiente de toda acción exterior. No puede ser acelerado por ningún agente físico. Su radiactividad no es constante disminuye con arreglo a una ley exponencial cuyas características se dan a continuación.

Sea N_0 el número de átomos de un elemento radiactivo inicialmente existentes y N el número de átomos de dicho elemento al cabo de un tiempo T contado a partir del momento inicial, la ley que rige la velocidad de desintegración radiactiva es la siguiente:

$$\frac{dN}{dT} = - AN$$

En el cual A es la "constante radiactiva" o constante de envejecimiento y mide la probabilidad de que se transforme un átomo en la unidad de tiempo; segundo, minuto, día o año, según el valor de dicha probabilidad para el elemento radiactivo considerado.

La anterior expresión puede ser integrada entre el valor del tiempo cero, cuando el número de núclidos (átomos radiactivos) es N_0 y el tiempo T en el que el número de núclidos que permanece es N , lo que nos da :

$$N = N_0 e^{-AT}$$

Expresión en la cual "e" es la base de los logaritmos neperianos y el signo menos hace referencia a la disminución en el número de núclidos.

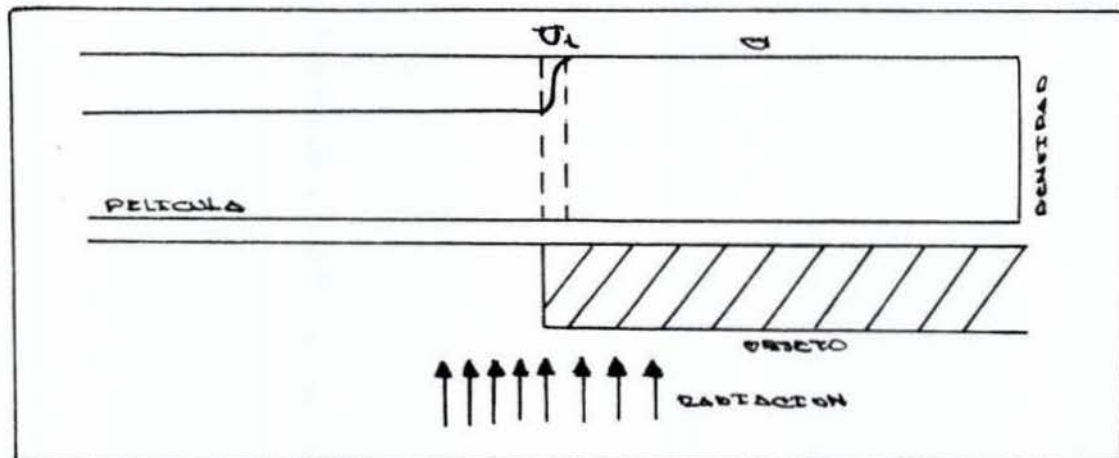
Se designa con el nombre de "vida media" el valor de un tiempo finito que es el que duraría cada átomo de un núclido inestable.

La nitidez de la imagen radiográfica es afectada además de U_g y U_p por otro factor que podemos denominar penumbra interna o inherente U_i que depende del tipo de película radiográfica y de la energía de radiación utilizada.

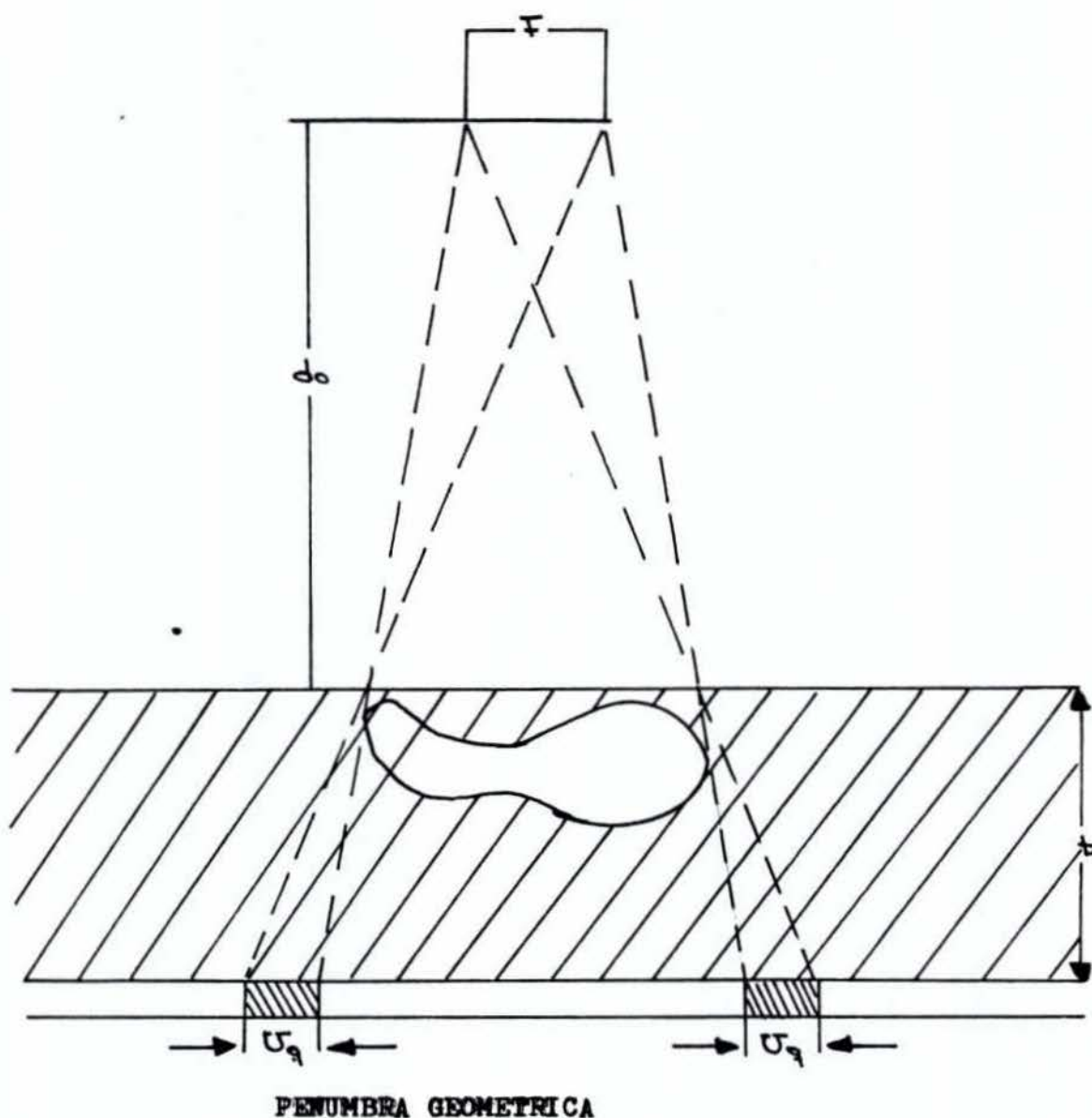
Cuando la radiación X o Gamma penetra en una emulsión fotográfica choca contra los átomos que la forman y se da lugar a una emisión de electrones que al dirigirse en todas direcciones actúan sobre los granos de halogenuro de plata y los activan en forma análoga como ocurre con la radiación incidente. El resultado es que al revelar la película aparecen granos de plata, no solamente donde actuó la radiación sino en zonas próximas, originándose así una penumbra.

La magnitud de esta sombra de penumbra inherente U_i depende de la distancia recorrida por los electrones liberados y por tanto es función de la energía de la radiación incidente.

En ausencia de la penumbra geométrica y la de proceso, la penumbra inherente se manifiesta por una zona de transición gradual entre la densidad fotográfica correspondiente al objeto radiografiado y la que presenta la película sobre la que la radiación ha actuado directamente. (ver figura siguiente).



PENUMBRA INHERENTE



Importante.

Si durante la exposición radiográfica se mueve la fuente emisora de la radiación, el objeto que se radiografía o la película, los contornos de la imagen o imagen aparecen borrosos. Dado que la falta de nitidez ocasionada es análoga a la penumbra producida geoméricamente, se designa este factor como "penumbra del proceso" U_p , incluyéndose en el la penumbra que produce a consecuencia del proceso de revelado y fijado de la película.

Si por unidad de tiempo se desintegrasen el mismo número de ello la vida media es el valor recíproco de la constante de desintegración o sea $T_m = 1/\lambda$.

La forma más corriente de expresar la velocidad de desintegración radiactiva es considerar el "período mediador", entendiéndose como tal el tiempo requerido para que cualquier número de núcleos inicialmente presentes se reduzca a la mitad o sea para que su actividad llegue a ser la mitad de la actividad inicial. Este tiempo, dado la naturaleza exponencial de la desintegración es independiente de la cantidad del radio isótopo presente.

De esta forma, si hacemos :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2}$$

se tendrá que : $1/2 = e^{-\lambda T}$

De donde resulta : $T_m = \frac{0,6931}{\lambda}$

Así por ejemplo, para el radio $\lambda = 1,38 \times 10^{-11}$ por segundo o sea $4,35 \times 10^{-4} = 1/23000$ por año. Esto es, que por cada 2300 átomos de Ra la probabilidad es que se desintegra uno solo por año. En cambio el período medio será :

$$T_m = 0,6931 \times 2300 = 1590 \text{ por año}$$

lo cual indica que al cabo de este tiempo se habrá desintegrado la mitad de los átomos existentes al principio de este intervalo.

Durante el proceso de activación tiene lugar también la degeneración del radio isótopo de tal modo que la actividad producida tiende a un máximo. La mitad de este máximo se produce en un ti

empo igual al período mediador y generalmente el tiempo de irradiación no es superior a dos veces el período mediador.

Cuando el núcleo de Uranio 325 capta un neutrón, tiene lugar generalmente el proceso de fisión, originándose un gran número de isótopos de distintos elementos, muchos de los cuales son radiactivos. En general estos elementos se encuentran situados hacia la mitad de la tabla periódica y pueden ser separados por procedimientos químicos del Uranio. Esta separación química tiene que ser efectiva de bajo ciertas condiciones para eliminar las radiaciones peligrosas. Por este procedimiento se pueden obtener ciertos número de fuentes de radiaciones Gamma. En el de la radiografía industrial la fuente más importante preparada por este método es el Cesio 137.

El espectro de la radiación Gamma está integrado por una serie discreta de energías que dan lugar a una serie de líneas. La figura siguiente las muestra:

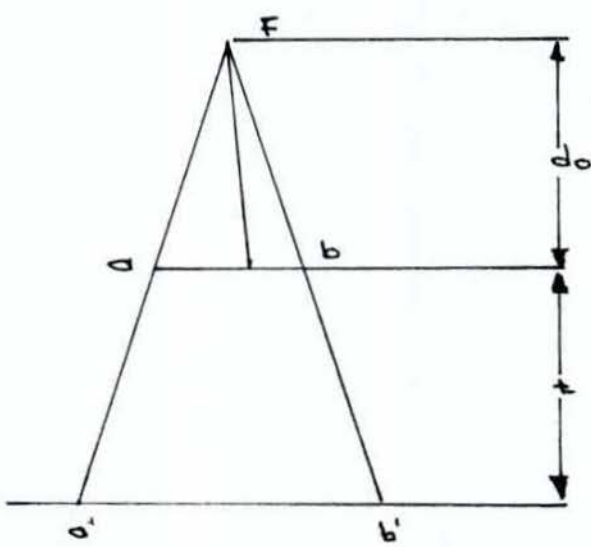
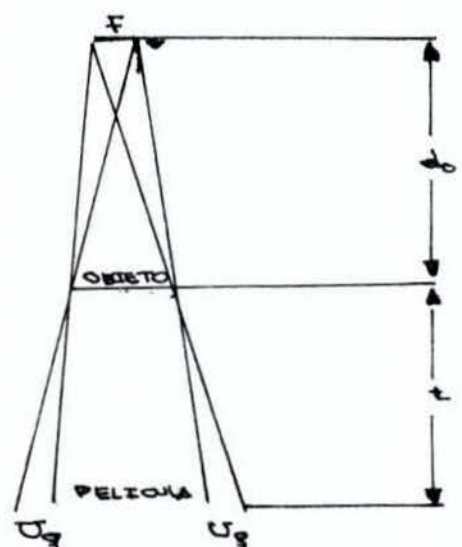


IMAGEN PRODUCIDA POR LA FUENTE PUNTUAL



PENUMBRA GEOMETRICA

La penumbra total debida a todas las causas que la producen tiene el siguiente valor :

$$U_T = U_i^2 + U_a^2 + U_p^2 + \dots$$

Si se admite que la falta de definición se debe únicamente a la penumbra inherente U_i y de la geométrica U_g entonces, (incluyendo en U_g la debida al proceso se tiene que) :

$$U_t = (U_i^2 + U_g^2)^{1/2}$$

Ahora para una fuente emisora con una energía de radiación y tamaño determinado el límite inferior de la penumbra total es una constante a la que se denomina "penumbra efectiva" U_e cuyo valor es :

$$U_e = (U_i^2 + U_g^2)^{1/2}$$

resulta de la máxima utilidad para el cálculo de la distancia mínima óptima, foco o fuente película (D.F.P).

Para una distancia foco o fuente objeto y un espesor de este t la distancia foco película será :

$$D.F.P = d + t$$

Como por otra parte se sabe que el valor de la penumbra es :

$$U_g = Ft/$$

sustituyendo valores se tiene :

$$D.F.P = Ft/U_g + t$$

pero como se trata de penumbra efectiva quedará :

$$D.F.P = Ft/U_e + t$$

donde : D.F.P = Distancia foco-película

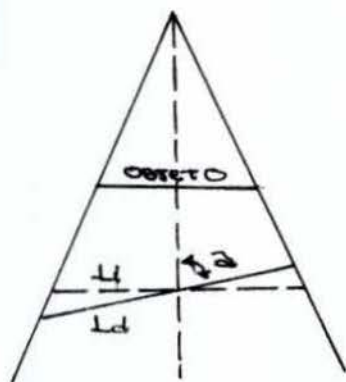
F = Tamaño efectivo del foco o fuente emisora

t = Espesor atravesado por la radiación

d = Distancia foco-objeto

U_e = Penumbra efectiva

Com el fin de evitar en lo posible los fenómenos de distorsión se ha de procurar que el haz de radiación sea perpendicular a la película y que ésta, a su vez sea paralela al objeto radiografiado; Si estas condiciones no se cumplen, la imagen radiográfica se presentará deformada. La medida del grado de deformación se puede deducir por la relación entre el tamaño de la imagen deformada y el de la que no sufrida deformación.



L_i = Dimensiones de la imagen sin deformar

L_d = Dimensiones de la imagen deformada.

$$L_d - L_i = l$$

$$L = (l / \text{sen } d - l) \times 100$$

En cuanto a los factores de exposición se puede decir que el ennegrecimiento que se produce en la película radiográfica una vez que se ha sometido al tratamiento adecuado es función de la cantidad de plata metálica depositada por unidad de superficie dependiendo a su vez de la cantidad de radiación absorbida por la

emulsión sensible de la película. El término empleado tanto en fotografía como en radiología puede desogarse al grado de ennegrecimiento de una película expuesta a una radiación es el de "densidad fotográfica" y se define como :

$$D = \text{Log}_{10} \frac{I_0}{I_t}$$

siendo I_0 la intensidad del haz luminoso que se hace incidir sobre la película para su observación e I_t la intensidad de la luz transmitida.

La relación I_0/I_t es llamada "opacidad óptica" de la película y a su valor recíproco "transmitancia".

Existen también los términos "comstraste", y definición que son inseparables de cualquier discusión sobre el proceso radiográfico. De una forma simple y concisa se puede definir el "contraste" como el grado de diferencia entre dos campos o zonas contiguas de una radiografía que presentan densidades diferentes, y se entiende como "definición" la posibilidad relativa para resolver los pequeños detalles.

1.2.5 PELICULAS RADIOGRAFICAS

1.2.5.1 Generalidades.

La película radiográfica es básicamente análoga a la de fotografía. Ambas presentan como componentes fundamentales una capa sensible, "emulsión", recubriendo a un soporte flexible y transparente llamado "base". La radiográfica presenta dos capas de emulsión una por cada lado de la base. De esta forma se consigue reducir el tiempo de exposición y se obtiene una imagen radiográfica más cont

trastada.

La emulsión consiste en una suspensión de halogenuros de plata en gelatina. Esta es muy sensible a la luz y a las radiaciones ionizantes, que actúan sobre los halogenuros de plata, (granos) originando cambios en su estructura física. Estos cambios dan lugar a la "imagen latente" que no puede ser puesta de manifiesto por medios físicos. Sin embargo cuando la película impresionada es tratada con determinados agentes químicos, que constituyen la solución o "baño revelador", se producen reacciones que dan lugar a que se deposite plata finamente dividida, quedando estos granos de plata en suspensión en la capa de gelatina para dar lugar a la formación de la imagen; Cuanto menos sea el tamaño de estos granos de plata tanto mejor será la definición de la imagen.

Para preparar la emulsión sensible se mezclan soluciones de nitrato de plata y bromuro potásico con gelatina.

Las películas radiográficas pueden dividirse en dos grandes grupos. En uno de ellos se incluyen aquellas películas preparadas para ser expuestas directamente a la acción de la radiación X o Gamma o para ser usadas con pantallas reforzadoras de plomo. El otro grupo llamado "películas con pantalla" está constituido por las películas que han de ser utilizadas con pantallas reforzadoras salinas. Teniendo en cuenta el tamaño de grano, el contraste y la rapidez de las películas radiográficas éstas pueden ser clasificadas a saber en cuatro grupos o tipos :

TIPO	RAPIDEZ	CONTRASTE	TAMAÑO DE GRANO
1	Lenta	Muy alta	Muy pequeño
2	Media	Alto	Pequeño
3	Alta	Media	Grande
4a)	Muy alta	Muy alta a)	b)

- a) Películas con pantallas reforzadoras fluorescentes. Cuando estas películas se exponen directamente o con pantallas de plomo, su rapidez, contraste y tamaño de grano son medios.
- b) El tamaño de grano depende de las pantallas fluorescentes utilizadas.

1.2.5.2 Características.

La acción de la radiación sobre la película radiográfica da lugar a la formación de la imagen latente, la cual es puesta de manifiesto por el tratamiento de revelado y fijado adecuado. La imagen radiográfica así obtenida está formada por partículas de plata metálica que quedan en suspensión en la gelatina distribuidas de acuerdo con la cantidad de radiación que ha actuado sobre la película y que dará lugar a distintas ennegrecimientos o diferencias de densidad.

Cuando se observa una radiografía mediante un negatoscopio adecuado el ojo ve la imagen como variaciones en la intensidad de la luz transmitida a través de las diferentes densidades de la película. La diferencia de densidades entre dos zonas adyacente se denomina "contraste". Si las diferencias de densidades son medidas con un densitometro, el valor que se halla corresponde al del "contraste objetivo".

Ejemplo : El contraste objetivo C entre dos zonas que presentan densidades :

$$D_1 = 1,5 \text{ y } D_2 = 3,2 \text{ será}$$

$$C = D_2 - D_1 \qquad C = 1,7$$

El contraste percibido por el observador es el "contraste obje-

tivo" ya que depende de las condiciones en que la observación se realice, y del propio observador. Este contraste no puede ser medido y depende de un gran número de factores: como la intensidad y color de la iluminación, el tamaño del campo observado, el gradiante de densidad, el grado de iluminación del lugar en que se observa la película y el deslumbramiento producido por las zonas que transmiten una gran cantidad de luz.

Este contraste subjetivo debe ser tan alto como sea posible y por ello la observación debe hacerse en cuarto oscuro y con un negativoscopio adecuado.

La "definición" también es subjetiva y objetiva, la objetiva puéde medirse con un densitómetro registrado, y la subjetiva depende del valor de la diferencia de luz transmitida por dos campos próximos, cuanto mayor sea esta diferencia tanto mejor será la definición subjetiva; ésta queda influenciada por el contraste de tal forma que en dos imágenes con la misma definición objetiva, aquella que presente mejor contraste es la que un observador considerará como mejor definida.

1.2.5.3 Revelado.

Cuando la película impresionada se introduce en el revelador, los granos de hologenuro de plata que no han sido expuestos no sufren ninguna acción; Por el contrario este baño actúa rápidamente sobre los granos expuestos y son reducidos a plata metálica finamente dividida que son las que dan lugar a la formación de la imágen. Todos los reveladores utilizados en radiografía industrial contienen esencialmente :

- a. Agente revelador
- b. Agente acelerador
- c. Agente conservador

d. Agente moderador

e. Disolvente.

-Agente acelerador : El agente revelador (A.R) es un reductor de acción suave detallado más abajo. La misión del agente acelerador es acelerar el proceso de reducción. Como este tiene lugar en medio alcalino y en la reacción de oxidación-reducción para el A.R., se libera ácido Bromhídrico es necesario la presencia en el baño de una sustancia que la neutralize este acelerador alcalino es generalmente el carbonato sódico cuya acción es :



- Agente Revelador : Es un reductor de acción suave y de naturaleza orgánica, tal como la hidroquinona o el metal que reduce los granos expuestos y deposita plata metálica. El mecanismo de esta reacción de oxidación-reducción es el siguiente:



- Agente conservador : Como tal se emplea generalmente el sulfito sódico que evita que el agente revelador sea oxidado por la acción del aire y pierda sus propiedades. La fijación o fijación del oxígeno por el sulfito sódico tiene lugar según la reacción :



- Agente moderador : Este ha de actuar sobre el agente revelador evitando que actúe sobre los granos de halogenuro de plata que no han sido expuestos o sea aumenta la estabilidad del Bromuro de plata y en su consecuencia el moderador tiene que ser el Bromuro Potásico o algún halogenuro soluble.

- **Disolvente** : Se utiliza agua y si es posible agua destilada. Después de haber revelado un determinado número de película en la solución contenido en el tanque, el baño revelador va perdiendo actividad y al mismo tiempo disminuye su volumen. El agente revelador se oxida y el álcali se va neutralizando por la acción del ácido bromhídrico. A medida que se van revelando películas en el mismo baño va aumentando en él la concentración de halogenuros solubles.

Mantener el nivel del baño por adiciones de agua no es recomendable pues al diluir el baño que ha perdido actividad, se va disminuyendo ésta y en su consecuencia para conseguir el mismo grado de revelado se tendrá que aumentar el tiempo o la temperatura para compensar la pérdida de actividad.

En la práctica de la radiografía industrial se hace uso de una solución conservadora la cual incorpora al baño de revelado nuevas cantidades de agente revelador y álcali al tiempo que mantienen el nivel del baño.

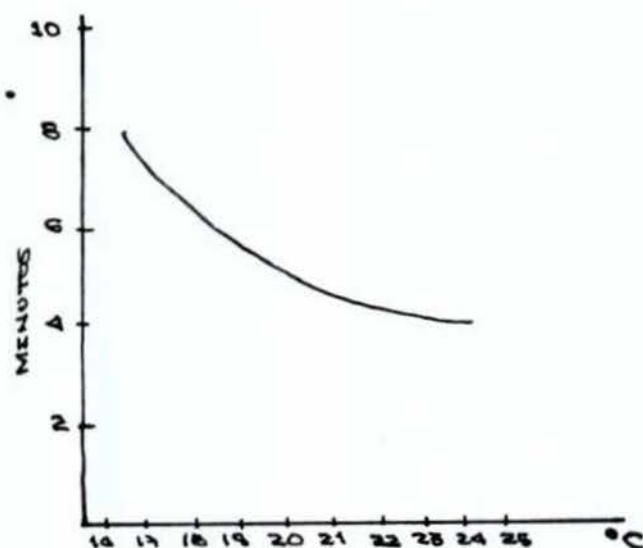
La cantidad de plata metálica depositada sobre la película por la acción del revelado y en su consecuencia su grado de ennegrecimiento o densidad depende no solamente de la exposición, sino también del tiempo de duración del revelado y de la temperatura a que esta operación se realice. Detrás de ciertos límites se puede decir que a más tiempo de revelado corresponde una mayor cantidad de plata depositada y por tanto una imagen más densa y al aumentar la temperatura se incrementa el grado de revelado.

Por ello, tiempo y temperatura son dos variables que se han de tener muy en cuenta en el proceso de revelado de las películas radiográficas.

Para un revelador frecuentemente utilizado en radiografía industrial se recomienda un tiempo de revelado de 5 min. a una temperatura de 20° C.

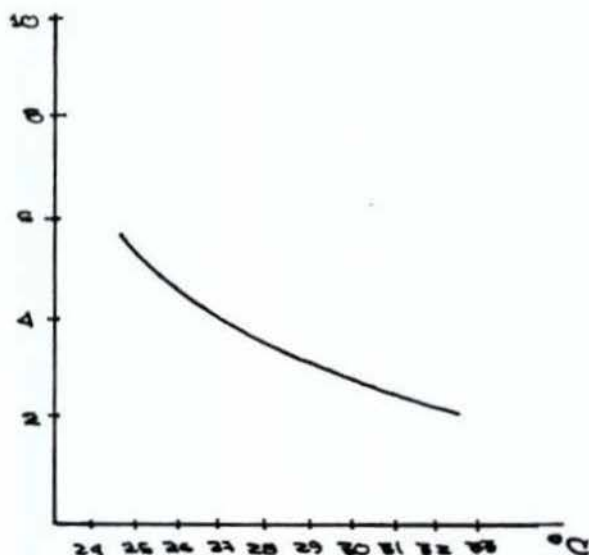
El gráfico de la figura muestra como varía el tiempo de revelado con la temperatura de este tipo de revelador:

VARIACION DEL TIEMPO DE REVELADO CON LA TEMPERATURA. REVELADOR NORMAL



Puede ocurrir que en ciertos climas no sea posible mantener la temperatura del tamaño revelador en los 20° C. En este caso será necesario reducir el tiempo de revelado de acuerdo con los valores que nos da el gráfico. No obstante si la temperatura es superior a los 24° C, la emulsión sensible tiende a desprenderse de la base y a dar lugar a películas defectuosas, sobre todo si el aclarado posterior se hace con agua más fría, pues en este caso la gelatina queda cuarteada dando lugar al defecto conocido con el nombre de "Reticulación". Con el fin de evitar esto se debe añadir al revelador sulfato sódico cristalizado en las proporciones de 105 grs/l del revelador. Esto para cuando la temperatura es superior a 24° C.

VARIACION DEL TIEMPO DE REVELADO CON LA TEMPERATURA
REVELADOR CON ACCION DE SULFATO SODICO



Por último conviene indicar que para que la acción del revelador sea uniforme, se deben agitar las películas para que no queden adheridas a ella burbujas que motivaría a la aparición de manchas blancas en la radiografía.

Terminado el revelado y antes de introducir las partículas o películas en el fijador deben ser escurridas durante 10 sgs. Sobre el tanque que contiene el revelador con el fin de que dejen en él la mayor parte del revelador y a continuación han de ser enjuagadas con agua durante otros 10 sgs para quitarles el exceso de revelador o lo que es mejor introducir las en un baño de parada o aclarado, que neutralice la acción del revelador. Este baño es un baño ácido cuya acción es del agente neutralizar el álcali del revelador y al mismo tiempo detener la acción del agente revelador. Se usa a tal fin ácido acético concentrado adecuadamente para que el CO desprendido por la reacción con el carbonato sódico no produzca burbujas en la superficie de la película

que pueda dañar la gelatina.

1.2.5.4 Fijado.

La etapa final del tratamiento químico de las películas consiste en la desensibilización o fijado, operación en la que ha hacer desaparecer de la emulsión sensible el halogenuro de plata que no fue activado y dejar solo en la película la plata metálica que forma la imagen. Además el baño fijador debe actuar sobre la gelatina endureciéndola, por ello las fijadores usadas en radiografía industrial pertenecen al grupo de fijadores ácidos endurecedores.

Un fijador de este tipo está integrado por :

- Agente fijador : Es el Fiosulfato sódico (hiposulfito) o amónico en esta ocasión dicho agente reacciona con los halogenuros de plata insolubles, formando un complejo soluble en agua de acuerdo con la reacción,



quedando la emulsión desprovista de halogenuros sensibles.

- Agente ácido : El baño fijador debe contener un ácido libre capaz de neutralizar las pequeñas cantidades de álcali que puedan contener las películas pues el teisulfato se lleva a cabo la reacción :



- Agente endurecedor : Su misión es evitar que la gelatina se hinche y ablande durante el lavado posterior al fijado. Este agente endurecedor es el alumbre potásico $AlK(SO_4)_3 \cdot 24 H_2O$.

El alumbre potásico presenta el inconveniente de formar un compuesto insoluble integrado por la gelatina, el alumbre y el tiosulfato, pero es posible evitar la formación de este compuesto con la adición de una sal amónica como el cloruro amónico.

- Solución reguladora : Dada la sensibilidad del tiosulfato a las variaciones de acidez y alcalinidad y de la incorporación al baño de fijador de las cantidades pequeñas de álcali que puedan llevar las películas es preciso que el baño contenga una mezcla tampón o solución reguladora que actúe sobre estos cambios de acidez.

En este caso la solución tampón es el sulfito sódico y el ácido acético. De una forma aproximada se puede decir que el tiempo para el fijado oscila entre 2 y 5 min. pero es frecuente prolongarlo hasta el doble de el tiempo del revelado.

Cuando las películas son extraídas del fijador, la emulsión se encuentra saturada de los componentes de este baño, los cuales, de permanecer en ella pueden descomponerse produciendo una decoloración de la imagen. Para evitar esto es preciso desaparecer todos estos productos lo que se consigue mediante el lavado de las películas. Este lavado se hace en tanque con agua corriente y si el caudal es suficiente el tiempo de lavado será corto.

Como regla de aplicación práctica se puede decir que el tiosulfato sódico y los demás componentes de los baños se eliminan en un lavado de 10 min, si el caudal del agua es suficiente para que el contenido del tanque de lavado se renueve a veces por hora siempre que la temperatura del agua no sea inferior a las de 10°C.

de plomo de objetos de mediano o fuerte espesor de metal ligero. Cuando la energía disponible no permite con un tiempo adecuado de exposición obtener buenas radiografías.

f. Las películas Kodak : Son suministradas por la Kodak S.A. en España. Fabricadas por la "Eastman Kodak Company U.S.A. ; Kodak Limitra, de Inglaterra y Kodak Patme de Francia.

•• De la Eastman Kodak Company,

- Kodak industrial X-Ray Film tipo R : de grano fino o ultrafino, para detalles muy finos. Se usa en la industria electrónica.
- Kodak industrial X-Ray Film tipo T : de grano extrafino, alta contraste y cuya velocidad se encuentra entre las de tipo M y AA. Es aplicable en la radiografía con película múltiple.
- Kodak industrial X-Ray Film tipo A-A : De grano fino y grano gran contraste para ser usada con o sin pantallas de plomo. Sus características son similares a las de tipo M y T, con mayor tamaño de grano. Da una excelente definición con rayos X ó Gamma.

•• De la Kodak Limited :

- Microtex : de grano extrafino y elevado contraste. Presenta una considerable latitud de revelado lo que permite tiempos y temperaturas superiores. Su rigidez es adecuada para radiografías de aleaciones ligeras, con rayos X de energía media. Con alta energía se detectan pequeñas defectos. Es recomendable para su uso con aceleradores lineales o con el betatrón.
- Cristallex : de grano fino y gran contraste y es cuatro veces superior a la Microtex. Tiempos cortos de exposición.

1.2.5.5 Películas radiográficas comerciales.

En el mercado nacional tan solo se consiguen dos marcas a saber: Kodak y Agfa - Gevaert.

Entre las películas Agfa-Gevaert están :

- Con la denominación **Structurix**, que suministra cinco tipos de película radiográficas industriales que se distinguen por una letra y un número. Sus características son :

- a. **Structurix D2** : De grano extremadamente fino y elevado contraste recomendable para obtener radiografías con una extrema calidad de detalles en objetos de pequeña espesor de acero o espesores medios de aleaciones ligeras.
- b. **Structurix D4** : Posee un grano extrafino, sensibilidad media y elevada contraste, con radiación X de tensión media. Se pueden radiografiar pequeños espesores de acero o espesores medios en aleaciones ligeras.
- c. **Structurix D5** : Por su elevado contraste y gran sensibilidad, su grano firme y su densidad uniforme es adecuada para el examen de toda clase de objetos tanto con energías de radiación baja como altas.
- d. **Structurix D7** : Película de grano muy fino y gran sensibilidad, contraste elevado. Se puede emplear para las radiografías de espesor medio o relativamente grande de aleaciones ligeras o débil espesor de acero. Es recomendable también para la Gammagrafia de objetos de espesores medios de acero. Es la usada en nuestro laboratorio de ensays.
- e. **Structurix D10** : De alta sensibilidad y contraste relativamente elevado. Se usa en radiografías con o sin pantalla

- Industrex D_m de grano medio y doble rapidez que la Cristallex presenta un elevado contraste y su grado de definición es casi la de la anterior. Radiografía de gruesos espesores. Gamma grafía de uniones soldadas.
- Kodirex : Velocidad del doble que la Industrex D. Gran tamaño de grano.
- * De la Kodak Pathé : Fabrica cinco tipos de película para ser usadas con o sin pantalla reforzadora de plomo y son análogas a las Americanas de la misma denominación. Están la :
 - Kodirex : Equivalente a la inglesa.
 - Definix : Equivalente a la Cristallex inglesa y a la A-A americana.

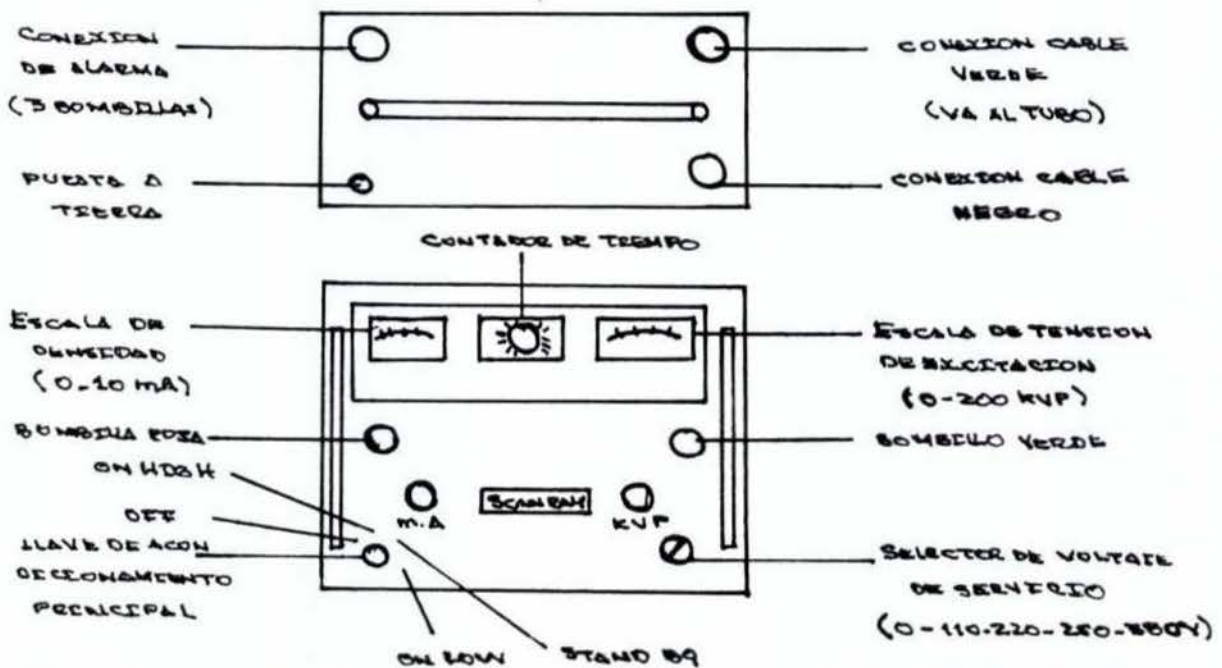
2. ESTRATEGIAS DE APRENDIZAJE

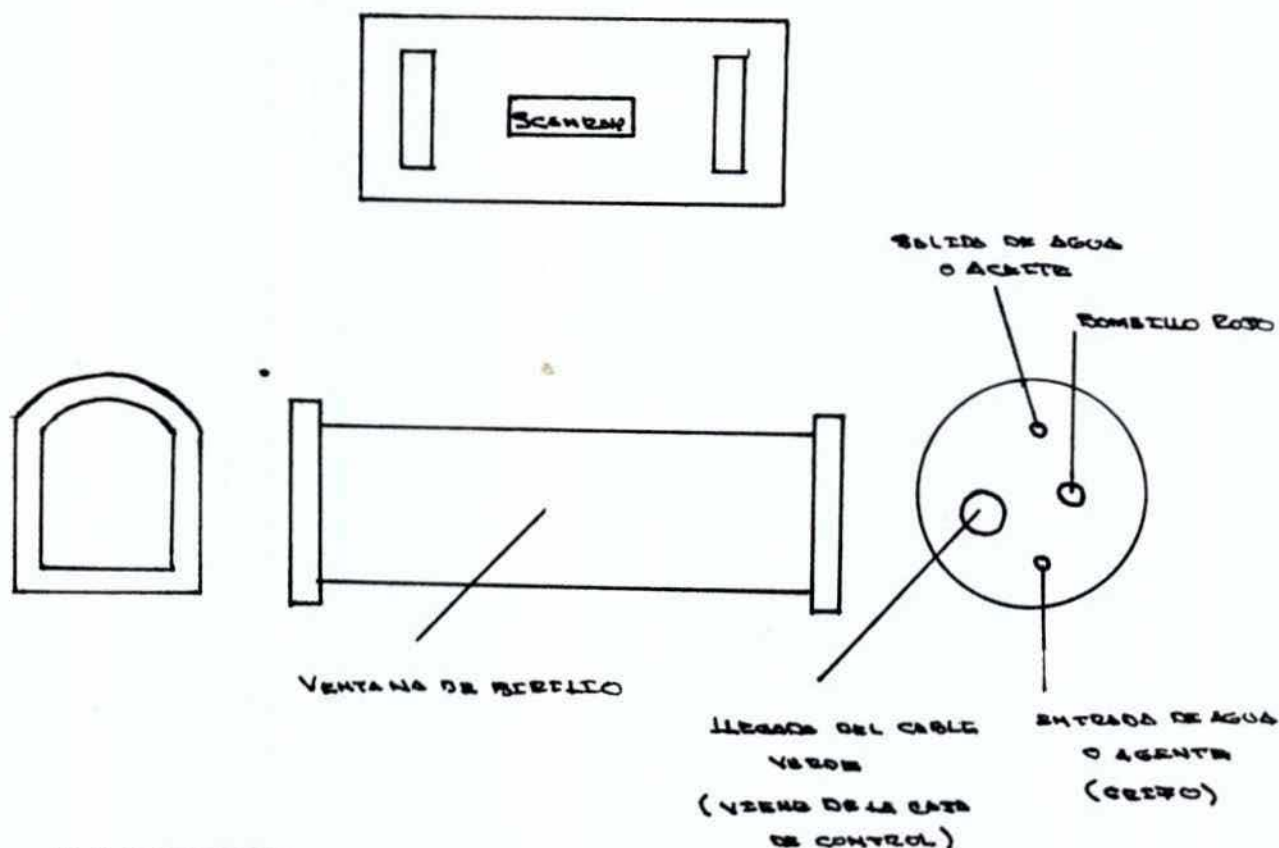
2.1 EQUIPOS.

El equipo utilizado para esta prueba es un aparato radiográfico marca Scanray, el cual cumple con el principio de construcción y funcionamiento de todo aparato radiográfico. Ellos son :

- Un aparato radiográfico consta de las siguientes partes :
 - a. Un tubo generador de rayos X, de vidrio especial.
 - b. Un transformador para la alta tensión de excitación.
 - c. Una caja de control, contenidos los órganos de regulación de la tensión de excitación, la corriente anódica y el tiempo de exposición.
 - d. Un esquema o un carro de soporte y los cables de conexión.

- Un esquema aproximado del ScanRay en su aspecto exterior sería :





2.2 ELEMENTOS.

Entre los elementos accesorios de importancia fundamental en esta prueba se citan :

2.2.1 Densitómetro.

Para medir la densidad se utiliza un aparato llamado densitómetro. En uno de los tipos de este instrumento se coloca a un lado de la película una fuente luminosa y en el lado opuesto una célula fotoeléctrica. La corriente producida en la célula fotoeléctri-

ca se lee sobre un microamperímetro provisto de una escala graduada en unidades de densidad. En el usado en el laboratorio se registra al contraste objetivo y aparece un valor sobre una pantalla digital.

Cualquier persona con poca experiencia puede llegar a evaluar las densidades mediante un simple examen visual.

Son las diferencias de densidad en la fotografía las que revelan la presencia de defectos en la soldadura.

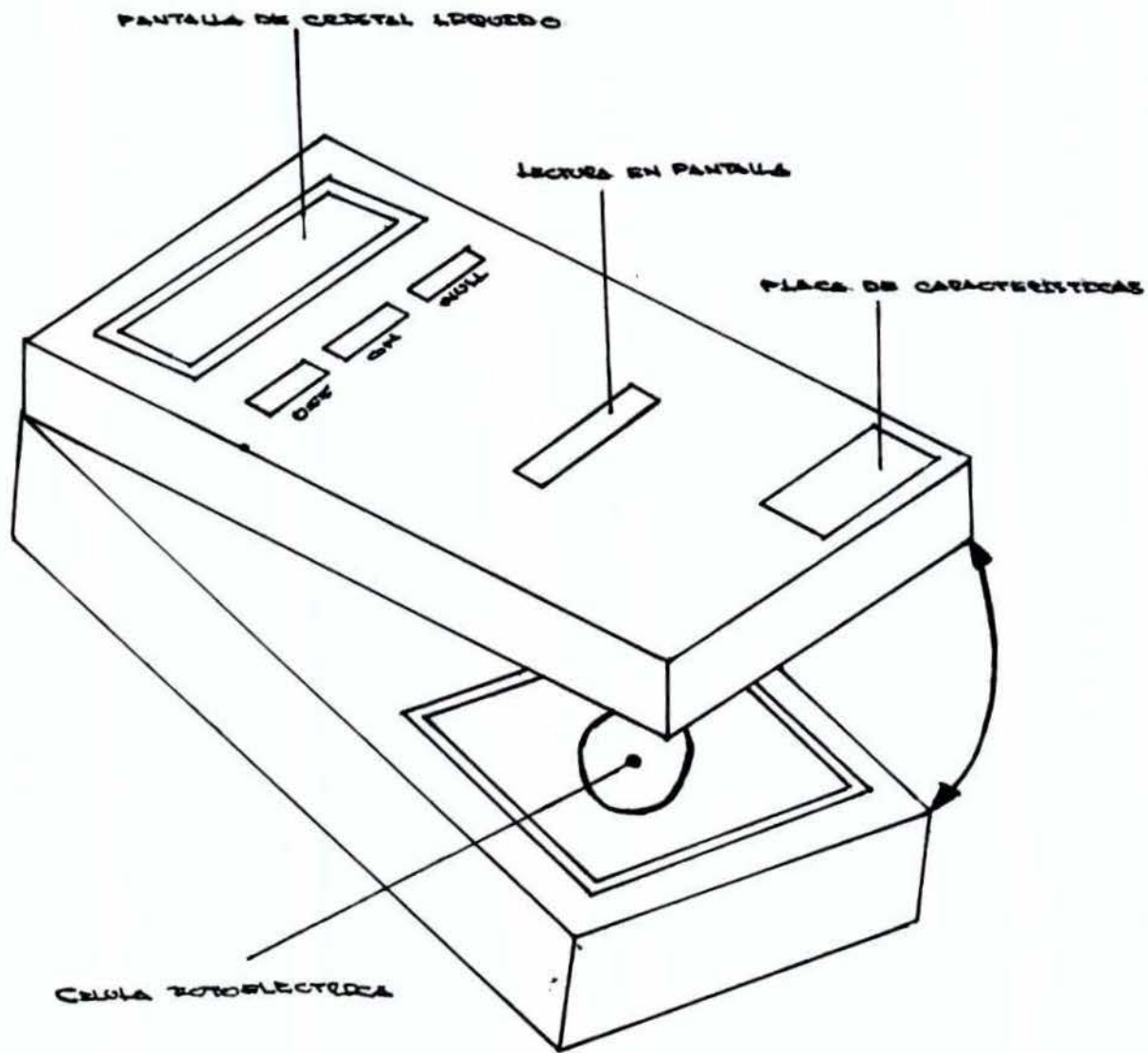
Después del revelado y fijado y una vez seca la película se miden las densidades con un densitómetro.

La diferencia de densidad entre dos zonas adyacentes se denomina como sabemos "contraste". Si estas diferencias de densidad son medidas con un densitómetro el valor que se encuentra corresponde al contraste objetivo.

La definición también objetiva puede medirse con un densitómetro del tipo registrador que dibuja un gráfico al recorrer una banda la película.

2.2.2 Intensímetro de Radiación.

Existen, para determinar la intensidad de radiación los sumadores e intensímetros. Los sumadores son los aparatos que miden exposición en Roentgen miliroentgen, milireme, cuantas. Los intensímetros son los aparatos que miden el índice de exposición o cantidades proporcionales al índice en MR/h, r/s, cuantas/min, mrem/h.

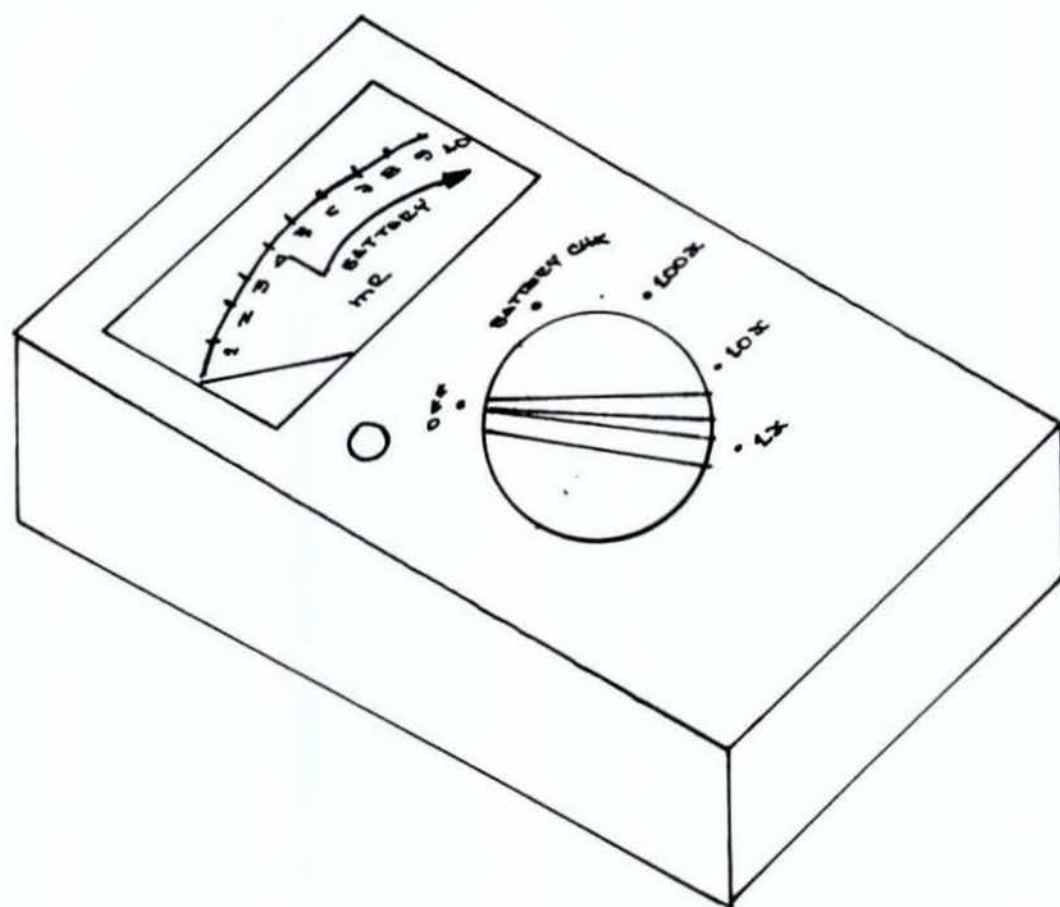


DENSITOMETRO DIGITAL

Todos los aparatos medidores de los efectos de la radiación ionizante por complicados que sean pertenecen a una de estos dos tipos: Sumadores o Intensímetros. Hay algunos en que por acción de un interruptor actúan como sumador o como intensímetro.

En la figura aparece el intensímetro utilizado en la prueba de rayos X en el laboratorio (gráfica aproximada).

El intensímetro puede ser del tipo de cámara de ionización o del tipo de contador Griger-Muller y este indicará el tipo o mejor, el indica de exposición en cualquier punto.



INTENSIMETRO TIPO GEIGER-MULLER

2.2.3 Dosímetros de Lectura Directa.

Para la medición de la radiación absorbida cada operador está provisto de un dosímetro especial de bolsillo. Su tamaño es de un esferógrafo pequeño y se sujeta con un clip.

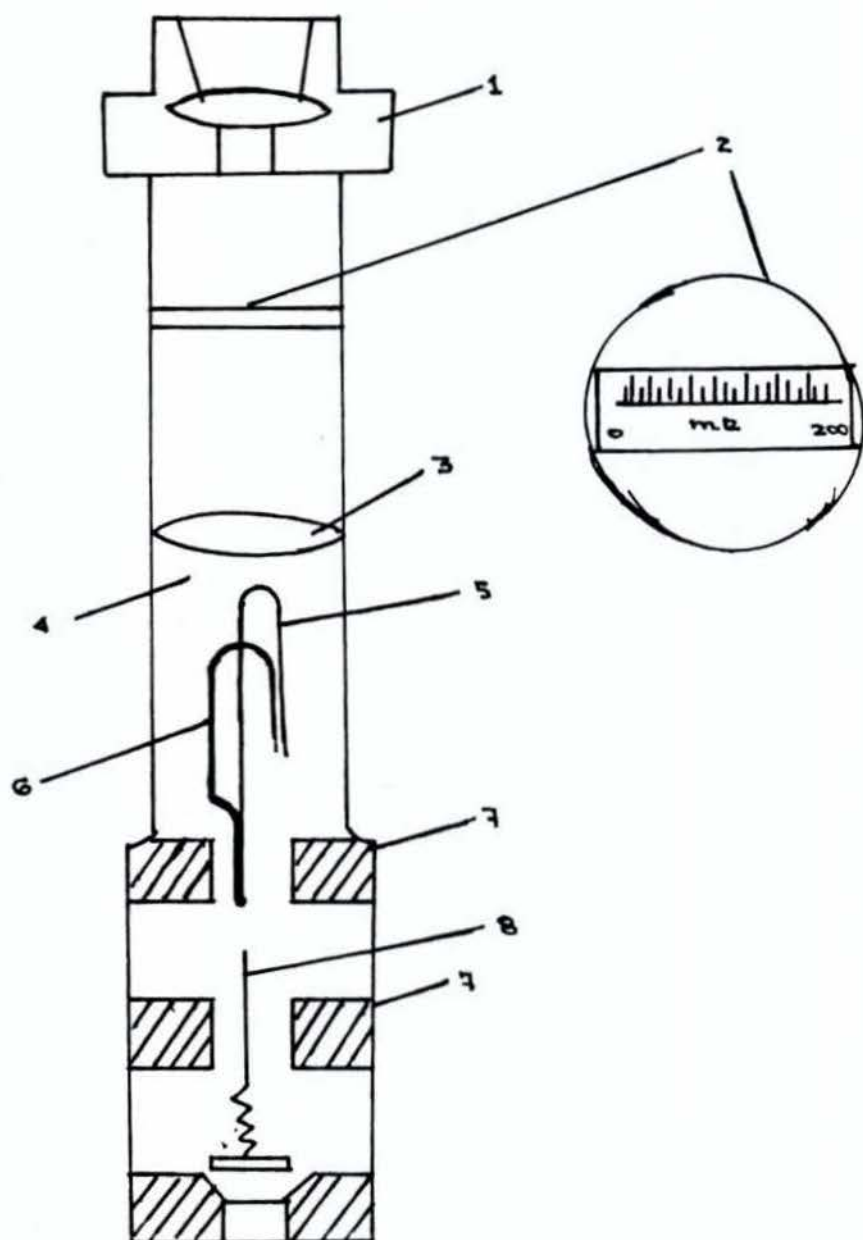
El dosímetro está formado por un cuerpo cilíndrico en el cual se alojan el elemento sensible, una escala graduada y un microscopio simple.

El elemento sensible ubicado en la cámara de ionización está formado por una fibra finísima de cuarzo de 0,005 mm de diámetro cuyos extremos van fijados a los de un hilo de acero; La fibra muy próxima al hilo puede curvarse fácilmente apartándose del hilo de acero. La escala situada entre el ocular y el objetivo está graduada en mR. En el extremo opuesto al ocular está situado un pistoncillo que sirve para cargar el aparato.

Para cargarlo se emplea corriente continua. Pulsando el pistoncillo se establece contacto con el extremo del hilo de acero. Este se carga y repele la fibra que se curva apartándose del hilo. Observando a contraluz se gradúa la carga hasta llevar la fibra a coincidir con el cero de la escala graduada. El dosímetro que así se prepara para su uso.

De su funcionamiento sea nota :

Cuando el aparato está en presencia de una fuente radiactiva los rayos por ella emitidos ionizan el aire de la cámara de ionización, haciéndola conductora por lo que el dosímetro pierde carga. En consecuencia la fibra de cuarzo se aproxima al hilo de hierro apartándose del cero de la escala.



DOSIMETRO

1. Ocular
2. Escala graduada en mR
3. Objetivo
4. Cámara de ionización
5. Fibra de cuarzo (elemento sensible)
6. Hilo de hierro

7. Aisladores

8. Pistoncillo para cargar el aparato

Evidentemente por el desplazamiento de la fibra proporcional a la pérdida de permanencia del aparato de carga se va acrecentando dicho desplazamiento a medida que aumenta el tiempo de permanencia del aparato bajo la influencia de las radiaciones, de tal forma que en cada instante la posición de la fibra señala sobre la escala la cantidad de radiaciones absorbidas por el aparato desde el momento en que fue cargado y por tanto la cantidad absorbida por el operador. Como medida de precaución periódicamente se someta a los operadores a un análisis de sangre.

2.2.4 Indicadores.

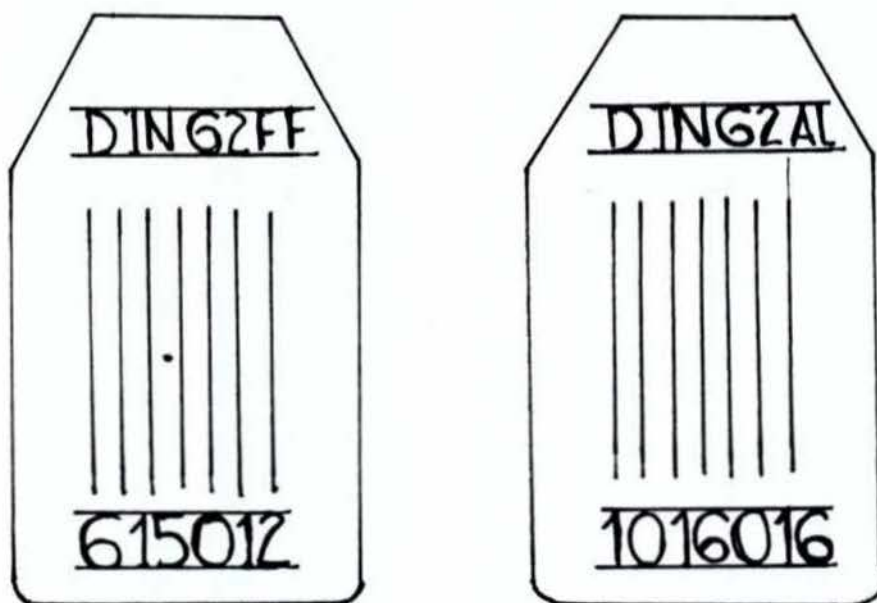
Atendiendo a la calidad de imagen que es consecuencia de la técnica radiográfica seguida es necesario plasmarla en un valor numérico y para ellos se recurre a los indicadores de calidad de imagen (I.Q.I).

La denominación indicador de calidad de imagen aceptada por el Instituto Internacional de la Soldadura sustituye a la palabra "Penetrómetro", anteriormente usada en Europa.

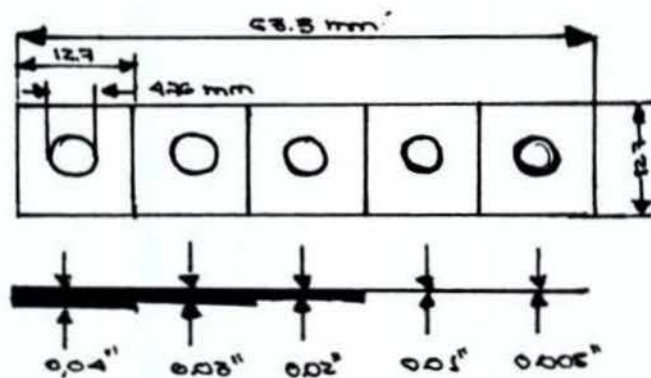
El término Penetrómetro puede prestarse a equívocos en el sentido de no haber regulares o relación entre la indicación dada por el I.Q.I. (defectos provocados de formas regulares y aristas vivas) y los más pequeños defectos que pueda presentar el objeto examinado (de contornos imprecisos de formas irregulares).

El indicador de calidad de imagen que en general es un pequeño

En la siguiente gráfica aparecen tipos de indicadores :



INDICADORES DE HILOS : (DIN 54 109 DE 1962).



INDICADOR DE ESCALONES A.P.I.-A.S.M.E

dispositivo constituido por un material de propiedades análogas o naturaleza idéntica desde el punto de vista de suponer de absorción de la radiación a la de la pieza que se ha de radiografiar, puede tener una serie de fines distintos tales como:

- Un método corriente de especificar técnicas radiográficas es el de referirse a un valor de la sensibilidad del indicador de calidad de imagen que ha de ser alcanzada para que la radiografía se considerado aceptable.
- La sensibilidad alcanzada en partes diferentes de un mismo objeto incluso sobre la misma radiografía puede no ser constante debido a variaciones de espesor, entonces el indicador puede ser utilizado para señalar la sensibilidad obtenida en los distintos zonas de la radiografía.
- Existe cierta relación entre la sensibilidad para detectar un defecto y la sensibilidad del indicador de calidad, sobre todo cuando se trata de un defecto complejo, casi siempre si se tienen mayor sensibilidad para el indicador, la correspondiente para la detección del defecto será mayor.

Las características esenciales que deben poseer un indicador de imagen son los siguientes:

- a. Ha de ser sensible en sus lecturas a los cambios en la técnica radiográfica seguida para la obtención de la radiografía.
- b. El método de lectura de su imagen debe ser lo más sencillo y concreto posible. Su interpretación debe ser siempre la misma.
- c. El indicador de calidad debe ser versátil y de aplicación sencilla y debe poder ser usado en superficies curvas como

como rugosas.

- d. El indicador de calidad de imagen deben ser pequeños, su imágen que aparece en las radiografías no debe ocultar zonas o partes útiles de la imágen.
- e. El indicador ha de incorporar alguna marca o identificación de su tamaño.

Entre los tipos de indicadores están ::

- a. Indicadores de hilos : Formados por una serie de hilos de diámetros crecientes embatidos en una lámina de goma o material plástico.
- b. Indicadores de escalones : Constituido por una placa de espesores crecientes provistas o no de uno o varias taladros de igual diámetro.
- c. Indicadores de escalones con cifras de referencia : En ellos cada espesor está provisto de un cierto número de taladros formados una cifra de referencia característica.
- d. Indicadores de escalones con taladros calibrados : En general el diámetro del taladro es igual al espesor del escalón sobre el que se encuentra.
- e. Indicadores de taladros calibrados, con una placa de espesor constante : En este caso el espesor de la placa representa un porcentaje determinado del espesor a radiografías. Esta provista de una serie de taladros de diámetros crecientes, iguales a múltiples del espesor de la placa. En su lectura se hace notar la presencia en la imágen de los taladros visibles.
- f. Indicadores contra las ranuras sobre una placa de espesor constante : ranuras de ancho uniforme y profundidad variable o viceversa.

2.3 PROCEDIMIENTO PARA TOMAR UNA RADIOGRAFIA.

2.3.1 Seguridad Radiológica.

Los aspectos fundamentales de la seguridad radiológica están detallados al principio de este informe. Inclúyese avisos de seguridad, y en la descripción de equipos se enuncian el uso de intensímetro y dosímetro de lectura directa inclusive aparatos imprescindibles en la seguridad radiológica.

2.3.2 Instalación del equipo.

Tiene que ver esto con la seguridad radiológica ya que el equipo debe instalarse en un lugar que este protegido, o más bien que los materiales y personas estén protegidas contra la maligna acción de la radiación ionizante.

Como se dijo el haz de electrones no debe incidir sobre corredores, talleres u otro establecimiento donde congregarse personas.

La instalación del equipo debe ser sencilla sin complicaciones que puedan repercutir en un momento de emergencia y en consecuencia daños graves.

2.3.2.1 Tensión Anódica.

Para la tensión anódica hay un selector de tensiones que presenta la siguiente gamma :

110 V - 220 V - 250 V - 380 V.

En nuestro medio es frecuente solo usar 220 y 110 V para dicho

fin.

2.3.2.2 Colocación de la manguera para refrigerar (agua, aceite, aire).

Hasta donde hemos estudiado sabemos que para la obtención de rayos X se lleva a cabo un proceso termoiónico, es decir se sucede en el equipo una disipación relativamente grande de calor, lo que conlleva a tener que refrigerar el equipo. Para esto se toma la manguera adecuada, se lleva a un grifo, del grifo pasa al aparato por medio de una toma apropiada y que es la especificada como entrada de refrigerante.

Como el fluido necesita salir, existe entonces una salida que va al estanque o en su defecto a la cañería.

2.3.2.3 Colocación de la alarma (3 bombillas).

Hay en la caja de controles (ver figura del equipo) un enchufe que es el de la alarma, el cable enchufado presenta 3 bombillas en serie que indican que el aparato está listo para accionar, para determinar el tiempo, etc.

2.3.2.4 Colocación de cables eléctricos.

Por norma de seguridad es lo último que se hace y esta colocación son conexiones simples como la de cualquier aparato doméstico.

2.2.3 Cálculo de la distancia de la pieza.

Cuando la emisión de una radiación X o Gamma es constante, la intensidad de la radiación que llega al objeto viene determinada por la distancia, ya que, como sucede con las otras fuentes de otras formas de energía, el flujo de la misma o la intensidad total que pasa a través de toda la superficie cerrada que envuelve a la fuente emisora es constante. Por tanto la intensidad de radiación que atraviesan un elemento de superficie es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el objeto y el foco emisor.

Este principio se puede expresar así :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

2.3.4 Cálculo del tiempo de exposición (aprox. 3-5 min. 5-8 min)

El valor de exposición E, es directamente proporcional a la radiación recibida por la película. La cantidad es de radiación a vez en función de la distancia foco-película, del tiempo de exposición y de la intensidad de la radiación I. La expresión que nos da la exposición será :

$$E = \frac{I \cdot T}{F^2}$$

Esta exposición puede ser modificada por la interposición en el trayecto de la radiación de un determinado material absorbente según una ley exponencial que no es otra que la que rige la absorción de la radiación por la materia y que en este caso se podrá escribir :

$$E = E_0 e^{-ut} \text{ (explicada anteriormente)}$$

Por otra parte es posible determinar una fórmula sencilla que nos dé directamente el tiempo de exposición en función de la distancia foco-película, intensidad de la radiación, espesor del material absorbente y su coeficiente de absorción. Esta expresión es :

$$T = T_0 e^{-ut \frac{F^2}{I}}$$

2.3.4.1 Cálculo del Kilovoltaje (tensión de excitación).

Se deduce de 120 Kv a 100 Kv. No obstante puede recurrirse a la expresión :

$$\lambda_{\min} = hc/eV \quad \text{donde } V = h.c/e \quad \lambda_{\min}$$

donde : λ_{\min} V = Tensión de excitación

λ_{\min} = Longitud de onda mínima de la radiación

C = Velocidad de la luz

e = Carga del electrón.

h = Constante de Plank ($6,624 \times 10^{-28}$ erg/seg.)

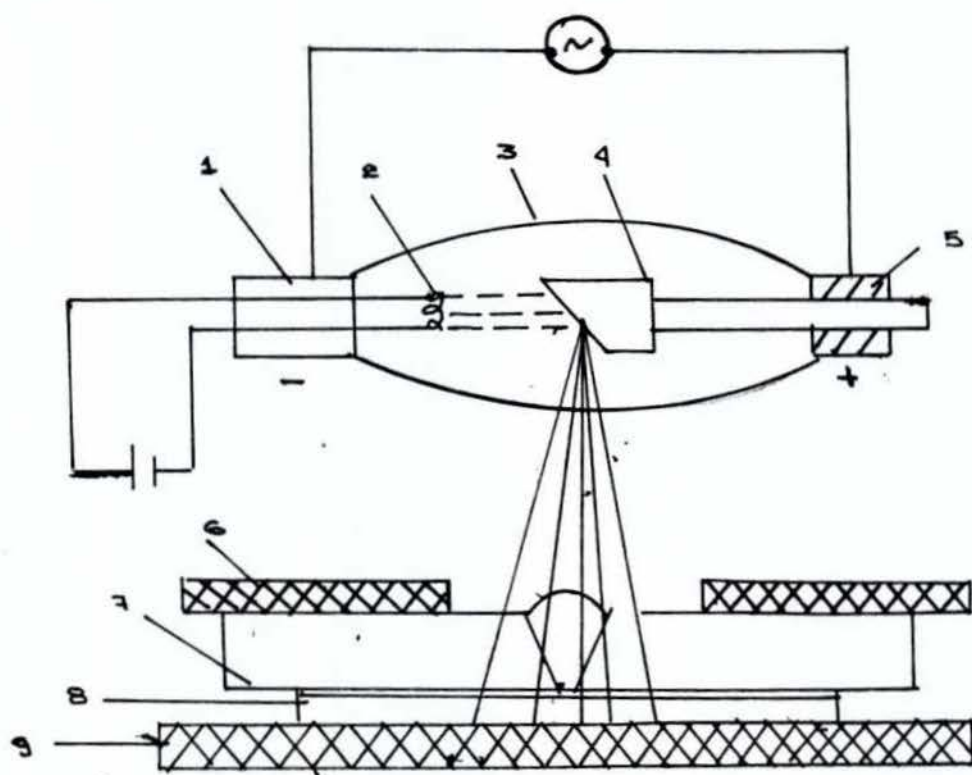
2.3.4.2 Cálculo del Miliamperaje.

Se deduce de 3 a 5. A medida que la tensión crece, crece con ella la intensidad de la radiación.

2.3.5 Colocación de la película en la pieza y del Penetrómetro.

1. Cátodo de cobre

2. Filamento de tungsteno
3. Ampolla de vidrio
4. Anticátodo de tungsteno
5. Anodo de cobre
6. Pantalla de plomo
7. Probeta (pieza)
8. Película radiográfica
9. Pantalla de plomo.



La probeta que se debe examinar se apoya sobre una placa foto-

gráfica situada sobre una pantalla de plomo que absorbe las radiaciones.

Sobre la parte superior de la probeta se dispone otra pantalla de plomo, perfilada de forma que absorba las radiaciones que no interesan la zona que se va a examinar y que son nocivamente al operador.

Los rayos penetran en el material y llegan a la placa fotográfica con distancia o distinta intensidad según el mayor o menor debilitamiento sufrido al atravesar la probeta.

La existencia de un defecto produce el mismo efecto que una variación de espesor, ello es, una absorción distinta de la película de las radiaciones por lo que correspondiéndose con el defecto la placa mostrará una zona más clara o más oscura según el tipo y magnitud del defecto. Los rayos que atraviesan una cavidad se debilitan menos, impresionando más la placa que presentará una zona más oscura; si por el contrario el defecto consiste en una inclusión metálica de mayor densidad que el material circundante, los rayos se debilitan más y la placa queda menos impresionada presentándose una zona más clara.

Las norma UNE 14011, describe los defectos en las uniones soldadas detectables con los rayos X.

En cuanto al penetrómetro, se coloca en el lado de la fuente en una de los extremos de la soldadura antes de radiografiarla. Si la radiografía obtenida revela el penetrómetro y sus agujeros se considera probado que cualquier defecto del 2% se descubrirá también.

2.3.6 Accionamiento del Panel en la Caja de Controles.

Este accionamiento lleva una secuencia lógica en su proceder:

- a. Llave de seguridad : Es un interruptor en forma de cerradura con su respectiva llave, la cual permite la imposibilidad de accionar el equipo sin la llave.
- b. Regulación del tiempo de exposición : Provisto el panel de un botón regulador a manera de contador de tiempo o "Timers". La escala graduada en minutos va de 0 a 10. Se selecciona según el cálculo del tiempo de exposición.
- c. De los controles de mA y KVP : Estos se giran alternativamente seleccionándose la tensión de excitación y la intensidad según los cálculos o tipo de radiación requerida o sea Dura, muy Dura, Blanda, etc. Empero en este enciso aún no es tiempo de seleccionar sino de preparar a cada variable, entonces aún no se giran sino que se hundem. (corrección).
- d. De los controles de mA y KVP : Una vez hundidas o presionados alternativamente los botones de mA y KVP, los bombillos rojos y verde están encendidos ahora si se giran simultáneamente dichas perillas seleccionando el mA y el KVP de acuerdo al tipo de radiación requerida según cálculos.
- e. Tiempo completado de exposición : Cuando termina el tiempo de exposición los controles anteriores se regresan al punto cero.
- f. Retirar llave : A fin de evitar imprudencias debe retirarse la llave.

2.3.7 Condiciones iniciales del equipo.

Es el sentido común tener presente que el aparato debe quedar en

las condiciones iniciales para que así en el próximo ensayo no haya incertidumbre y errores que pueden ser no convenientes para el operador.

2.3.8 Revelado de la Radiografía.

Todo el proceso de revelado ~~apararece~~ detallado en el numeral 1.2.5 inciso 1.2.5.3.

- a. Se retira la cubierta en cuarto oscuro : Si esto no se cumple la radiografía se opaca y distorsiona por la acción del aire y la luz.
- b. Se sumerge en el revelador : Tiempo empleado es aproximadamente, pero todo esto depende de la calidad del baño de revelado y de la película empleada.
- c. Se lava con agua : Esto retira los álcalis y ácidos sobrantes de la película como se mencionó todo esto en el numeral 1.2.5 inciso 1.2.5.3.
- d. Se sumerge en el fijador : El tiempo es de 4 minutos aproximadamente. En el inciso 1.2.5.4 se dedica también unas cuantas hojas al fijado por ser este un proceso definitivo en la nitidez de la película.
- e. Se seca el ambiente : Explicado anteriormente (ver numeral 1.2.5).
- f. Se mide la densidad : Para esta medida disponemos del aparato descrito anteriormente denominado Densitómetro.
- g. Análisis en el Negatoscopio : Este análisis se lleva a cabo a contraluz en la pantalla negatoscópica y de acuerdo con las características detalladas podemos emitir juicios a priore de lo observado. Recordando lo que se dijo de "contraste objetivo", etc...

3. ESTRUCTURAS DE EVALUACION

3.1 CALCULOS.

Realmente como se hizo fue un simulacro de la experiencia no se hicieron cálculos correspondientes.

De realizar tal experiencia deben tenerse el 100% asimiladas las deducciones descritas através del desarrollo del informe, tales como ::

- Cálculo del tiempo de exposición.
- Cálculo de las distancias foco, fuente - objeto- película.
- Cálculo de la intensidad de Radiación y algo importante : las unidades.
- Cálculo de la tensión de excitación en KV y de la intensidad en mA.

3.2 OBSERVACIONES.

Las únicas observaciones hechas fueron a una serie de placas radiográficas con imágenes de uniones soldadas y sus defectos.

Estas incluían tipo de preparación, posición de Soldeo, protección, procedimiento y otros, los cuales en los anexos están respectivamente analizados de las placas observadas con la pantalla fluoroscópica.

Este análisis u observación es importante ya que nos adiestra

un poco sobre reconocimiento de defectos o análisis de la calidad radiográfica.

3.3 CONCLUSIONES.

La radiología industrial es un interesante campo que encierra una serie de procesos que deben seguir pautas minuciosas para un buen éxito.

Se concluye como primera medida que lo más importante en radiología industrial es la seguridad radiológica, claro está sin echar de menos las demás etapas del proceso.

Completando la seguridad radiológica con las normas y recomendaciones prescritas obtendremos buenos resultados al final.

Es curioso cuando se comenta que en el campo industrial la rama de la radiología es una de las primeras en cuanto a prevención de accidentes se refiere, pero esto, se dice, no es por miedo a las radiaciones sino porque se hace uso de la inteligencia y del raciocinio humano.

Como etapa inicial se deduce que para comprender la rama de la radiología industrial hay que tener desde antes muy claro, concepciones elementales que ayudarán en gran parte a la comprensión mas a fondo de los distintos fenómenos llevados a cabo.

Es fundamental también conocer los principios de radiología como son por ejemplo el origen de un foco o una fuente radiactiva (X o Gamma) y la manera como sufren diversos cambios para obte-

ner un fin determinado. Como también es importante el conocimiento de los equipos utilizados de una manera intrínseca, esto es, principios básicos, constituyentes, accionamiento, etc.

Es una lástima no haber dispuesto de un acondicionamiento apropiado para haber efectuado tan emocionante experiencia.

Fue importante el analizar películas radiográficas reveladas porque como enunciamos anteriormente nos adiestra un poco en análisis de defectos en películas que tal vez lleguen posteriormente.

3.4 CUESTIONARIO.

- a. Como se lleva a cabo la generación de una radiación Ionizante X y en que elementos ?
- b. Qué es exposición y cuál es el índice de exposición. Cuales son sus unidades ?
- c. Como se lleva a cabo la toma de radiografías industriales ?
- d. Qué constitución presenta una película radiográfica normal ?
- e. Qué elementos intervienen en la medición de la contaminación radiactiva y como funcionan ?

COLECCIÓN DE RADIOGRAFÍAS DE SOLDADURA EN LOS ACEROS

Placa	Tipo de sold. (Preparación)	Posición de la soldadura	Color	Método Radiográfico	Espesor	Protección	Procedimiento de soldadura	Observaciones.	Tipo de defecto
1	V	VERTICAL	AZUL	≤ 150KV	≤ 10 mm.	NO SCREENS	ARCO METÁLICO	SOCAVACIONES: ranura o canal en la superficie de la plancha a lo largo de la soldadura.	30
6	X	VERTICAL	VERDE	≤ 150KV.	11-30 mm.	PLOMO	ARCO METÁLICO	INCLUSIONES DE ESCORIA EN CUALQUIER FORMA: escorias u otras sustancias ajenas atrapadas durante la sold.	20
9	V	VERTICAL	ROJO	≤ 150KV.	15 mm.	PLOMO	ARCO METÁLICO	LÍNEAS DE ESCORIAS: escorias u otras sustancias ajenas contenidas en cavitación extendida.	21
2	V	VERTICAL	ROJO	≤ 150KV.	10 mm.	SIN PROTECCIÓN.	ARCO METÁLICO	PENETRACION INCOMPLETA: Falta de fusión en la raíz de la soldadura o un vacío dejado por la sold. en el relleno.	27
6	I	PLANA	ROJO	≤ 150KV	4 mm	SIN PROTECCIÓN.	ARCO METÁLICO	GRIETAS TRANSVERSALES: discontinuidad producida por fractura en el metal.	29
7	X	VERTICAL	ROJO	150-250 KV.	20 mm.	PROTECCIÓN ESPECIAL	ARCO METÁLICO.	PENETRACION INCOMPLETA: Falta de fusión en la raíz de la soldadura o un vacío dejado por la sold. en el relleno.	27
3	V	PLANA	ROJO	150-250 KV.	50 mm.	PLOMO	ARCO METÁLICO.	GRIETAS LONGITUDINALES: discontinuidad producida por fractura del metal.	28
4	V	PLANA	ROJO	≤ 150 KV.	6 mm.	SIN PROTECCIÓN.	ARCO METÁLICO.	CAVIDADES PICADAS (CAVITACIONES): debido a gases atrapados en la extensión del tubo, caldera, etc.	19
7	V	PLANA	VERDE	≤ 150 KV.	11-30 mm.	PLOMO	ARCO METÁLICO.	PENETRACION INCOMPLETA: Falta de fusión en la raíz de la sold. o un vacío dejado por la sold. de relleno.	27
0	V	VERTICAL	VERDE	≤ 150 KV.	≤ 10 mm.	SIN PROTECCIÓN.	ARCO METÁLICO	SOCAVACIONES: ranura o canal en la superficie de la plancha a lo largo de la soldadura.	30
5	V	PLANA	VERDE	≤ 150 KV.	11-30 mm.	ESPECIALES.	ARCO METÁLICO.	DEFECTO EN JUNTA DE COSTURA: sombra oscura en la junta de 2 costuras.	25
1	V	PLANA	ROJO	≤ 150 KV.	≤ 10 mm.	SIN PROTECCIÓN.	ARCO METÁLICO.	FALTA DE FUSIÓN: defecto bidimensional debido a la falta de fusión entre el metal soldado y el metal base.	26
5	V	PLANA	ROJO	≤ 150 KV.	11-30 mm.	SIN PROTECCIÓN.	ARCO METÁLICO.	CAVITACION GASEOSA, POROSIDAD: cavitación debida a gases atrapada.	18
3	V	PLANA	ROJO	150-250 KV.	11-30 mm.	PLOMO	ARCO METÁLICO.	TEXTURAS DEFECTUOSAS: sombras oscuras y contornos irregulares apareciendo alternamente y con líneas paralelas.	22

BIBLIOGRAFIA

- RUBIO, Alfonso. Inspección Radiográfica de las uniones soldadas. Editorial URMO S.A. de Ediciones.
- LUCHESSI, Domenico. Ensayos Tecnológicos. Editorial Manuales Técnicas LABOR.
- Compendio de obras-autores. Datos suministrados por el Instituto de Asuntos Nucleares, Bogotá D.E.
- Ciencia y Técnica de la soldadura. Editorial URMO S.A. de Ediciones.

