

07.69.09

EN - 6/13

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1969

**COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION
GERENCIA DE ENERGIA**

RADIOGRAFIA INDUSTRIAL CON RADIOISOTOPOS

- RESEÑA TEORICO PRACTICA -

Héctor Gómez Ruiz - Luis Carlos Ayala - Casimiro Lazor

Buenos Aires - Febrero 1969

**COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION
GERENCIA DE ENERGIA**

RADIOGRAFIA INDUSTRIAL CON RADIOISOTOPOS

- RESEÑA TEORICO PRACTICA -

Héctor Gómez Ruíz - Luis Carlos Ayala - Casimiro Lazor

Buenos Aires - Febrero 1969

GAMMAGRAFIA INDUSTRIAL

INDICE

SECCION	PAG
1.0.0	INTRODUCCION 3
2.0.0	FUNDAMENTOS 5
3.0.0	FUENTES RADIATIVAS USADAS EN GAMMAGRAFIA INDUSTRIAL 11
3.1.0	Características principales de las fuentes radiactivas 11
3.1.1	Energía de la fuente radiactiva 11
3.1.2	Actividad y período de desintegración 12
3.1.3	Esquema de desintegración 13
3.1.4	Exposición y dosis 14
3.1.5	Forma, dimensiones y costo 16
3.2.0	Fuentes emisoras de radiación gamma más difundidas 16
4.0.0	PELICULAS, PROCESADO Y MATERIAL FOTOGRAFICO PARA RADIOGRA- FIA INDUSTRIAL 26
4.1.0	Películas para radiografía industrial 26
4.1.1	Mecanismo de formación de la imagen latente 26
4.2.0	Relación entre exposición y densidad óptica 29
4.3.0	Curva característica 31
4.4.0	Velocidad o rapidez de películas 32
4.5.0	Contraste y definición de películas 32
4.6.0	Amplitud o "latitud" de películas 33
4.7.0	Proceso de laboratorio posterior a la irradiación 33
4.7.1	Revelado 34
4.7.1.1	Tiempo y temperatura de revelado 34
4.7.2	Primer lavado 35
4.7.3	Fijado 35
4.7.4	Ultimo lavado y secado de películas 35
5.0.0	INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES GEOMETRICAS DE EXPOSICION RES- PECTO A LA IMAGEN EN GAMMAGRAFIA 43
5.1.0	Influencia de la distancia fuente radiactiva-placa 43
5.2.0	Influencia de la forma y dimensiones de la fuente radiactiva 45
5.3.0	Influencia de las dimensiones, forma y posición relativa del defecto o falla . 46
5.4.0	Distintos tipos de piezas o estructuras: Geometría fuente-placa 47
6.0.0	PANTALLAS INTENSIFICADORAS DE IMAGEN 51
6.1.0	Mecanismos y fundamentos de la intensificación 51
7.0.0	INDICADORES DE CALIDAD DE IMAGEN 58
7.1.0	Sensibilidad de detección práctica 59
7.2.0	Distintos tipos de indicadores de calidad de imagen 61

Indice

8.0.0	SENSIBILIDAD EN GAMMAGRAFIA	66
8.1.0	Influencia de la energía de la radiación y de la naturaleza y espesor del material a inspeccionar respecto a la sensibilidad de detección de defectos ...	66
8.2.0	Influencia de la radiación dispersa y de la indefinición o penumbra en el cálculo de sensibilidad	69
8.3.0	Límites de detección en gammagrafía	71
9.0.0	CALCULO DEL TIEMPO DE EXPOSICION	74
9.1.0	Influencia de la distancia fuente placa	75
9.2.0	Influencia de la naturaleza del material en el cálculo del tiempo de exposición	77
9.3.0	Ejemplos de cálculo de tiempo de exposición	77
10.0.0	RADIOGRAFIA INDUSTRIAL CON OTROS TIPOS DE FUENTES RADIATIVAS	92
10.1.0	Radiografía industrial con radiación X de frenado y X característica	92
10.2.0	Radiografía industrial con neutrones	93
11.0.0	BASES Y ESPECIFICACIONES PARA LA EJECUCION E INTERPRETACION DE RADIOGRAFIAS INDUSTRIALES	96
11.1.0	Normas y especificaciones referentes a la ejecución de radiografías industriales	96
11.2.0	Especificaciones, normas y patrones de radiografía industrial en soldadura	97
11.2.1	Cavidades y porosidades	97
11.2.2	Inclusiones de escoria	98
11.2.3	Grietas y fisuras	98
11.2.4	Falta de penetración	98
11.2.5	Falta de fusión	99
11.2.6	Inclusiones de tungsteno	99
11.2.7	Discontinuidades externas	99
11.3.0	Especificaciones normas y patrones de radiografía industrial en fundición ...	99
11.3.1	Orificios de gas	100
11.3.2	Porosidades	100
11.3.3	Inclusiones	100
11.3.4	Fallas de vaciado	100
11.3.5	Cortes fríos	100
11.3.6	Grietas	101
11.3.7	Segregaciones	101

1.0.0 INTRODUCCION

La gammagrafía industrial es una técnica de análisis y/o inspección no destructiva, con registro perdurable, destinada a controlar y verificar la calidad interna de los materiales, instalaciones, estructuras o piezas diversas.

Es la más difundida de las aplicaciones de los radioisótopos y, a nivel industrial, es actualmente usada en forma intensa en nuestro país para controles e inspecciones diversas, especialmente uniones soldadas y en alguna menor proporción, piezas de fundición.

El acentuado aumento de la demanda de los radioisótopos destinados a la gammagrafía en la República Argentina en los últimos diez años (Fig. 1) es consecuencia de la tarea de promoción ejecutada por la Comisión Nacional de Energía Atómica y materializada a través de la realización de cursos de "Aplicación de Radioisótopos en Ingeniería e Industria", construcción de prototipos (Fig. 2), asesoramiento y realización de trabajos de investigación aplicada. (1) (2). Por otra parte, en el reactor R.A.3 del Centro Atómico Ezeiza será posible producir o recargar en el futuro inmediato, algunos tipos de fuentes selladas destinadas a la radiografía industrial con radioisótopos; este paso permitirá aumentar la disponibilidad y reducir substancialmente los costos de las fuentes radiactivas las que, hasta el presente, deben ser importadas.

Las crecientes exigencias de la industria en lo referente a control de calidad, la situación competitiva del mercado y la expansión previsible de la industria siderúrgica, petroquímica y manufacturera, actualmente en marcha, son índices que debemos tener en cuenta, para prever la futura demanda.

Los radioisótopos han reemplazado ya, al menos parcialmente, a los generadores de rayos X y a otras técnicas convencionales en el control de calidad de soldaduras, fundiciones y estructuras en general. No se puede desconocer esta realidad ni tampoco sobreestimar sus posibilidades por desconocimiento de las limitaciones propias del método o del estado actual de desarrollo del mismo.

La gammagrafía tiene pues, un futuro promisorio. Tratamos aquí de estimular su desarrollo y aplicación para contribuir al mejor aprovechamiento de los recursos humanos y materiales involucrados en esta nueva disciplina, esperando que la publicación de este trabajo resulte útil al logro de esos objetivos.

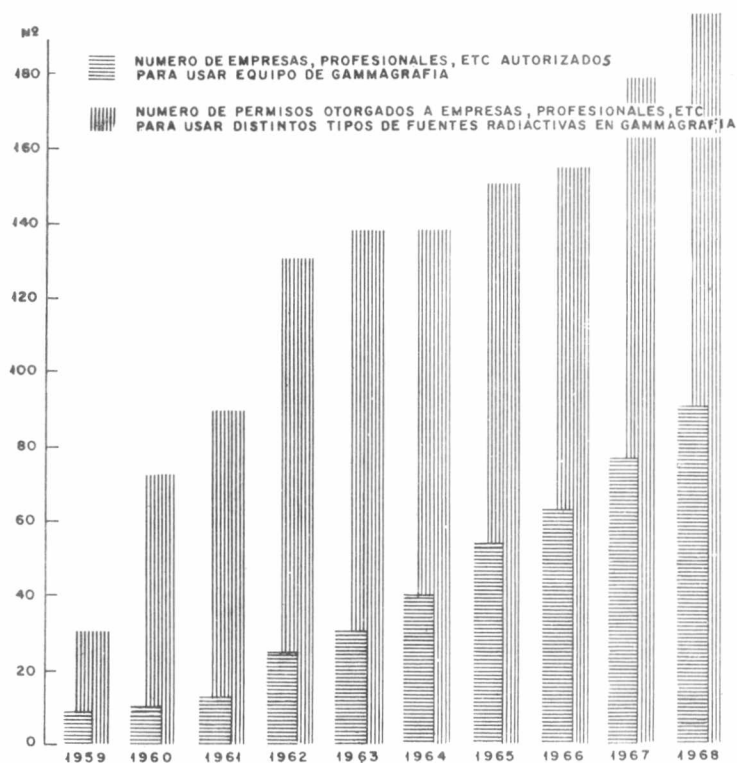


Fig. 1 Demanda de fuentes radiactivas selladas y equipos de gammagrafía en los últimos diez años.

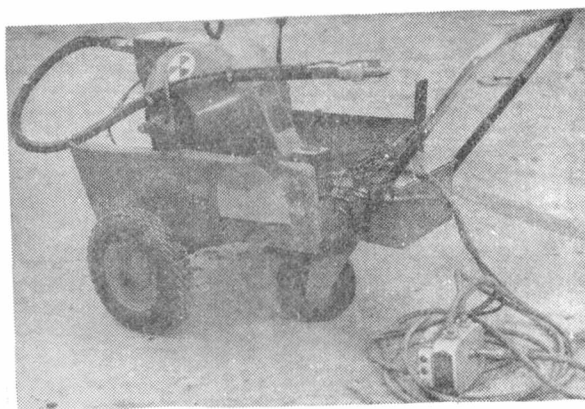
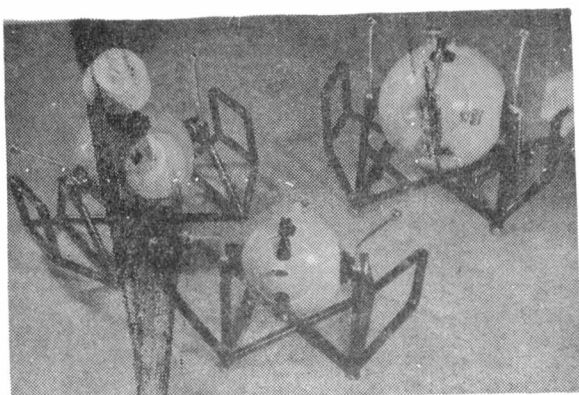


Fig. 2 Prototipos de gammagrafía construídos por la Comisión Nacional de Energía Atómica.

2.0.0 FUNDAMENTOS

Tres elementos básicos, entre otros complementarios, están presentes en toda gammagrafía o radiografía industrial con radioisótopos: la fuente emisora de radiación, el material u objeto de control o inspección y la película sensible a la radiación en la que se materializa la imagen del objeto, defecto o inclusión.

El radioisótopo o fuente de radiación se desintegra, emitiendo principalmente tres tipos de radiación:

- Las partículas α constituidas por núcleos de helio (${}^4_2\text{He}^{++}$), con muy reducida capacidad de penetración en la materia y alto poder ionizante. Los emisores α no tienen aplicación en gammagrafía.

- Las partículas β constituidas por electrones (e^-) de mediano poder ionizante y reducida capacidad de penetración en la materia. Al interaccionar las partículas β con blancos adecuados producen radiación X de frenado (bremsstrahlung) y radiación X característica (Cap. 10.0.0).

Asistimos actualmente al desarrollo y puesta a punto de fuentes de radiación de frenado y de rayos X característicos (emisores β con blancos adecuados), con vistas a su aplicación en radiografía industrial.

- Los fotones γ de naturaleza electromagnética, al igual que los fotones X antes mencionados, con reducido poder ionizante y gran capacidad de penetración en la materia. Esta penetración es función de la energía del fotón; mayor energía equivale a mayor penetración o menor atenuación del haz de fotones por parte del material a inspeccionar. El espesor y la naturaleza del material a inspeccionar, por otra parte, son también factores preponderantes en la atenuación del haz de radiación X ó γ : el incremento de espesor y/o densidad aumentan la atenuación del haz primario de radiación.

Desde principios de siglo se utilizan los emisores naturales de radiación γ (radio, radón) en la inspección y control de materiales; más reciente es la incorporación de los radioisótopos artificiales (${}^{60}\text{Co}$, ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{192}\text{Ir}$, ${}^{170}\text{Tm}$, etc.) producidos en los reactores nucleares o a partir de los productos de fisión, consolidándose y acrecentándose así su participación en el control no destructivo de los materiales.

Los fotones X ó γ , al interaccionar con los átomos de la materia, son absorbidos y/o dispersados de acuerdo a tres mecanismos: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y efecto de producción de pares.

En el efecto fotoeléctrico toda la energía del fotón primario $E_\gamma = h\nu$ es empleada en remover algún electrón orbital interno del átomo. El electrón, cuya energía de enlace denominamos E_K (para electrones de la órbita K) es eyectado con una energía cinética: $h\nu - E_K$

En el efecto Compton el fotón incidente interactúa con un electrón débilmente unido al átomo desviándose y perdiendo parte de su energía $E_\gamma = h\nu$. El fotón secundario E'_γ conjuntamente con el electrón eyectado de energía cinética $E_e = E_\gamma - E'_\gamma$, constituyen radiaciones secundarias que pueden, a su vez, perder la energía con nuevas interacciones.

La energía E'_γ del fotón secundario depende del ángulo θ de desviación y de la energía del fotón primario:

$$E'_\gamma = \frac{0,51}{1 - \cos \theta + \frac{0,51}{E_\gamma}}$$

Por último, en el efecto de formación de pares los fotones de energía superior a 1,02 MeV desaparecen y transfieren toda su energía a un positrón (e^+) y a un electrón (e^-) que constituyen las radiaciones secundarias:

$$h\nu = 1,02 + \xi^+ + \xi^-$$

$h\nu$: energía del fotón primario

1,02 : umbral de energía para que se produzca la formación de pares

ξ^+ : energía cinética del positrón

ξ^- : energía cinética del electrón.

La probabilidad de que uno de estos tres fenómenos se manifieste depende de la energía de la radiación X ó γ y del número atómico del material absorbente (Fig. 4 b).

El efecto fotoeléctrico se produce preponderantemente, cuando la energía de la radiación primaria es débil ($E_\gamma \leq 0,5$ MeV), mientras que el efecto Compton es dominante en el rango de medianas energías ($0,5$ MeV $\leq E_\gamma \leq 3$ MeV).

La formación de pares sólo puede producirse a partir de los fotones con energía superior a 1,02 MeV y carece de importancia en gammagrafía ya que el umbral mencionado resta probabilidad de ocurrencia a este fenómeno.

Cuando un fotón X ó γ atraviesa un espesor dx de absorbente (Fig. 4 c) existe una probabilidad μ por unidad de longitud (cm) o masa superficial (g/cm^2) de que el fotón sea absorbido o dispersado. Esta probabilidad que se denomina coeficiente de atenuación lineal (unidad: cm^{-1}) o coeficiente de atenuación másico (unidad: cm^2/g), está dada por la suma de los tres coeficientes de atenuación parciales o probabilidad de que uno de los eventos antes mencionados ocurra:

$$\mu = \mu_f + \mu_C + \mu_{fp} \quad (1)$$

μ (cm⁻¹) : coeficiente de atenuación lineal
 μ_f (cm⁻¹) : coeficiente de atenuación fotoeléctrico lineal
 μ_C (cm⁻¹) : coeficiente de atenuación Compton lineal
 μ_{fp} (cm⁻¹) : coeficiente de atenuación de formación de pares lineal.

Si observamos la Fig. 4 c. podemos apreciar que

$$dN' = -\mu N' dx \quad \therefore \quad \frac{dN'}{N'} = -\mu dx$$

Integrando esta última expresión:

$$\int_{N_0}^{N_x} \frac{dN'}{N'} = -\mu \int_0^x dx \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\mu x$$

$$N_1 = N_0 e^{-\mu x} \quad (\text{fot/s}) \quad (2)$$

Esta expresión exponencial vale para todo el haz que emerge del absorbente con excepción del área situada debajo del defecto. Con idéntico razonamiento llegaríamos a que la radiación que llega al área de la placa situada detrás del defecto es:

$$N_2 = N_0 e^{-\mu (x - \Delta x)} + \mu_1 \Delta x \quad (\text{fot/s}) \quad (3)$$

N_0 : fotones por unidad de tiempo incidentes sobre el absorbente (fot/s)
 N_1 : fotones por unidad de tiempo que emergen del absorbente (fot/s)
 N_2 : fotones por unidad de tiempo que emergen detrás del defecto (fot/s)
 μ : coeficiente de atenuación lineal del absorbente (cm⁻¹)
 μ_1 : coeficiente de atenuación lineal del defecto (cm⁻¹)
 x : espesor del absorbente (cm)
 Δx : espesor del defecto (cm).

Se denomina intensidad de radiación X ó γ a la energía por unidad de superficie y tiempo que llega a un punto; las fórmulas (2) y (3) pueden referirse a la intensidad de radiación que llega a esas zonas.

$$I_1 = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{erg/cm}^2 \text{ s}) \quad (4)$$

$$I_2 = I_0 e^{-\mu (x - \Delta x)} + \mu_1 \Delta x \quad (\text{erg/cm}^2 \text{ s}) \quad (5)$$

I_0 : intensidad de radiación incidente sobre el absorbente (erg/cm² s)
 I_1 : intensidad de radiación que emerge del absorbente (erg/cm² s)
 I_2 : intensidad de radiación que emerge del absorbente, detrás del defecto (erg/cm² s)

De los tres elementos básicos que mencionáramos al principio del capítulo sólo resta el tercero: la película sensible a la radiación.

Las películas vírgenes usadas en radiografía industrial tienen granos de bromuro de plata en su emulsión. El bromuro de plata es sensible a los fotones X ó γ y, preponderantemente, a la radiación secundaria por ellos engendrada

El área de la placa, situada debajo del defecto recibe una intensidad de radiación I_2 distinta a la intensidad de radiación I_1 adyacente (Fig. 4 c, fórmula 4 y 5). En la placa vírgen se formará la imagen latente del defecto que, una vez sometida al proceso del laboratorio (revelado, fijado, etc.), se transformará en imagen visible. El negativo o placa procesada acusará un mayor ennegrecimiento (mayor densidad óptica) en la zona donde recibió más radiación; si el defecto es una inclusión de mayor densidad que el absorbente la imagen en la placa será más clara pues la inclusión habrá atenuado más la radiación.

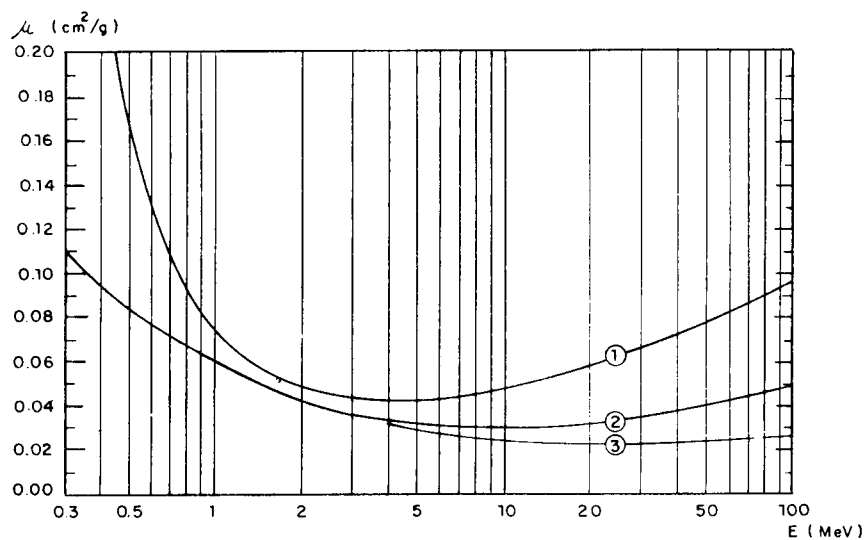


Fig. 4 a Coeficiente de atenuación másico en función de la energía de los fotones primarios :
1)absorbente Pb;2)absorbente Fe;3)absorbente Al

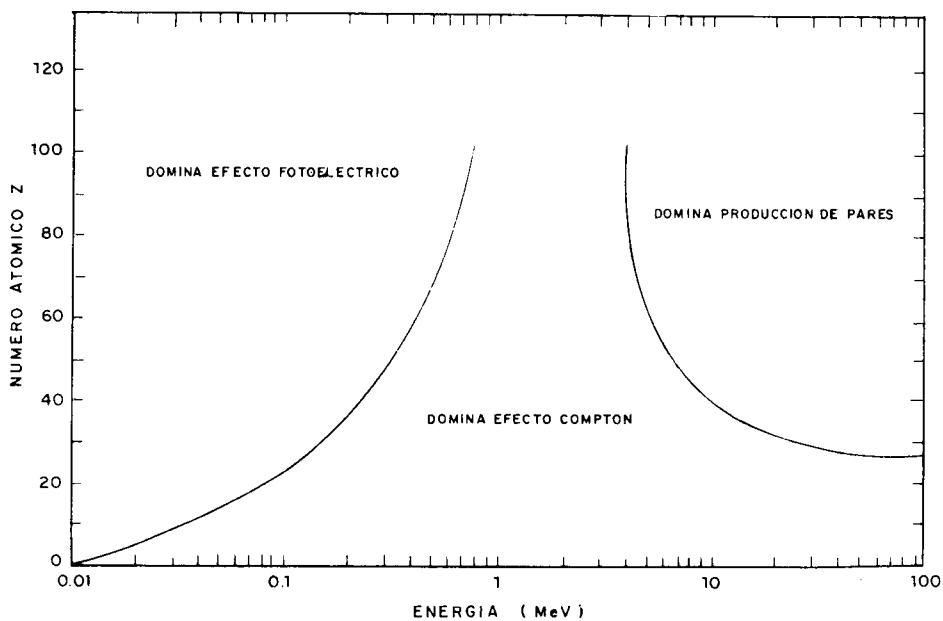


Fig 4b Probabilidad de ocurrencia del efecto fotoeléctrico, Compton y formación de pares en función del número atómico del absorbente y la energía del fotón primario

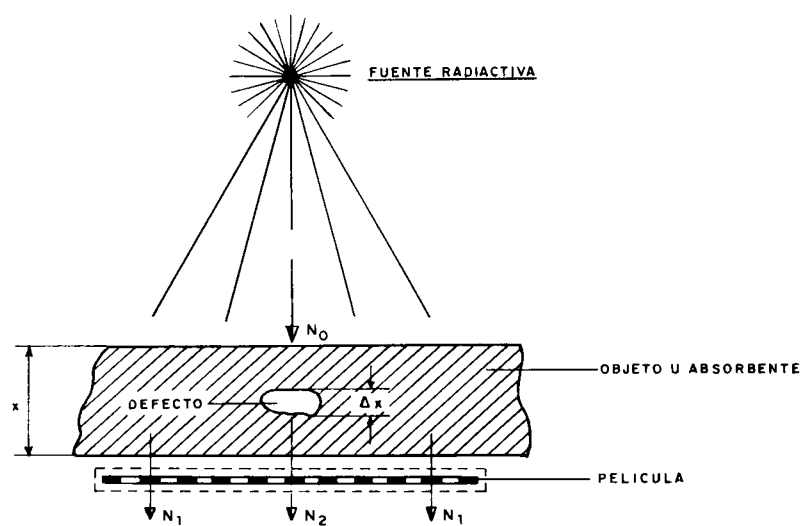


Fig 4 c Atenuación de la radiación primaria por un medio absorbente con un defecto

3.0.0 FUENTES RADIATIVAS USADAS EN GAMMAGRAFIA INDUSTRIAL

Los radioisótopos destinados a la gammagrafía industrial deben responder a una serie de exigencias afines con el servicio a que estén destinados. Estas exigencias emanan de las condiciones operativas en la industria, seguridad radiológica y razones técnico-económicas determinantes de las bases del desarrollo de las fuentes disponibles y de aquellas que hoy se experimentan en los centros de producción, como es el caso de los emisores de radiación de frenado (Bremsstrahlung) o de las fuentes de neutrones expuestas en el capítulo 10.0.0.

Nos referiremos aquí a los núclidos emisores de radiación gamma que se usan ya corrientemente en el control de calidad o inspección industrial.

3.1.0 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LAS FUENTES RADIATIVAS

3.1.1 Energía de la fuente radiactiva (3), (4), (5).

Los radioisótopos liberan cantidades discretas de energía: cinética para las partículas y energía electromagnética para los fotones gamma o X. Cuando los fotones inciden sobre la materia, liberan parte de esa energía a través de procesos de interacción fotoeléctrica, Compton o formación de pares, ya estudiados. Las imágenes radiográficas son formadas a partir de la energía absorbida por el medio sensible, o sea la emulsión, cuando es expuesta a la radiación gamma o X ionizante.

La unidad de energía es el MeV (Mega electrón Volt):

$$1 \text{ (MeV)} = 10^3 \text{ (KeV)} = 10^6 \text{ (eV)} \therefore 1 \text{ (MeV)} = 1,6 \times 10^{-6} \text{ (erg)} = 3,82 \times 10^{-14} \text{ (calorías)}$$

El rango de energías (0,1 MeV a 2,5 MeV aproximadamente) y las longitudes de onda abarcadas por los rayos gamma de origen nuclear están expuestas en la Fig.4.

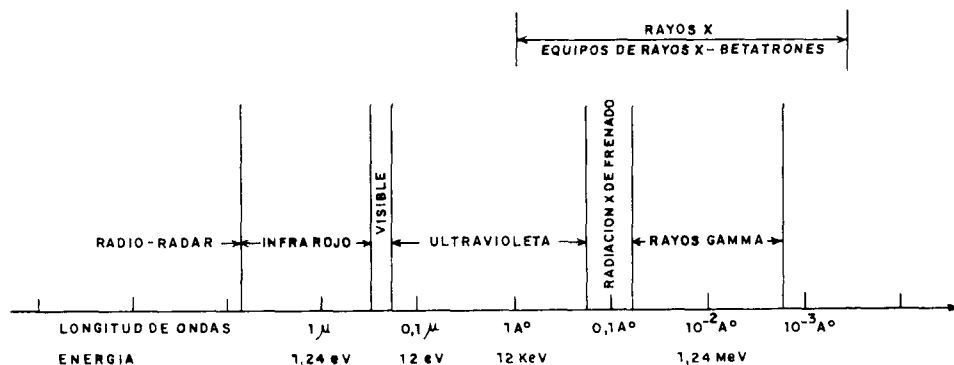


Fig.4 Rango de longitudes de ondas y energías de los rayos gamma y X frente a otras radiaciones

Los emisores gamma tienen un espectro mono o polienergético y son absorbidos o dispersados existiendo en el espesor dx , una probabilidad μ (coeficiente de absorción, función de la energía del fotón), de que ello ocurra:

$$dI = -\mu I dx$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

I , intensidad de radiación que emerge del material de espesor x (fotones/cm² s)

I_0 , intensidad de radiación incidente. (fotones/cm² s)

μ , coeficiente de absorción lineal o másico. Función de la energía (cm⁻¹ ó cm²/g)

Tabla II.

x , espesor del material absorbente (cm ó g/cm²).

La intensidad de la radiación emergente sigue, de acuerdo a la expresión anterior, una ley exponencial en los casos donde la radiación es monoenergética; en la práctica, en cambio, en virtud de las leyes de interacción esa ley es sólo aproximada. La intensidad de radiación emergente es función del espesor y de la energía de la fuente. Fig. 5.

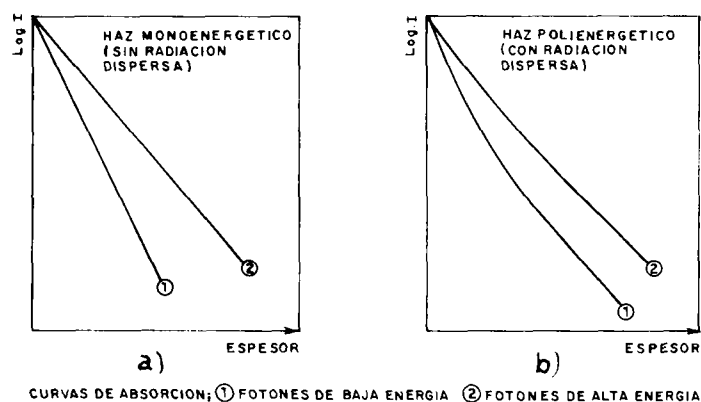


Fig. 5 Curvas de absorción
a) Teóricas; b) Reales.

El espesor medio, $x_{1/2}$, de un material es el que reduce a la mitad la intensidad I de la radiación incidente I_0 :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}} \therefore \ln \frac{1}{2} = -\mu x_{1/2}$$

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad x_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} \quad (2)$$

En la Tabla I y en la figura 7 están expuestos los $x_{1/2}$ de distintos materiales y radioisótopos y, en la Tabla II, los coeficientes de absorción μ parciales y totales.

3.1.2 Actividad y período de desintegración

Llamamos actividad A de una fuente radiactiva al número de desintegraciones ΔN por unidad de tiempo producidas espontáneamente. Período de semidesintegración es el lapso de tiempo necesario para que la actividad se reduzca a la mitad de la actividad inicial A_0 .

La unidad de actividad es el curie:

$$1 \text{ curie (c)} = 10^3 \text{ mc} = 10^6 \mu\text{c}$$

$$1 \text{ c} = 3,7 \times 10^{10} \text{ des/s.}$$

$$A = \frac{dN}{dt} = -N\lambda$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Siendo A_0 la actividad al tiempo $t = 0$, A la actividad al tiempo t , y λ la constante de desintegración característica del radioisótopo, cuya unidad es igual a la inversa de la usada con el tiempo.

El período de desintegración $T_{1/2}$ estará dado por:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2} \quad \therefore \quad T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (4)$$

La actividad de las fuentes usadas en gammagrafía debe ser compatible con la que surge del adecuado balance entre el tiempo de exposición, costo unitario operativo de cada placa y seguridad radiológica durante la irradiación. El período de desintegración debe ser tal que permita amortizar el costo de la fuente. La curva de la figura 6 permite calcular la actividad remanente al cabo de un cierto lapso para cualquier fuente radiactiva; un ejemplo de referencia acompaña a la curva.

3.1.3 Esquema de desintegración

Los radioisótopos liberan en cada desintegración cierta cantidad de energía. Parte de esa energía se transfiere en forma de fotones o radiación electromagnética gamma. Si observamos los esquemas de desintegración de la figura 7, podemos apreciar que:

El ^{137}Cs emite:

0,92 fotones de 0,66 MeV por cada desintegración (92%)

En 1 c de ^{137}Cs se emiten: $3,7 \times 10^{10} \left(\frac{\text{des}}{\text{s}} \right) \times 0,92 \left(\frac{\text{fotones}}{\text{des}} \right) = 3,4 \times 10^{10} \left(\frac{\text{fotones}}{\text{s}} \right)$

El ^{60}Co emite:

1 fotón de 1,17 MeV por cada desintegración (100%), más

1 fotón de 1,34 MeV por cada desintegración (100%)

$\overline{2 \text{ fot/des. } 2,51 \text{ MeV}}$

En 1 c de ^{60}Co se emiten: $3,7 \times 10^{10} \left(\frac{\text{des}}{\text{s}} \right) \times 2 \left(\frac{\text{fotones}}{\text{s}} \right) = 7,4 \times 10^{10} \left(\frac{\text{fotones}}{\text{s}} \right)$

El ^{192}Ir emite:

0,07 fotones de 0,61 MeV por cada desintegración más:							
0,12	"	"	0,60	"	"	"	"
0,57	"	"	0,46	"	"	"	"
0,85	"	"	0,32	"	"	"	"
0,30	"	"	0,31	"	"	"	"
0,25	"	"	0,30	"	"	"	"
0,04	"	"	0,20	"	"	"	"
otras sin mucha significación.....							
2,2 fot/des		2,80 MeV					

En 1 c de ^{192}Ir se emiten: $3,7 \times 10^{10} \frac{\text{des}}{(\text{seg})} \times 2,2 \left(\frac{\text{fot}}{\text{des}} \right) \simeq 8,2 \times 10^{10} (\text{fot})$

3.1.4 Exposición y dosis

La exposición en un punto es de un roentgen (r) cuando la ionización producida por los electrones secundarios (fotoeléctricos, Compton y formación de pares) en un cm^3 de aire (1,293 mg en condiciones normales de t y p) es igual a la unidad electrostática de carga de cada signo en ese punto.

1 u e e (q) = $2,1 \cdot 10^9 \frac{\text{pares de iones}}{\text{cm}^3}$; Para formar 1 par de iones se necesitan 32,5 eV

$$1 (\text{r}) = \frac{1 \text{ u e e (q)}}{\text{cm}^3} \simeq 2,1 \cdot 10^9 \frac{\text{p.i.}}{\text{cm}^3} \cdot 32,5 \frac{\text{eV}}{\text{p.i.}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{erg}}{\text{eV}} \cdot 10^3 \frac{\text{cm}^3}{1,29\text{g}} = 84 \frac{\text{erg}}{\text{g}} (5)$$

En una emulsión fotográfica: $1 \text{ r} \hat{=} 95 \text{ erg/g.} = 95 \text{ rad}$;

La exposición necesaria para lograr en una película radiográfica una densidad de ennegrecimiento del orden de 2 ($D=2$) varía según las características sensitométricas de las películas entre 0,2 (r) y 1,3 (r); los fabricantes de películas suelen suministrar esta referencia que es un índice de velocidad de películas.

La curva de la figura 8 nos permite relacionar la energía E (MeV) de los fotones primarios con la exposición (r) por unidad de tiempo (hora) producida: E_γ .

Este valor E_γ esta referido a la unidad de actividad (c) y la distancia, en nuestro caso es de 1 m.

Volviendo a los ejemplos anteriores tendríamos:

Para ^{137}Cs

$$0,66 \text{ MeV (92\%)} (\text{Ver Fig. 8}): 0,35 \text{ r/h} \cdot 0,92 = 0,32 \text{ r/hc a 1 m}$$

$$E_\gamma = 0,32 \text{ r/hc a 1 m}$$

Para ^{60}Co

$$\begin{aligned} 1,17 \text{ MeV (100\%)} & \text{ (Ver Fig. 8): } 0,62 \text{ r/h} \cdot 1 = 0,62 \text{ r/hc a l m} \\ 1,34 \text{ MeV (100\%)} & \text{ " " " : } 0,68 \text{ r/h} \cdot 1 = 0,68 \text{ r/hc a l m} \\ E_{\gamma} & = 1,30 \text{ r/hc a l m} \end{aligned}$$

Para ^{192}Ir

$$\begin{aligned} 0,61 \text{ MeV (7\%)} & \text{ (Ver Fig. 8): } 0,35 \cdot 0,07 = 0,024 \text{ r/hc a l m} \\ 0,60 \text{ MeV (12\%)} & \text{ " " " : } 0,34 \cdot 0,12 = 0,040 \text{ r/hc a l m} \\ 0,46 \text{ MeV (57\%)} & \text{ " " " : } 0,27 \cdot 0,57 = 0,154 \text{ r/hc a l m} \\ 0,32 \text{ MeV (85\%)} & \text{ " " " : } 0,19 \cdot 0,85 = 0,162 \text{ r/hc a l m} \\ 0,31 \text{ MeV (30\%)} & \text{ " " " : } 0,19 \cdot 0,30 = 0,057 \text{ r/hc a l m} \\ 0,30 \text{ MeV (25\%)} & \text{ " " " : } 0,18 \cdot 0,25 = 0,045 \text{ r/hc a l m} \\ 0,20 \text{ MeV (4\%)} & \text{ " " " : } 0,11 \cdot 0,04 = 0,004 \text{ r/hc a l m} \\ E_{\gamma} & = 0,486 \text{ r/hc a l m} \end{aligned}$$

La exposición por unidad de tiempo E_{γ} , así calculada para actividad y distancia unitaria nos permite conocer la exposición por unidad de tiempo en cualquier otro punto del espacio y para actividades distintas. La exposición es proporcional a la actividad (A) e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias (d)

$$E \text{ (r/h)} = A \text{ (c)} \cdot E_{\gamma} \text{ (r/hc)} \cdot \frac{1^2}{d^2} \quad (\text{m}^2/\text{m}^2) \quad (6)$$

En el caso de interponerse un material absorbente entre la fuente y el detector o placa (6):

$$E \text{ (r/h)} = A \text{ (c)} \cdot E_{\gamma} \text{ (r/hc)} \cdot \frac{1^2}{d^2} \quad (\text{m}^2/\text{m}^2) \cdot e^{-\mu x} \quad (7)$$

μ , coeficiente de absorción lineal o másico para el material interpuesto (cm^{-1} ó cm^2/g).

x , espesor del material interpuesto (cm ó g/cm^2).

Algunos manuales, para simplificar recomiendan la siguiente expresión:

$$E \text{ (r/h)} = 0,56 \cdot A \text{ (c)} \cdot E \left(\frac{\text{MeV}}{\text{des}} \right) \cdot \frac{1}{d^2} \quad \left(\frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} \right) \cdot e^{-\mu x} \quad (8)$$

Respecto a la dosis por unidad de tiempo, para energías comprendidas entre 0,1 y 2,5 MeV y medio similar al de las emulsiones corrientes, puede expresarse:

$$D \left(\frac{\text{rad}}{\text{h}} \right) = A \text{ (c)} \cdot E_{\gamma} \left(\frac{\text{r}}{\text{hc}} \right) \cdot \frac{1}{d^2} \quad \left(\frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} \right) \cdot e^{-\mu x} \quad 0,95 \left(\frac{\text{rad}}{\text{r}} \right) \quad (9)$$

3.1.5 Forma, dimensiones y costo

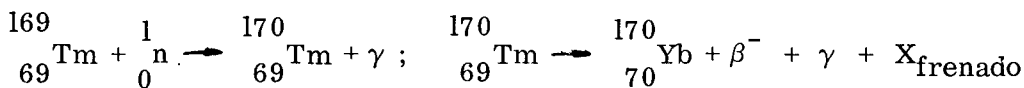
Las fuentes radiactivas gamma están protegidas por una cápsula de acero inoxidable o aluminio. La parte activa tiene forma cilíndrica o esférica y el diámetro varía por lo general, entre 1 mm y 7 mm; la altura del cilindro activo se mantiene entre esos valores. Como existen múltiples formas de fuentes exponemos en la figura 7 algunas fotos y diseños de las mismas y los costos aproximados (7) (8) (9) (10).

3.2.0 FUENTES EMISORAS DE RADIACION GAMMA MAS DIFUNDIDAS

En virtud de la amplia difusión que han tenido el ^{170}Tm , ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{226}Ra como fuentes de radiación en radiografía industrial hemos de hacer un comentario respecto a las principales características de estos emisores de radiación gamma. La actual tendencia a reemplazar el ^{137}Cs con el ^{134}Cs ha determinado que incorporáramos este último, en la lista antes mencionada. Estos radioisótopos y otros menos experimentados pero potencialmente aptos son expuestos en la Tabla I. En la Fig. 7, por otra parte, se exponen los esquemas de desintegración, curvas de decaimiento y otros datos técnicos y comerciales respecto a las fuentes mencionadas.

Tulio-170 ($^{170}_{69}\text{Tm}$)

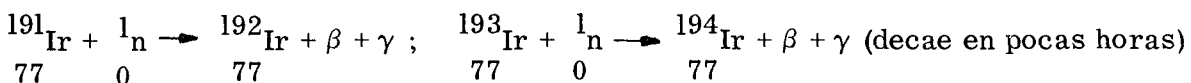
Es producido en los reactores nucleares bombardeando un blanco de $^{169}_{69}\text{Tm}$ (100% de abundancia isotópica) con neutrones térmicos; se desintegra con un semi-período de 129 días de acuerdo al esquema de desintegración, no muy bien conocido hasta el presente, indicado en la Fig. 7. Emite radiación gamma, gamma de conversión interna y radiación X de frenado con blancos apropiados.



Este radioisótopo es muy indicado para inspeccionar bajos espesores de Fe (4-5 mm de Fe en adelante) y aleaciones livianas. En nuestro país sólo en muy pocos casos ha sido empleado. Lamentablemente, pues, según interpretamos, en espesores inferiores a 10 mm de Fe puede reemplazar con ventajas al ^{192}Ir .

Iridio-192 ($^{192}_{77}\text{Ir}$)

Es también producido en reactores nucleares, con neutrones térmicos, a partir de sus isótopos naturales: ^{191}Ir (38,5%) e ^{193}Ir (61,5%)



El espectro del ^{192}Ir tiene numerosos picos de energías comprendidas entre 0,13 y 1 MeV y es conjuntamente con el ^{170}Tm el único radioisótopo disponible comercialmente para radiografías de bajos espesores. La alta sección eficaz del isótopo natural, respecto a los neutrones térmicos, permite obtener fuentes de pequeñas dimensiones.

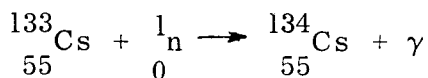
La experiencia acumulada en la CNEA, en algunos servicios prestados a la industria, nos permite afirmar que con el ^{192}Ir es posible satisfacer los requisitos de las normas internacionales más restrictivas, hasta un umbral inferior de espesores del orden de 12 mm de Fe, con películas comerciales de mediana velocidad. Con películas lentas, de gran contraste, puede obtenerse una sensibilidad práctica de detección del orden del 2% hasta un umbral inferior de 8-9 mm de Fe aproximadamente.

Cesio-137 ($^{137}_{55}\text{Cs}$)

Es uno de los productos de fisión del ^{235}U obtenido por separación química. El largo período de semidesintegración (28 años), del Cs-137 permite obtener radiografías con un costo reducido, en virtud del amplio lapso de amortización de esta fuente. Sin embargo, la calidad de las placas o la sensibilidad de detección que se puede alcanzar con el Cs-137 es mediocre, siendo aconsejable usar, para superar este inconveniente, películas de alto contraste. En la Fig. 7 se dan otros detalles respecto al Cs-137.

Cesio-134 ($^{134}_{55}\text{Cs}$)

Es producido en reactores nucleares con neutrones térmicos a partir del isótopo natural ^{133}Cs que tiene una abundancia isotópica del 100%.

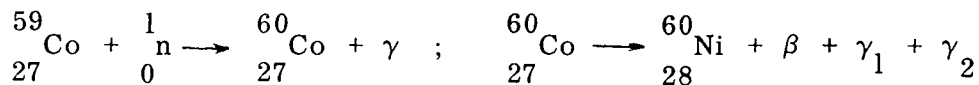


Posee numerosos picos de bajas y medianas energías que lo hacen particularmente apto para cubrir el mismo rango de espesores del Cs-137 aunque es posible detectar defectos más pequeños debido a los picos de bajas energías que contribuyen a mejorar la sensibilidad de detección. La razón expuesta ha contribuido a acentuar la tendencia a reemplazar el ^{137}Cs con el ^{134}Cs . El semiperíodo es de 2 años.

Cobalto-60 ($^{60}_{27}\text{Co}$)

Es irremplazable para inspeccionar cordones soldados o piezas de fundición de gran espesor (25 mm a 200 mm de Fe aproximadamente), columnas, vigas, etc. de hormigón armado o pretensado y otras estructuras.

Emite dos rayos gamma por desintegración, de $\gamma_1 = 1,17$ MeV y $\gamma_2 = 1,34$ MeV



La sensibilidad alcanzable de detección de defectos es aceptable, y el costo reducido; razones que contribuyeron a la amplia difusión de esta fuente radiactiva. Fig. 7.

Radio-226 (${}_{88}^{226}\text{Ra}$)

Este radioisótopo natural tiene más interés histórico y de referencia que técnico económico en gammagrafía industrial ya que con el advenimiento de la era nuclear y la puesta en servicio de los reactores nucleares es posible disponer de fuentes radiactivas artificiales que reemplazan con ventajas al Radio-226.

Las características del ${}^{226}\text{Ra}$ que más nos interesan son:

$$E_{\gamma} \text{ (exposición): } 0,84 \text{ r/hc a } 1 \text{ m; } x_{1/2} \begin{cases} \text{Pb : } 14 \text{ mm} \\ \text{Fe : } 23 \text{ " } \\ \text{H}^{\circ} \text{ A}^{\circ} : 73 \text{ mm} \end{cases}$$

Otras fuentes emisoras de radiación gamma.

Se producen ya algunas fuentes radiactivas constituídas por mezcla de dos o más núclidos. Estas combinaciones están orientadas a lograr espectros polienergéticos para aumentar la sensibilidad de detección de los defectos. La mezcla más difundida hasta el presente es la de ${}^{192}\text{Ir}$ con ${}^{182}\text{Ta}$.

T A B L A I

FUENTES RADIOACTIVAS PARA GAMMAGRAFIA INDUSTRIAL

Radionucléido	Tipo de Radiación	Energías (γ); (Porcentajes)		Periodo de Semidesintegración		Obtención y Forma Químico mas común
		(MeV)	(%)	Años	Días	
^{60}Co	β, γ	1,17 (100%) 1,33 (100%)		5,3		^{59}Co (n, γ); Reactor Co Metálico
^{137}Cs	β, EC, γ	0,66 (92%)		28		Producto de fisión; SO_4Cs_2
^{192}Ir	β, EC, γ	0,61 (7%) 0,60 (12%) 0,46 (57%) 0,32 (85%) 0,31 (30%) 0,30 (25%) 0,20 (4%)			74	^{191}Ir (n, γ); Reactor Ir metálico
^{170}Tm	β, EC, γ	0,084(3%) 0,052(5%) 0,010(16%) 0,002(16%)			127	^{169}Tm (n, γ); Reactor Tm_2O_3
$^{110\text{m}} - ^{110}\text{Ag}$	β, γ	0,53 (42%); 0,76 (21%) 0,66 (99%); 0,88 (78%) 0,68 (70%); 0,94 (42%) 0,71 (16%); 1,39 (25%) 1,52 (15%)			270	^{109}Ag (n, γ) Ag metálico
Ra	α, γ	Espectro complejo (ee) 1,1 a 2,4		1620		Natural Cl_3Ra ó Br_3Ra
^{75}Se	EC, γ	0,07 (58%); 0,26 (57%) 0,12 (22%); 0,28 (26%) 0,14 (58%); 0,40 (15%)			127	^{74}Se (n, γ) Óxido
$^{134\text{m}} - ^{134}\text{Cs}$	β, γ	0,57 (2%); 0,79 (90%) 0,56 (22%); 1,17 (2%) 0,60(100%); 1,37 (3%)		2,3		^{133}Cs (n, γ) Vidrio de Cs o ClCs
^{182}Td	β, γ	0,10 (70%); 1,12 (30%) 0,10 (50%); 1,20 (40%) 0,20 (40%); 1,22 (30%)			115	^{181}Ta (n, γ)

T A B L A I (continuación)
FUENTES RADIATIVAS PARA GAMMAGRAFIA INDUSTRIAL

Radioisótopo	Exposición a $\frac{1m}{\text{Constante } E_\gamma}$	RANGO DE ESPESORES PARA DISTINTOS MATERIALES (Valores aproximados)					
		Rango más indicado(**)			Rango posible (***)		
		Fe	Al	concreto	Fe	Al	concreto
	R/h_c	mm	mm	mm	mm	mm	mm
^{60}Co	1,31	60-200	250-500	50-300	25-300	200-600	30-500
^{137}Cs	0,31	20-80	70-300	20-200	10-120	50-350	15-300
^{192}Ir	0,48	10-40	50-250	10-20	5-75	40-300	7-30
^{170}Tm	0,012(*) 0,003-0,004	3-10	5-50		0,5-20	3-70	
Ra	0,83	40-150	100-400		30-170	50-400	
$^{110m} - ^{110}\text{Ag}$	1,43	30-50	60-150		20-130	40-300	
^{75}Se	0,20	7-15	40-150		5-30	20-200	
$^{134m} - ^{134}\text{Cs}$	0,81	Similar al ^{137}Cs			Similar al ^{137}Cs		
^{182}Tl	0,66	20-80	40-200		15-100	30-300	

(*) En la bibliografía hay discrepancias

(**) Con película de mediana sensibilidad es posible cumplir normas.

(***) Con película de alta sensibilidad se puede llegar a cumplir normas.

T A B L A I I				
COEFICIENTES DE ATENUACION MASICOS				
ENERGIA	COEFICIENTE DE ATENUACION MASICO (cm ² /g)			
	Aluminio	Concreto	Hierro	Plomo
MeV	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
0,01	24,3	24,6	169	84,6
0,015	7,48	7,68	56,2	135
0,02	3,26	3,34	25,2	71,8
0,03	1,08	1,10	8,01	23,5
0,04	0,543	0,542	3,55	10,5
0,05	0,353	0,350	1,90	5,73
0,06	0,268	0,267	1,18	3,55
0,08	0,197	0,197	0,590	1,66
0,10	0,169	0,169	0,370	5,46
0,15	0,138	0,139	0,196	1,92
0,20	0,122	0,124	0,146	0,042
0,30	1,104	0,107	0,110	0,378
0,40	0,0927	0,0954	0,0939	0,220
0,50	0,0844	0,087	0,0840	0,152
0,60	0,779	0,0804	0,0769	0,119
1,00	0,0614	0,0635	0,0598	0,0703
1,50	0,0500	0,0517	0,0484	0,0523
2,00	0,0431	0,0445	0,0422	0,0456
3,00	0,035	0,0363	0,0359	0,0413
4,00	0,031	0,0317	0,0330	0,0416
5,00	0,028	0,0287	0,0314	0,0430

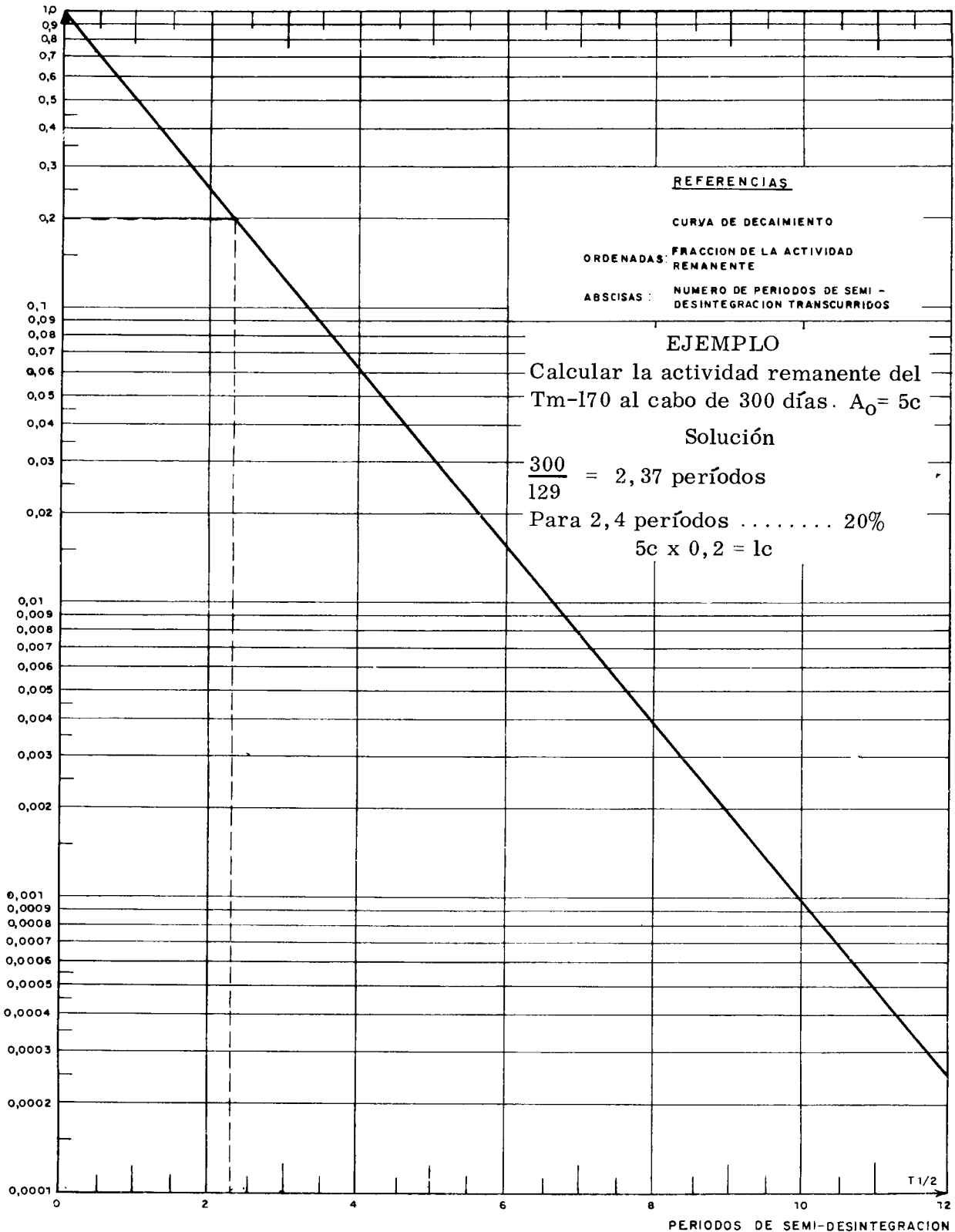


Fig. 6 Curva de decaimiento

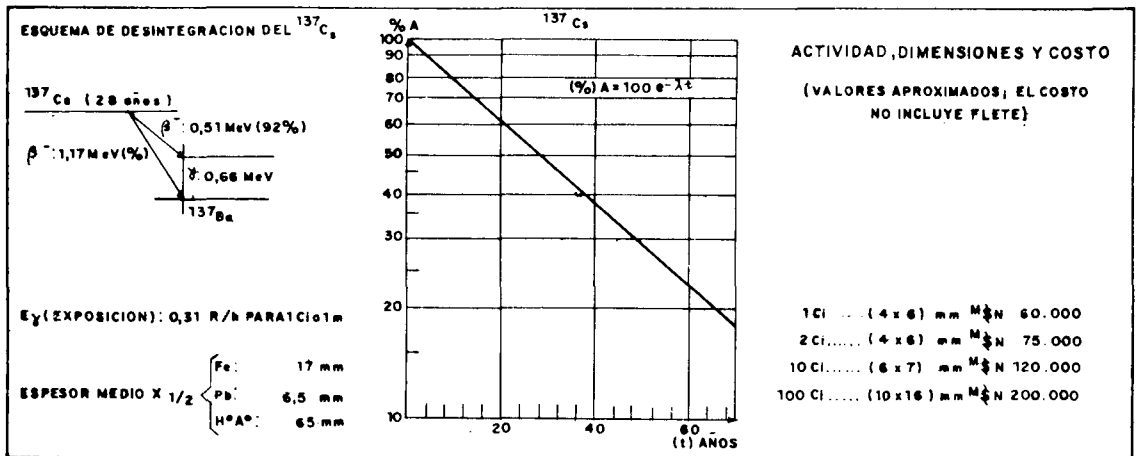
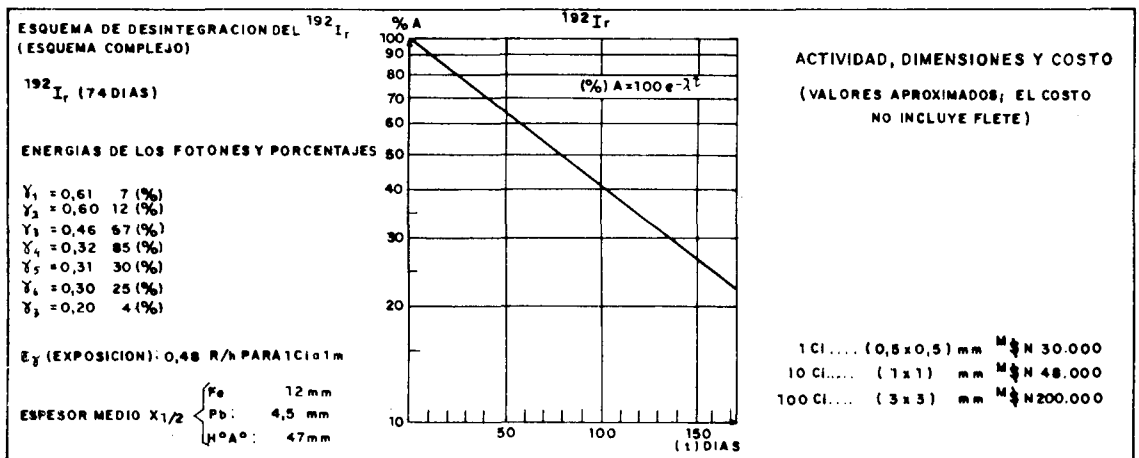
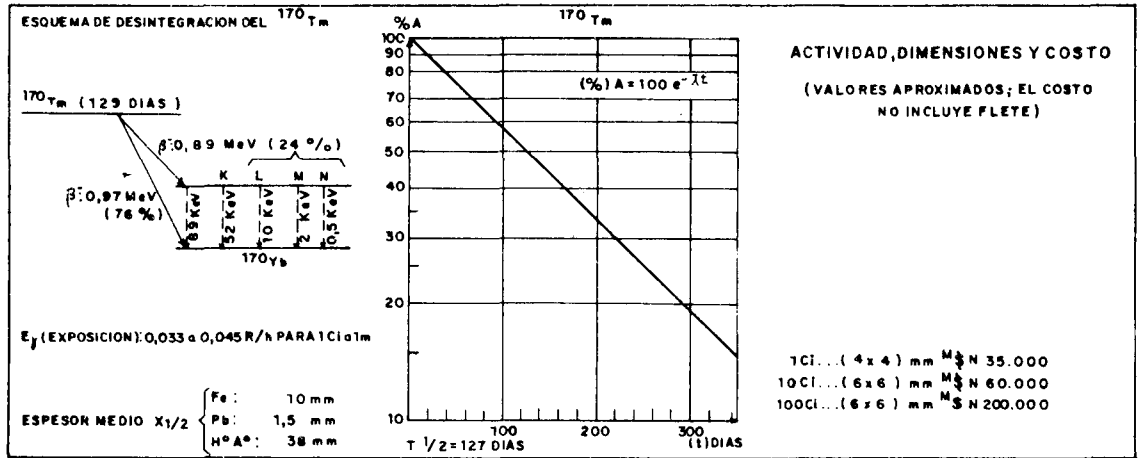


Fig. 7 Características principales de los radioisótopos más usados en gammagrafía.

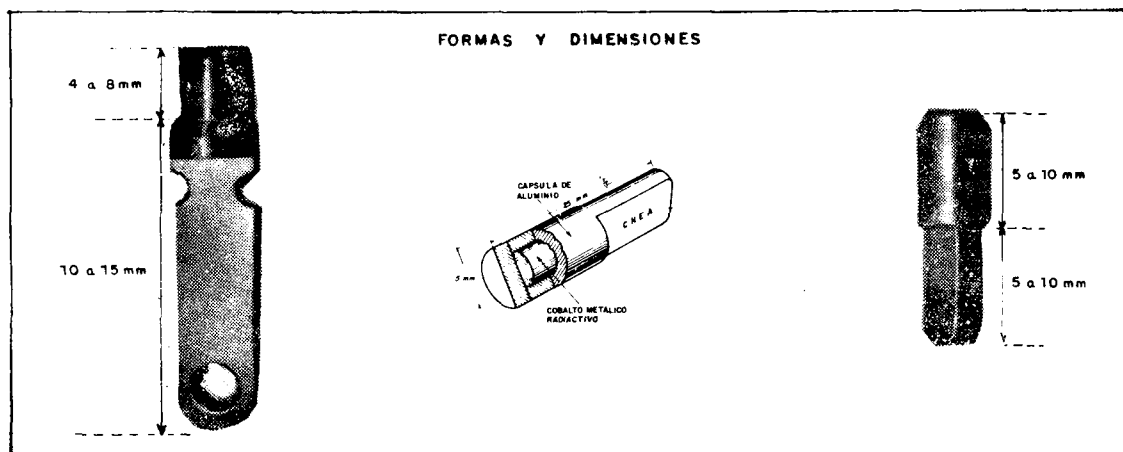
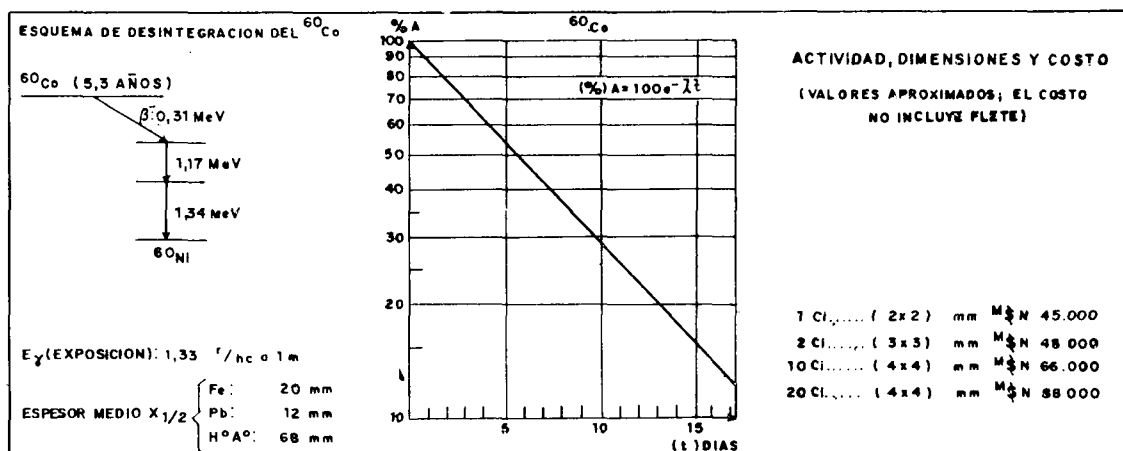
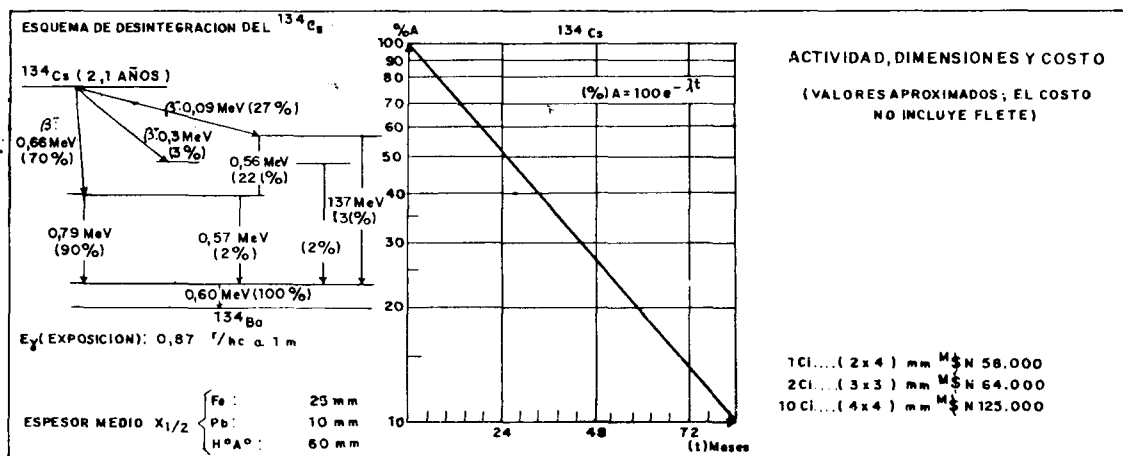


Fig. 7 (bis) Características principales de los radioisótopos más usados en gammagrafía.

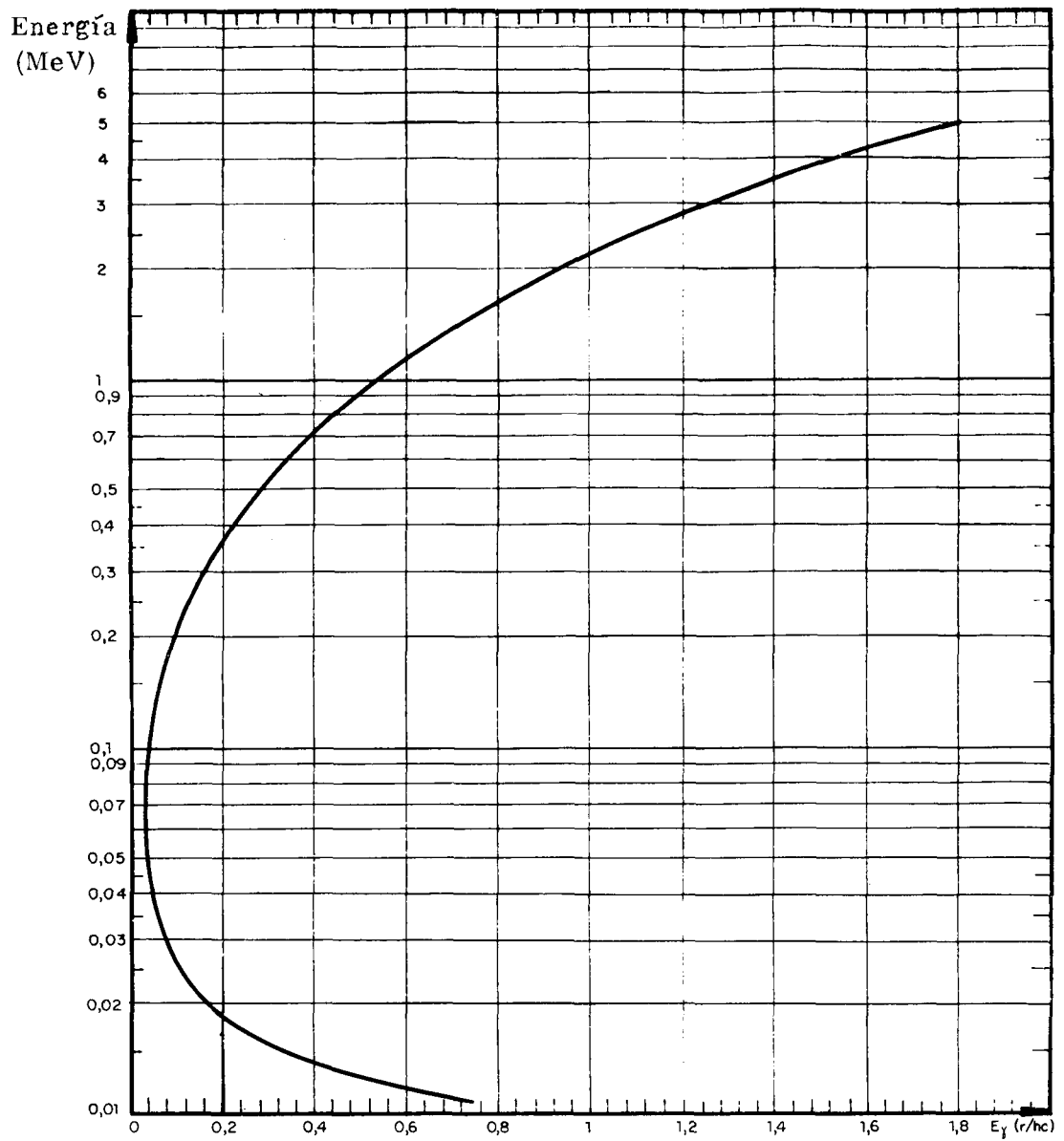


Fig. 8 Exposición $\{E_\gamma \text{ (r/hc) a 1 m}\}$ en función de la energía E de los fotones gamma o X

4.0.0 PELICULAS, PROCESADO Y MATERIAL FOTOGRAFICO

PARA RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

4.1.0 PELICULAS PARA RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Las películas radiográficas usadas en la industria están constituidas por una estructura semejante a la de las películas de uso clínico. Si bien el proceso de fabricación, composición y controles previos a la comercialización son bien conocidos, no tenemos aún una teoría satisfactoria y universalmente aceptada respecto al mecanismo de formación de la imagen latente.

Las películas de uso corriente están compuestas por una base o soporte de nitrato de celulosa o triacetato de celulosa transparente y flexible (en algunas ocasiones ligeramente azulado), flanqueado por la emulsión o capa sensible que consiste en una suspensión de cristales microscópicos de haluros de plata en gelatina.

Entre la emulsión y el soporte está el substrato que facilita la adhesión de ambas capas; por otra parte las películas comerciales cuentan también con dos capas superficiales de gelatina que la protegen (Fig. 9).

La emulsión está compuesta por gelatina, bromuro de plata y una pequeña proporción de ioduro de plata en las emulsiones rápidas (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17).

Las dimensiones de los granos de haluros de las distintas emulsiones están reguladas no sólo por la selección previa a la fabricación sino también por la velocidad de mezclado, temperatura y tiempo del proceso de "maduración" de los componentes de la emulsión.

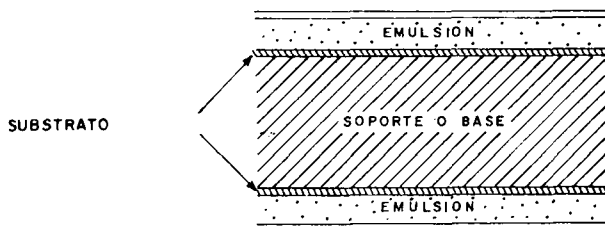


Fig.9 Corte transversal de una película de doble emulsión.

4.1.1 Mecanismo de formación de la imagen latente

Las películas vírgenes son sensibles en mayor o menor proporción a la radiación (visible, partículas cargadas, fotones de rayos X ó γ) y a distintos compuestos químicos o agentes físicos (temperatura, presión mecánica, etc) susceptibles también de provocar una imagen latente en la placa; imagen que después del proceso de laboratorio (revelado, lavado, fijado y nuevo lavado) se convertirá en imagen visible.

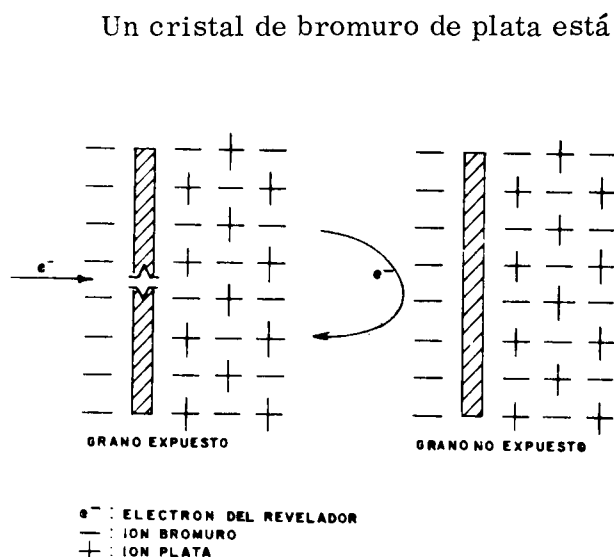
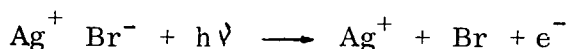


Fig.10 Acción del revelador sobre cristales de Br Ag expuestos y no expuestos a la radiación.

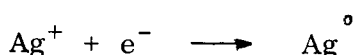
Un cristal de bromuro de plata está formado por iones plata e iones bromuro (Fig. 10) que configuran una rejilla rodeada por una barrera de iones bromuro aportados por el excedente de bromuro de potasio, incluido en el proceso de fabricación. Esta primera barrera iónica, cuya importancia veremos más adelante, está a su vez recubierta por los iones positivos de la gelatina que rodean el cristal.

Cada cristal tiene, además, por lo menos un centro sensible formado por una grieta o impureza (azufre principalmente).

Cuando la emulsión es expuesta a la radiación el electrón o electrones de valencia de la plata se desplazan hacia el centro sensible quedando este centro con carga negativa.



Conjuntamente con esta transformación, se produce un fenómeno secundario que consiste en la fijación de uno o más iones Ag en el centro sensible, quedando así, este centro, neutralizado y formándose átomos de plata metálica. El centro sensible pasa así a ser Centro de Revelado.



La formación de un centro de revelado en el cristal está acompañado por el debilitamiento localizado de la barrera iónica de bromuro. Los electrones del líquido revelador llegan más fácilmente al centro de revelado debido al debilitamiento de la barrera iónica en ese punto (teoría de Berg). El microscopio electrónico ha confirmado esta teoría al comprobar que la reducción del cristal se efectúa a partir de ese punto débil.

El proceso de revelado que lleva la imagen latente a imagen visible es una reacción de reducción que consiste en una entrega de electrones del agente donante (revelador) a los iones de plata cargados positivamente.



En la película expuesta, la densidad o grado de ennegrecimiento (después del tratamiento de laboratorio) es función de la intensidad de radiación que ha llegado a la placa.

Se denomina densidad óptica en un sector de la película revelada, al logaritmo decimal de la relación entre la intensidad de luz incidente (F_0) y la transmitida (F) por ese sector.

$$D = \log \frac{F_0}{F} \quad ; \quad O = \frac{F_0}{F} \quad ; \quad T = \frac{F}{F_0}$$
$$D = \log \frac{F_0}{F} = \log O = \text{colog } T \quad (1)$$

D , densidad óptica

F_0 , intensidad de luz incidente (bujía)

F , intensidad de luz transmitida por la placa (bujía)

O , opacidad

T , factor de transparencia.

El uso de una función de este tipo para definir la densidad óptica está justificado ya que el ojo humano es capaz de recibir sensaciones que varían con el logaritmo de la excitación (Ley de Fechner).

Veamos un ejemplo: Una persona mira una superficie iluminada por una lámpara eléctrica de 100 U.A. Al cambiarse la lámpara por otra de 110 U.A. esa misma persona recién puede percibir un cambio mínimo (umbral $\Delta = 10$ U.A.) en la superficie iluminada. Cual será el cambio mínimo necesario para que ese mismo observador distinga una diferencia si la lámpara es de 1000 U.A. ? La respuesta es 1100 U.A. ($\Delta = 100$ U.A.)

En gammagrafía la densidad que generalmente se busca gira en torno a $D=2$; esta densidad suele incrementarse cuando se trabaja con películas rápidas de poco contraste y se cuenta con negatoscopios aptos para observar altas densidades.

Cuando la densidad es $D=2$ la intensidad de luz transmitida por la placa se reduce 100 veces mientras que para $D=4$ la reducción alcanza a 10.000.

$$D = 2 = \log 100 \quad ; \quad D = 4 = \log 10.000$$

En toda película industrial aparece después de los procesamientos de revelado una densidad base o "velo de fondo" a pesar de no haber sido expuesta a la radiación. Esta densidad base es del orden de 0,2 para las películas de doble emulsión de uso corriente.

La densidad óptica obtenida al cabo de un tiempo t de irradiación está dada luego por:

$$D = D_0 + D_1 \quad (2)$$

D , densidad óptica total

D_0 , densidad óptica de base o "velo de fondo"

D_1 , densidad óptica debida a la radiación penetrante gamma ó X.

4.2.0 RELACION ENTRE EXPOSICION Y DENSIDAD OPTICA

En toda la literatura técnica y comercial que acompaña o promueve la venta de las películas fotográficas y radiográficas, ocupa un preponderante lugar la información relativa a la respuesta (densidad óptica) de la película, frente a un estímulo exterior (radiación visible, gamma ó X). Esta relación, materializada por la Curva Característica de la película está dada en gammagrafía por la siguiente relación:

$$D_1 = f(E) \quad (3)$$

Se puede definir como exposición radiográfica E (18) al flujo de fotones primarios que incide normalmente en la superficie de la película multiplicado por el tiempo que permanece la misma sometida a la radiación.

$$E = \frac{n_0}{4 \pi d^2} \exp(\mu x) \cdot t \quad (\text{fotones/cm}^2) \quad (4)$$

E , exposición radiográfica (fotones/cm²)

n₀, número total de fotones emitidos por la fuente en la unidad de tiempo (fotones/s)

d , distancia fuente-placa (cm)

x , densidad superficial del material a inspeccionar (g/cm²)

μ , coeficiente másico de atenuación total para el radioisótopo empleado y material a inspeccionar (cm²/g)

t , tiempo de exposición (s)

Se denomina "función de transferencia" a la relación matemática entre la respuesta de la película (densidad óptica lograda) y los parámetros del proceso entre los que el peso superficial del material a inspeccionar interviene como variable independiente. Esta función de transferencia no es más que la expresión analítica de la Curva de Calibración que vincula la densidad óptica D₁ con la exposición absoluta o relativa.

La densidad óptica del film es directamente proporcional al número de granos por unidad de superficie de emulsión, sensibilizados por la radiación.

Para simplificar, podemos suprimir algunas de las variables de menos importancia y hacer, de este modo, más sencillo y coherente este desarrollo; podemos suponer que:

- a) Una sola interacción de la radiación gamma con un grano es suficiente para sensibilizarlo y hacerlo revelable.
- b) Todos los granos ofrecen igual sección eficaz total a la radiación y están uniformemente distribuidos en la superficie de la película
- c) No hay interacción de la radiación dentro de la emulsión.
- d) La radiación incide normalmente a la película.

Bajo estas condiciones la cantidad de interacciones (Δn_T) por unidad de tiempo y superficie serán:

$$\Delta n_T = n N_0 a \text{ (interacciones/cm}^2 \text{ s)}$$

n , número de fotones incidentes por unidad de tiempo y superficie sobre el film (fotones/s cm^2)

N_0 , cantidad total de granos por unidad de superficie de película expuesta (granos/ cm^2)

a , sección eficaz total por grano para la radiación incidente (cm^2/grano)

Respecto al factor a , es importante recordar que esta sección eficaz debe ser referida, principalmente, a los electrones que llegan a la película por efectos secundarios y que provienen de las pantallas intensificadoras, portaplacas, material a inspeccionar, etc, ya que esta radiación es la que influye preponderantemente en la formación de la imagen latente.

Las interacciones dadas por la formula anterior ocurren tanto en los granos ya sensibilizados como en aquellos que aún no lo están.

A un tiempo t existirá un número N de granos no sensibilizados remanentes por unidad de superficie de película y la velocidad de interacción de la radiación con estos granos será:

$$\Delta n = n \cdot N \cdot a \text{ (interacciones/cm}^2 \text{ s)}$$

En consecuencia, aplicando la equivalencia de que una interacción implica la sensibilización de un grano, la velocidad de sensibilización será:

$$\frac{dN}{dt} = -n \cdot N \cdot a$$

$$\frac{dN}{N} = -n \cdot a \cdot dt$$

El signo menos indica que se trata de una disminución de la variable. Integrando esta expresión en el intervalo de 0 a t resulta:

$$N(t) = N_0 \exp (-nta) \text{ (granos no sensibilizados/cm}^2\text{)}$$

Reemplazando $E = n t$ en la fórmula anterior

$$N(E) = N_0 \exp (-a \cdot E) \text{ (granos no sensibilizados/cm}^2\text{)}$$

Los granos $N'(E)$ sensibilizados por unidad de superficie al tiempo t , y por lo tanto revelables, serán:

$$N'_{(E)} = N_0 \left[1 - \exp(-aE) \right] \quad (\text{granos sensibilizados/cm}^2)$$

$N'_{(E)}$ es directamente proporcional a la densidad óptica D_1 de la película

$$D_1 = k N_0 \left[1 - \exp(-aE) \right] \quad (\text{unidad de densidad óptica}) \quad (5)$$

k , constante de proporcionalidad que depende de la naturaleza y espesor de la pantalla intensificadora, naturaleza del revelador y tiempo de revelado, naturaleza y espesor del material a inspeccionar, etc.

Para valores pequeños de la exposición, resulta:

$$D_1 = k N_0 a E \quad (\text{unidades de densidad óptica}) \quad (6)$$

Es decir: la densidad óptica es función lineal de la exposición.

La densidad total será, luego:

$$D = D_0 + D_1 = D_0 + k \cdot N_0 \cdot a \cdot E \quad (7)$$

4.3.0 CURVA CARACTERISTICA

La relación antes mencionada que vincula la densidad óptica con la exposición, se puede representar en función logaritmo de la exposición relativa. A la curva obtenida se la denomina curva característica de la película (Fig. 11). En ella se distinguen tres regiones: una de subexposición AB, (donde se cumple la ec. 6), otra intermedia rectilínea BC en donde se trabaja habitualmente en gammagrafía y una de sobre exposición CD donde la densidad óptica prácticamente no varía con el aumento de la exposición. Este fenómeno de saturación en la última zona es particularmente apreciable en películas rápidas. El valor D_0 corresponde a la densidad base ó "velo de fondo" que aparece en toda placa expuesta, después del revelado. Esta densidad base D_0 es producida por:

- la opacidad propia de la película;
- la exposición debida a la radiación natural durante el almacenamiento;
- la exposición debida a trazas de elementos radiactivos naturales presentes en la emulsión o la base (Potasio principalmente).

La curva característica permite al usuario conocer inmediatamente los parámetros fundamentales de una emulsión: Velocidad o rapidez, contraste, definición y amplitud o "latitud".

El estudio analítico de cada uno de estos parámetros, resulta en algunos casos difícil y complejo debido a la interdependencia de múltiples factores (Tabla III) que condiciona la calidad de las imágenes obtenidas en gammagrafía. Trataremos en estos apuntes algunos aspectos parciales referentes a la velocidad, contraste, etc. de la película y su relación con los factores mencionados en la Tabla III. (19) (20).

4.4.0 VELOCIDAD O RAPIDEZ DE PELICULAS (SPEED, "SENSITIVITY")

La rapidez relativa de las películas radiográficas depende del tamaño y de la densidad de los granos de bromuro de plata. Con el fin de lograr altas velocidades las películas de uso corriente tienen doble emulsión. En la figura 11 han sido representadas las curvas características de dos películas: una rápida y otra lenta.

Los fabricantes de películas en los folletos técnicos refieren la velocidad relativa (Relative speed) de sus emulsiones a un patrón. Una película de velocidad relativa 200 es 5 veces más rápida que otra cuya velocidad relativa es 40 para la densidad óptica de referencia (generalmente $D=2$).

Veamos ahora dos ejemplos relativos al uso de la Curva característica (Fig. 11).

Ejemplo 1

Hallar la velocidad relativa de la película R respecto a la película L para $D = 1,8$

Pel. L ; $\log E_R = 2,15$

Pel. R ; $\log E_R = 1,75$

diferencia = $0,40$

Antilog $0,4 = 2,5$

Con la película R, para la densidad 1,8, una determinada fuente radiactiva y análogas condiciones de irradiación y procesamiento se puede reducir 2,5 veces el tiempo de irradiación.

Ejemplo 2

Supongamos haber obtenido una densidad 1,8 para la película R y consideremos conveniente realizar una nueva gammagrafía de la misma pieza y alcanzar una densidad 2,3

Para $D = 2,3$ $\log E_R = 2,15$

Para $D = 1,8$ $\log E_R = 1,75$

diferencia = $0,40$

Antilog $0,4 = 2,5$

En este caso debemos aumentar 2,5 veces el tiempo de exposición para alcanzar la densidad 2,3 con el mismo tipo de películas.

4.5.0 CONTRASTE Y DEFINICION DE PELICULAS

Estas dos características están íntimamente vinculadas y por esa razón las tratamos en conjunto. Ambas dependen, entre otros factores, de las dimensiones de los granos sensibles: baja granulometría, alto contraste y gran definición.

Se define como contraste, a la diferencia de densidad óptica entre dos sectores adyacentes de la película para una determinada variación de la exposición recibida por esos sectores.

En la zona útil o recta de la curva característica el contraste esta dado por la pendiente γ de dicha recta. (Fig. 11, 12 y 14).

$$\gamma = \text{tang. } \alpha = \frac{\Delta D}{\Delta \log E_r}$$

La velocidad y el contraste son, en la mayoría de los casos, incompatibles. Las películas rápidas (grano grande) tienen bajo contraste y, viceversa, las películas lentas tienen buen contraste. Sin embargo existen casos, como el representado en la Fig. 16 en los que no se cumple esta afirmación; la película A tiene más contraste que la película B y es más rápida para densidades inferiores a 2.

Existe la tendencia a confundir el contraste global, o sea el contraste real obtenido en la placa con el contraste película que aquí tratamos. Sin embargo es conveniente insistir que el contraste global además de ser función de la película, tiempo de revelado, etc, está íntimamente vinculado con el contraste objeto que trataremos más adelante.

La capacidad de una película expuesta para separar convenientemente dos secciones adyacentes, con distinta densidad óptica (por haber recibido distintas intensidades de radiación) se denomina definición.

También aquí es difícil independizar la definición propia de cada película con la global, que es suma de la mencionada en primer termino y aquella que está vinculada al tamaño de la fuente radiactiva, geometría de irradiación, energía, etc.

La Fig. 15 muestra el trazado de la curva de densidades en función del espesor del material a inspeccionar para dos películas. La película b) tiene una sola capa de emulsión, mientras que la a) tiene doble emulsión; la definición de la emulsión doble será inferior a la de la simple.

4.6.0 AMPLITUD O "LATITUD" DE PELICULAS

Las películas industriales de gran amplitud tienen la propiedad de permitir identificar un rango grande de espesores en la zona útil de la curva característica. La Fig. 16 muestra las curvas características de dos películas y la amplitud de ambas para un intervalo arbitrario de densidades ópticas. Como puede apreciarse el contraste y la amplitud son incompatibles.

4.7.0 PROCESO DE LABORATORIO POSTERIOR A LA IRRADIACION

El proceso químico realizado en el cuarto oscuro, con luz de seguridad, tiene por objeto hacer visible la imagen latente lograda durante la irradiación (revelado) y eliminar los granos sensibles, no expuestos, de la emulsión (fijado).

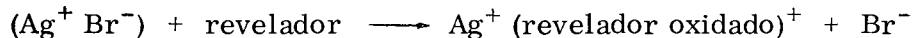
Trataremos aquí algunos aspectos del proceso completo del laboratorio sin

dar mayores detalles de las drogas utilizadas y las ventajas e inconvenientes de unas u otras en virtud de las múltiples variantes existentes o propuestas por los fabricantes de materiales fotográficos. Lo extenso del tema tampoco nos permite un análisis exhaustivo, limitándonos solamente a tratar algunos aspectos parciales vinculados con esta etapa de la gammagrafía. (11)

Es aconsejable, o al menos prudente, seguir las indicaciones de los fabricantes para preparar la solución reveladora y el fijador. Los manuales o folletos técnicos incluyen además de las drogas y las proporciones convenientes (ver revelado y fijado), el orden en que deben ser diluídas y otras referencias respecto de la consevación, manipulación, vida útil, etc.

4.7.1 Revelado

La solución reveladora actúa en forma selectiva, sobre los cristales de bromuro de plata expuestos a la radiación, reduciendo la plata iónica y llevándola al estado metálico. La barrera de iones bromuro que protege a los cristales no expuestos evita que el revelador los reduzca. Esta reacción química tiene, como contrapartida, una progresiva degradación del revelador que es paulatinamente oxidado por el uso y por el medio ambiente que lo circunda (aire húmedo, etc.)



La imagen visible (íntimamente vinculada con el contraste, densidad de fondo y la definición) depende de la acertada elección del revelador y del tiempo y temperatura de revelado.

En la Tabla IV están indicadas las drogas más conocidas que se emplean para revelar películas industriales (rayos X o gamma) y las funciones, ventajas e inconvenientes de las mismas.

El revelado manual o automático de películas debe hacerse con una permanente y lenta agitación, para lograr una homogénea distribución de líquido activo, en ambas caras de la película y evitar la sedimentación de bromuros u otras sales que pueden provocar manchas, susceptibles de enmascarar posibles fallas.

4.7.1.1 Tiempo y temperatura de revelado: Como puede apreciarse en la Fig. 17 el tiempo de revelado está estrechamente vinculado con la calidad de la imagen. Con un tiempo de revelado ligeramente superior al recomendado se puede mejorar el contraste (pendiente gamma), sin embargo aumenta también la densidad de fondo o "velo químico" ya que, algunos granos no expuestos a la radiación, son atacados por el revelador.

Cuando una placa esta subexpuesta o sobre-expuesta el operador puede, dentro de ciertos límites, aumentar o disminuir el tiempo de revelado respecto al recomendado; los operadores con cierta experiencia en revelado aumentan o disminuyen

el tiempo de revelado de acuerdo al cambio de coloración de la placa sumergida en el revelador cuando realizan esa tarea en cuarto oscuro, con luz de seguridad. Sin embargo en casos de revelado en serie o automatizado no es posible compensar exposiciones deficientes, siendo necesario, en estos casos, normalizar el tiempo de revelado, ateniéndose a las indicaciones del fabricante. Los tiempos recomendados de revelado fluctúan entre 2 y 6 minutos, según la naturaleza del revelador, existiendo, como es evidente, un compromiso entre el tiempo y la temperatura del revelador (Fig. 18 y 19).

La curva de la Fig. 19 puede ser usada para corregir el tiempo de revelado recomendado cuando la temperatura del revelador es superior o inferior a la nominal. Conviene recordar aquí que, con temperaturas superiores a los 24°C, se corre el riesgo de alterar la emulsión y provocar su desprendimiento de la base o soporte.

4.7.2 Primer lavado

El lavado de las películas durante aproximadamente 10 segundos evita la contaminación de la cuba que contiene la solución fijadora y detiene el proceso de revelado. Es conveniente renovar continuamente el agua de lavado y agitar la película sumergida para evitar las manchas que, muy frecuentemente, se forman en esta etapa del proceso.

La eficiencia del lavado aumenta colocando en el baño ácido acético (solución al 3%) ya que es alcalina la solución reveladora y el lavado busca detener el proceso de revelado.

Otra variante, bastante difundida en los laboratorios de revelado automático, es el lavado bajo chorros de agua que mojan totalmente ambas caras de la película.

4.7.3 Fijado

El fijado tiene por objeto eliminar de la emulsión los cristales no expuestos de bromuro de plata. En radiografía con radioisótopos la relación entre cristales expuestos y no expuestos es, para $D = 2$, aproximadamente igual a la unidad. Esta referencia es de utilidad para aquellos laboratorios donde el alto número de películas procesadas, justifica la recuperación de la plata eliminada de las placas.

En la Tabla V se indican las drogas más usadas en los fijadores y algunas características de las mismas.

4.7.4 Último lavado y secado de películas

Todas las sales solubles residuales son eliminadas con lavado en cubas o tanques especiales que permiten recircular el agua. La eficiencia del lavado depende de la renovación del agua, agitado y del tiempo de permanencia de las películas. Cuando la temperatura del agua está comprendida entre 15°C y 25°C el lapso de lavado recomendado es de 20 minutos. En zonas de clima frío, donde la temperatura del agua corriente es inferior (5°C a 15°C) conviene incrementar 10 minutos este tiempo.

T A B L A III

VELOCIDAD, CONTRASTE, DEFINICION Y AMPLITUD DE PELICULAS

Características	Dependen de:
VELOCIDAD	Tipo de película: Tamaño del grano, densidad, espesor, emulsión sensible, número de emulsiones (simple o doble). Tratamiento posterior a la irradiación: Naturaleza del revelador, temperatura y tiempo de revelado, degradación del revelador; fijador, etc. Tiempo transcurrido entre la irradiación y el tratamiento posterior: Regresión de la imagen latente ("feeding") debido a las condiciones de almacenamiento, etc. Pantallas intensificadoras: Naturaleza y espesor de la pantalla, contacto pantalla-placa, etc.
CONTRASTE	<u>Contraste objeto a inspeccionar</u> Diferencia de espesores, dimensiones y posición relativa de la falla dentro del objeto a inspeccionar. Aspecto de energía del radioisótopo. Radiación secundaria y dispersa: pantallas (espesor y naturaleza) portaplacas, etc. <u>Contraste películas:</u> Tipo de película: Tamaño del grano, densidad, espesor de la emulsión sensible, número de emulsiones (simple o doble). Tratamiento posterior a la irradiación: Naturaleza del revelador, temperatura y tiempo de revelado, degradación del revelador; fijador, etc. Negatoscopio, iluminación del cuarto oscuro, etc.
DEFINICION	<u>Factores geométricos</u> Dimensiones de la fuente. Distancia fuente-placa. Distancia objeto-placa. Posición de la falla y geometría de la misma. <u>Factores diversos:</u> Tipo de película: ídem. Pantallas intensificadoras. Espectro gamma de la fuente. Tratamiento posterior. Tiempo transcurrido entre la irradiación y el revelado.
AMPLITUD ("Latitud")	Espectro gamma de energías Tipo de películas. Tratamiento posterior.

T A B L A IV

REVELADORES

CARACTERISTICAS, FUNCIONES, ETC.	DROGAS MAS USADAS
Agentes reveladores: Son los compuestos químicos reductores que suministran los electrones necesarios para convertir el (Br Ag) expuesto en Ag metálico. Las propiedades de la mezcla de dos o más agentes reveladores suelen ser superiores a la de los compuestos tomados por separado, con revelado sucesivo y en idénticas condiciones y proporciones (fenómeno de super-adición).	Metol Hidroquinona Parafenilendiamina Pirocatequina Glicina Amidol
Aceleradores: Su función es llevar la solución reveladora a un pH comprendido entre 10 y 13 para acortar el tiempo de revelado. El medio alcalino facilita la reducción.	Carbonato de sodio Hidróxido de sodio Carbonato de potasio Hidróxido de potasio Boráx.
Retardadores: La función del retardador no es, exactamente, opuesta a la del acelerador, ya que el objetivo perseguido con estas drogas es evitar o retardar la reducción de los granos sensibles no expuestos a la radiación.	Bromuro de potasio. Benzotriazol. 6 Nitro-bencimidazol.
Conservadores: La acción de la emulsión o el aire oxida al revelador. Los conservadores prolongan la vida útil de la solución.	Sulfito de sodio. Sulfito de potasio.
Otras drogas: Además de los compuestos mencionados, según las circunstancias, los efectos buscados o la calidad del agua empleada para diluir el revelador, se suelen incluir otras drogas. El polimetafosfato de sodio, por ejemplo, se agrega para evitar la sedimentación de barros no solubles, en las zonas donde el agua contiene altos porcentajes de calcio y magnesio.	

T A B L A V

FIJADORES

CARACTERISTICAS, FUNCIONES, ETC.	DROGAS MAS USADAS
Agente de fijado: Cumple la función de convertir el bromuro de plata no expuesto en un compuesto soluble eliminado de la emulsión durante el lavado posterior $2 \text{Na}_2 \text{S}_2\text{O}_3 + (\text{Ag Br}) \rightarrow \text{Na}_3 \text{Ag} (\text{S}_2 \text{O}_3)_2 + (\text{Na Br})$ De los dos agentes de fijado aquí mencionado el tiosulfato de amonio es recomendado cuando se quiere reducir el lapso de fijación (fig. 21).	Tiosulfato de sodio Tiosulfato de amonio
Acido y amortiguador: Para proteger al fijador de la contaminación alcalina del revelador y llevar la solución fijadora a un pH comprendido entre 4,5 y 5 son empleadas estas drogas, que, además, evitan la formación del "velo dicróico" o manchas verdes, difícil de eliminar producidas cuando la concentración del agente de fijado es superior a la indicada.	Acido acético Acetato de sodio Acido bórico
Conservadores: Cuando el pH de la solución desciende por debajo de 4 los tiosulfatos tienen tendencia a descomponerse en sulfitos y sulfuros. Para evitar esta reacción se usan los conservadores.	Sulfitos
Endurecedores: Reducen el hinchado, ablandado y la absorción de agua por parte de la emulsión, permitiendo secar las placas en menor tiempo (fig. 20). Si el pH de la solución es superior a 5 existe el peligro de precipitación de hidróxido de aluminio sobre las placas (pelusa blanca).	Cloruro de aluminio Sulfato de aluminio

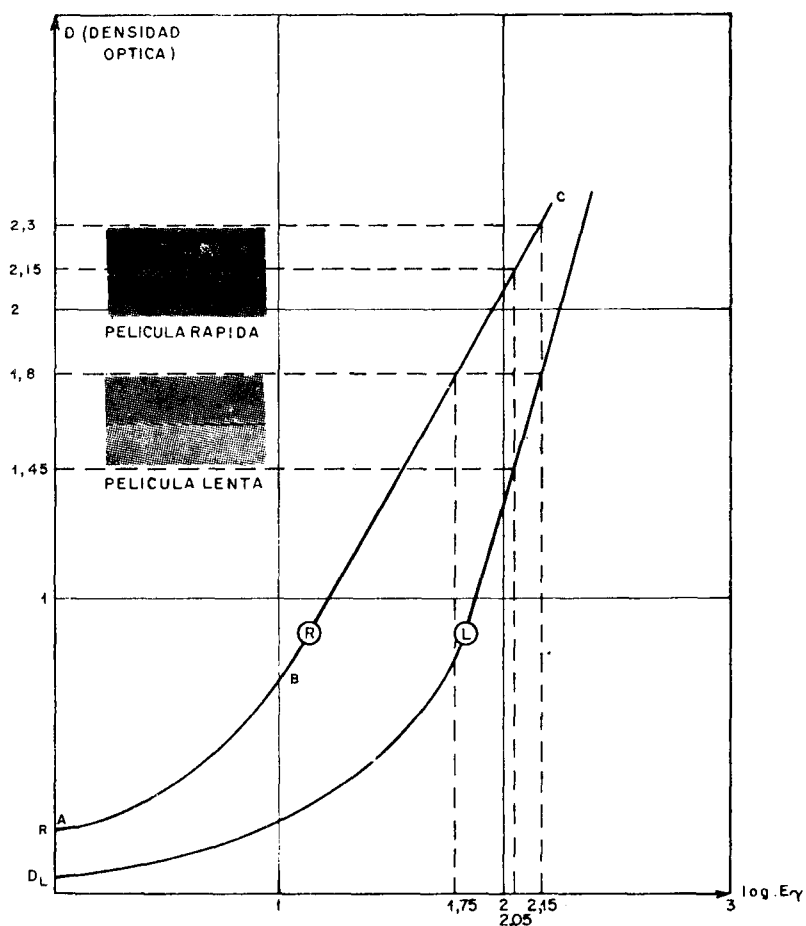


Fig. 11 Curvas características de dos películas. R (rápida) y L (lenta).

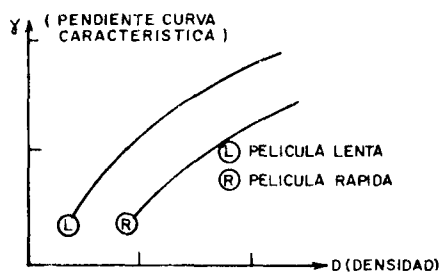


Fig. 12 Pendientes (contraste) de las películas de la Fig. 11.

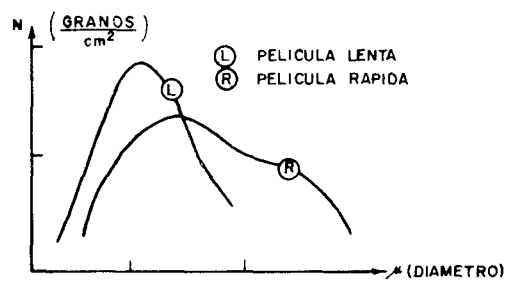


Fig. 13 Dimensiones de los cristales sensibles de las películas de la Fig. 11.

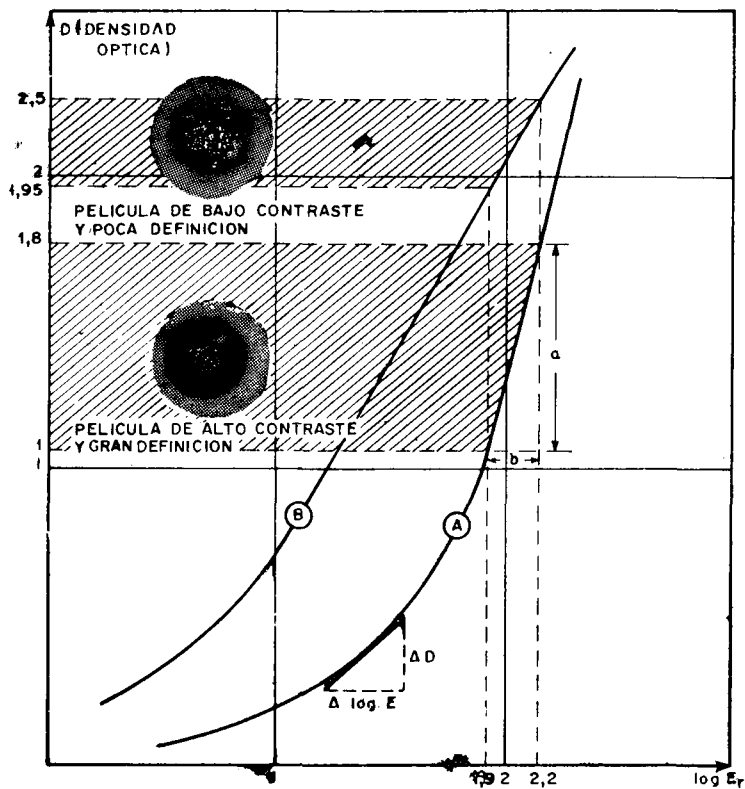


Fig. 14 Curvas características de dos películas. A alto contraste; B bajo contraste.

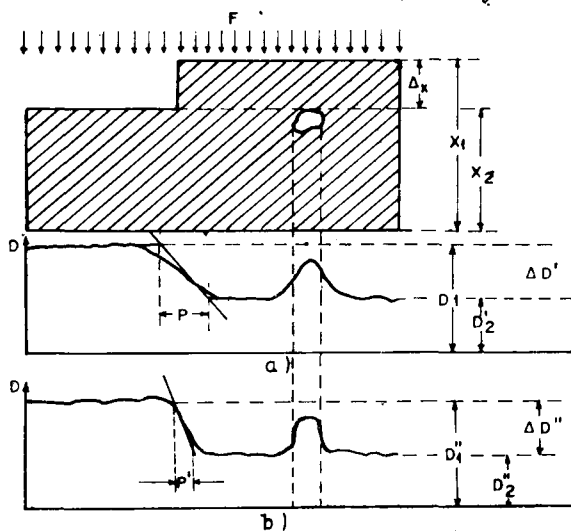


Fig. 15 Definición: Película a) poca de finición (mucho penumbra) y película b) alta definición.

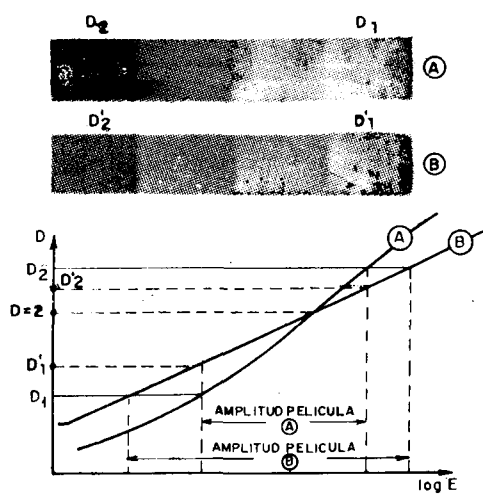


Fig. 16 Amplitud de dos películas para el mismo rango de espesores.

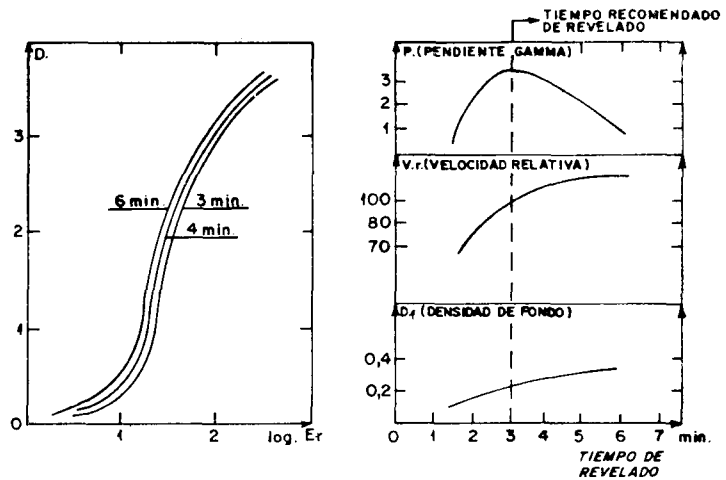


Fig. 17 Influencia del tiempo de revelado

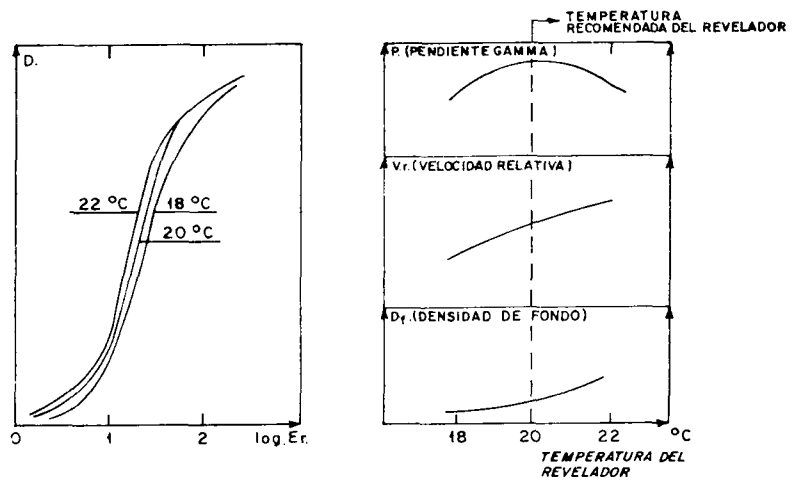


Fig. 18 Influencia de la temperatura de revelado.

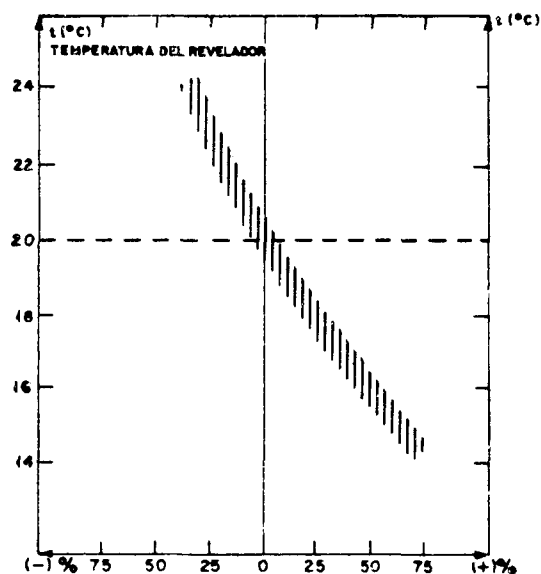


Fig. 19 Aumento o disminución porcentual del tiempo de revelado en función de la temperatura del revelador.

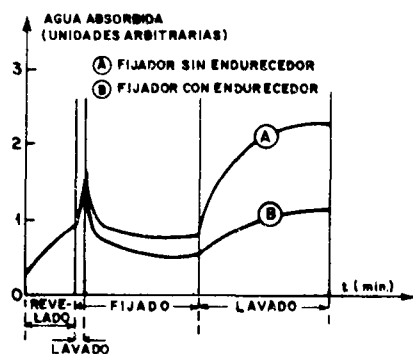


Fig. 20 Agua absorbida por la emulsión durante el proceso de laboratorio.

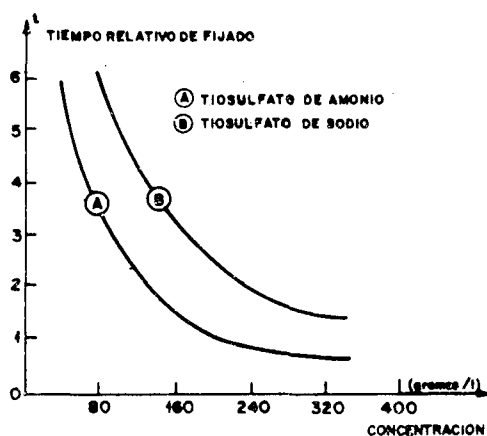


Fig. 21 Tiempo relativo de fijado en función de la concentración y drogas usadas.

5.0.0 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES GEOMETRICAS DE EXPOSICION RESPECTO A LA IMAGEN EN GAMMAGRAFIA

La imagen visible de un objeto (o de un defecto) en la placa radiográfica, es la proyección del mismo objeto (o defecto) sobre el plano de la placa; el centro de proyección es la fuente radiactiva.

La falta de contraste y la penumbra o indefinición que entorpecen la visión de la imagen pueden ser tratadas, en primera instancia, con las mismas relaciones geométricas usadas en óptica y luminotecnia. Decimos en primera instancia pues si bien la naturaleza de la radiación gamma o X no difiere de la luminosa más que en la energía o espectros de energías, los fenómenos de propagación y dispersión en la materia característicos de la radiación penetrante, el mecanismo de formación de la imagen latente y el tratamiento posterior de la película, deben ser tenidos en cuenta al hacer la crítica global de la calidad de dicha imagen.

Las variables geométricas vinculadas a la calidad de la imagen son:

- Distancia fuente radiactiva-placa;
- Forma y dimensiones de la fuente radiactiva;
- Forma, dimensiones y posición relativa del defecto o fallas.

Debe tenerse en cuenta además, que la fuente radiactiva tiene dimensiones comprendidas, según la actividad y el radioisótopo, entre 1 mm. y 7 mm de diámetro, razón por la cual no puede despreciarse y reducirse a un punto sus dimensiones al hacer efectivo el cálculo de la penumbra, cuando la distancia fuente-placa es reducida.

5.1.0 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA FUENTE RADIATIVA-PLACA

La distancia fuente-placa está estrechamente vinculada con la calidad de la imagen y con el costo unitario de la placa expuesta. Cortas distancias pueden enmascarar la imagen de pequeños defectos o fallas debido a la penumbra o falta de definición. Cuando la distancia es mayor, los contornos de la imagen aparecerán más nítidos pero el tiempo de exposición, que aumenta con el cuadrado de la distancia, influirá considerablemente sobre el costo operativo. Es preciso, de este compromiso, hacer el adecuado balance en cada caso.

La penumbra puede ser deducida de la siguiente relación (Fig. 22):

$$\frac{p}{e'} = \frac{\phi}{d - e'} \quad \therefore \quad p = e' \frac{\phi}{d - e'} \quad (1)$$

p , penumbra o falta de definición.
 ϕ , diámetro de la fuente radiactiva.
 e' , distancia del defecto a la placa.
d , distancia fuente-placa.

Es conveniente reemplazar e' por el espesor e para colocarse en el caso más desfavorable y determinar así la penumbra para fallas o defectos cercanos a la superficie o cara más alejada de la placa.

$$p = e \frac{\phi}{d - e} \quad . \quad . \quad d - e = e \frac{\phi}{p}$$

$$d = e \left(\frac{\phi}{p} + 1 \right) \quad (2)$$

Existe un límite inferior de penumbra o umbral inherente al tipo de filme, espectro de energías de la fuente (efecto de borde debido a la radiación dispersa), y capacidad visual del observador. Reducir esta penumbra, $p_{\min}$, más allá de éstos límites, es imposible, cualquiera sea la distancia de exposición, en el estado actual de desarrollo de la técnica y del material fotográfico; $p_{\min}$ está comprendida entre 0,1 y 0,7 mm aproximadamente.

$$0,1 < p_{\min} < 0,7$$

La distancia óptima en virtud de ésta limitación estará dada, de acuerdo a la expresión (2), por:

$$d_{\text{ópt}} = e \left(\frac{\phi}{p_{\min}} + 1 \right) \quad (3)$$

El uso de esta fórmula es limitado, ya que, en caso de irradiaciones panorámicas (cañerías, tanques cilíndricos, piezas diversas), la distancia fuente-placa puede ser tomada de acuerdo a las condiciones operativas fijadas o al número de piezas a radiografiar.

Lo expuesto vale para irradiaciones con placas de reducidas dimensiones; cuando la placa es grande y la pieza es plana (fig. 22), la distancia es posible calcularla en función de la mayor longitud de la placa, para evitar que los bordes o extremos queden sub-expuestos respecto del centro.

En éstos casos es prudente adoptar una distancia de irradiación superior a 1,5 veces la diagonal de la parte útil de la placa (Fig. 22).

$$d_{\min} \geq 1,5 \sqrt{a^2 + b^2}$$

Como esta fórmula no contempla el espesor de la pieza (ni las dimensiones de la fuente), es conveniente complementar la misma con la siguiente expresión, aconsejada por algunas normas vigentes:

$$d_{\text{mín}} \geq 8 e \quad (5)$$

Ejemplo:

Determinar la distancia mínima de irradiación (d) para el ejemplo de la Fig. 23.

La distancia óptima se buscará para un $p_{\text{mín}} = 0,2$ mm.

$$d_{\text{opt}} = e \left(\frac{\phi}{p_{\text{mín}}} + 1 \right) = 20 \left(\frac{2}{0,2} + 1 \right) = 20 (10 + 1)$$

$$d_{\text{opt}} = 220 \text{ mm}$$

Las dimensiones útiles de la placa son:

$$a = 100 \text{ mm} \quad ; \quad b = 150 \text{ mm}$$

Calculamos $d_{\text{mín}}$ reemplazando en (4) y (5)

$$d_{\text{mín}} \geq 8 \cdot 20 \quad \therefore \quad d_{\text{mín}} \geq 160 \text{ mm}$$

$$d_{\text{mín}} \geq 1,5 \sqrt{100^2 + 150^2} \quad \therefore \quad d_{\text{mín}} \geq 270 \text{ mm}$$

De los tres valores obtenidos adoptamos el mayor, o sea 270 mm.

Cuando la diferencia de densidad entre el centro y el extremo de la placa es demasiado acentuada puede adoptarse un coeficiente mayor que 1,5 para obtener más uniformidad

5.2.0 INFLUENCIA DE LA FORMA Y DIMENSIONES DE LA FUENTE RADIATIVA

En el capítulo 3.0.0 hemos expuesto ya algunos aspectos referentes a la forma y dimensiones de las fuentes.

Las fuentes emisoras de radiación gamma (^{170}Tm , ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co , etc) tienen forma cilíndrica con diámetro aproximadamente igual al alto. La parte cilíndrica activa está totalmente cubierta y protegida por una cápsula de acero inoxidable o aluminio. Esta cápsula, para facilitar la manipulación a distancia, tiene una "cola" del mismo material con un orificio en el extremo.

En la fórmula (2) (5.1.0), una de las variables es el diámetro de la fuente; en la misma puede apreciarse la influencia de esta dimensión respecto a la penumbra.

5.3.0 INFLUENCIA DE LAS DIMENSIONES, FORMA Y POSICION RELATIVA DEL DEFECTO O FALLA

Una falla o discontinuidad es visible o localizable cuando en la placa irradiada y revelada se produce una diferencia de densidad ΔD igual o superior al umbral ΔD_0 que es función de las condiciones de observación, instrumental, analista y de otros parámetros ya mencionados (filme, fuente, condiciones geométricas, etc.)

El umbral ΔD_0 está comprendido entre

$$0,02 < \Delta D_0 < 0,1$$

Defectos alargados y transversales, como los de la Fig. 24 b) son localizados cuando el contraste supera los límites antes mencionados. En los defectos de dimensiones transversales más reducidas (Fig. 24 a) en cambio, el éxito de la localización depende de la relación $\Delta D_1/a_1$. Volviendo a la Fig. 24 podemos decir entonces que el defecto a) sería localizado más fácilmente que el defecto b) si:

$$\frac{\Delta D_1}{a_1} > \frac{\Delta D_2}{a_2}$$

La definición, como es obvio, adquiere importancia con defectos de dimensiones reducidas. En los defectos esféricos la definición es menor que en aquellos de bordes agudos. (22)

La orientación de la falla respecto al haz de irradiación adquiere importancia en casos como el representado en la Fig. 25. Una toma oblicua respecto a la pieza puede poner en evidencia una fisura que con irradiación normal no es delatada.

Algunas fisuras son difíciles de detectar con gammagrafía y aún con rayos X. El éxito dependerá de la orientación de la fisura y de la posición de la misma respecto a la placa. Los defectos más cercanos a la cara adyacente a la placa son más fáciles de detectar por las razones ya expuestas.

Las fisuras contenidas en planos perpendiculares al eje de irradiación están orientadas favorablemente y por consiguiente son más fáciles de detectar, que las paralelas a ese eje.

En virtud del desarrollo actual de la gammagrafía industrial es posible detectar defectos (en condiciones favorables) del orden del 0,5% respecto al espesor de la pieza inspeccionada.

$$S = \frac{\Delta x}{X} \cdot 100$$

Con equipos de rayos X se logra mejorar esta sensibilidad para bajos espesores de acero.

5.4.0 DISTINTOS TIPOS DE PIEZAS O ESTRUCTURAS: GEOMETRIA FUENTE-PLACA

La Fig. 26 muestra algunas de las variantes empleadas para irradiaciones direccionales o panorámicas con distintos tipos de piezas ó instalaciones de frecuente inspección.(23) (24)

Las variantes k) y l) de dicha figura corresponden a irradiaciones panorámicas de tanques cilindricos con cabezas esféricas(calotas) en las que es posible lograr con una sola irradiación múltiples placas, reduciendo así substancialmente el costo operativo. En estos casos es aconsejable emplear películas en rollo, las que simplifican notoriamente la etapa de preparación, previa a la irradiación; estas películas se producen ya con pantallas de plomo incorporadas dentro de los mismos rollos de expedición y venta.

La variante m) representa una irradiación panorámica de piezas o materiales de distintos espesores. En los otros esquemas de la fig.26 representamos casos de irradiaciones direccionales que suelen inspeccionarse frecuentemente.

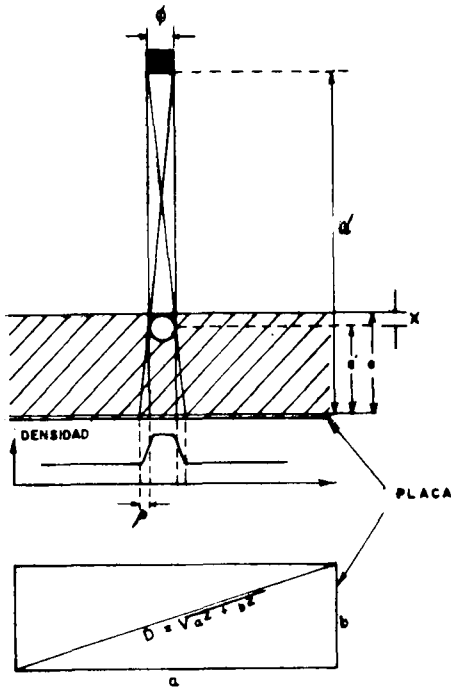


Fig. 22 Influencia de la distancia fuente-placa sobre la penumbra.

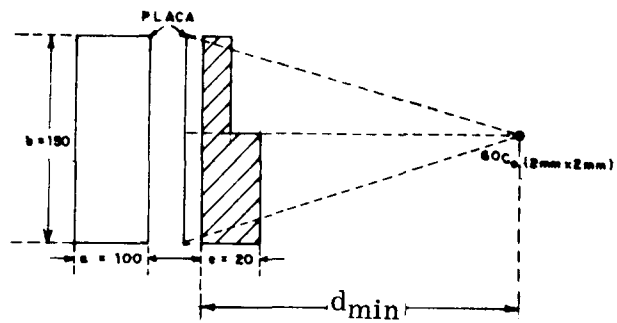


Fig. 23 Distancia mínima de irradiación o distancia mínima fuente-placa.

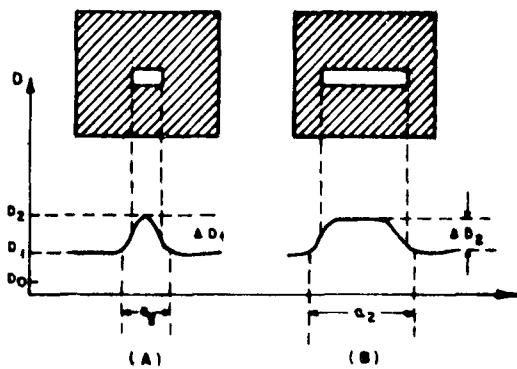


Fig. 24 Detección de defectos en función de la forma de los mismos

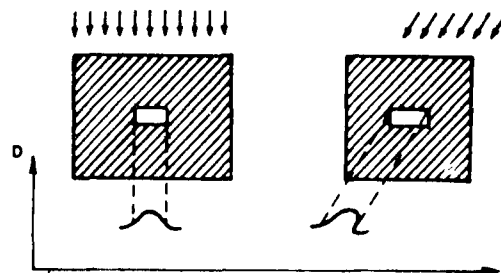


Fig. 25 Detección de defectos en función de la dirección de la radiación respecto al defecto.

PIEZAS Y ESTRUCTURAS DIVERSAS

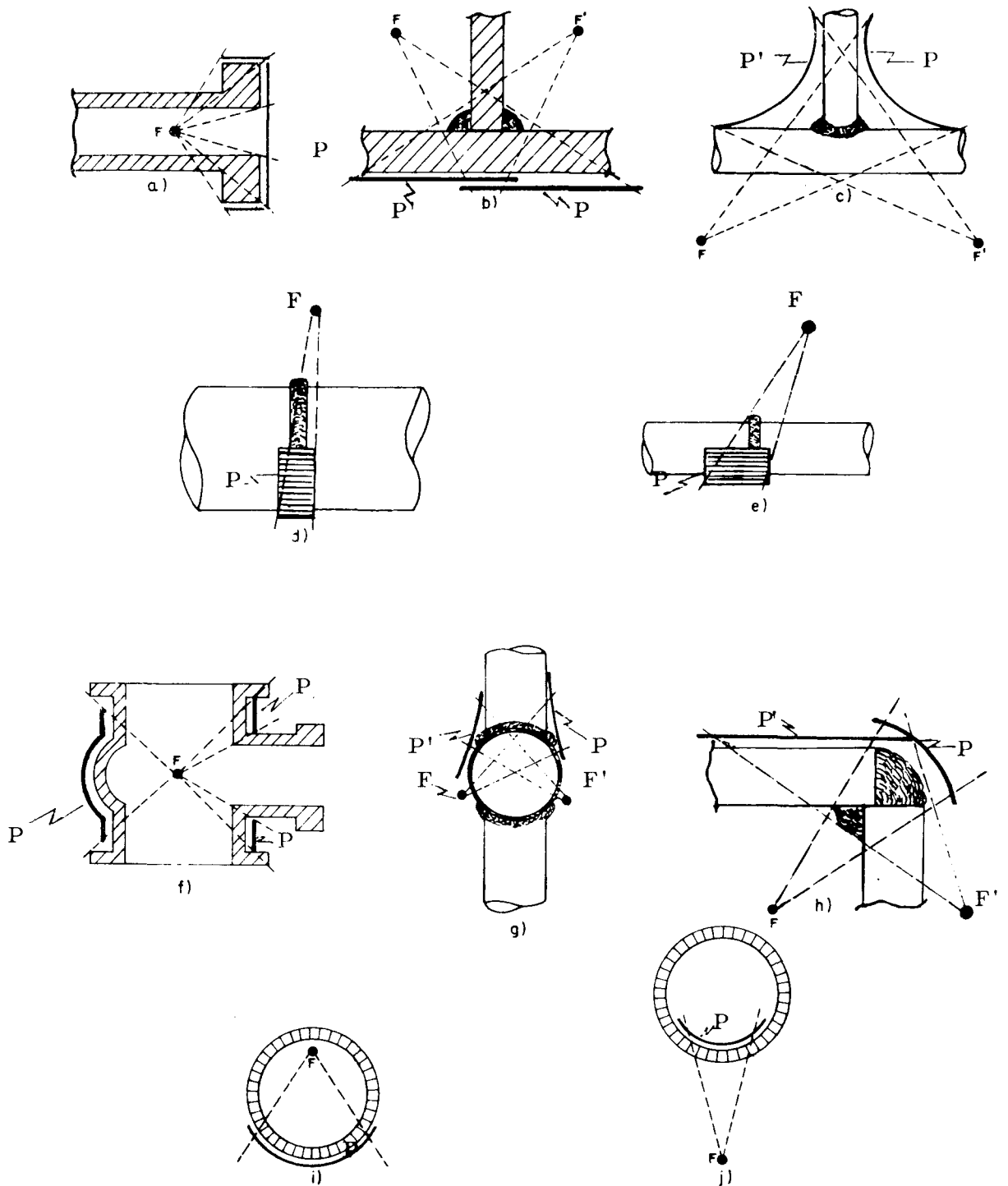
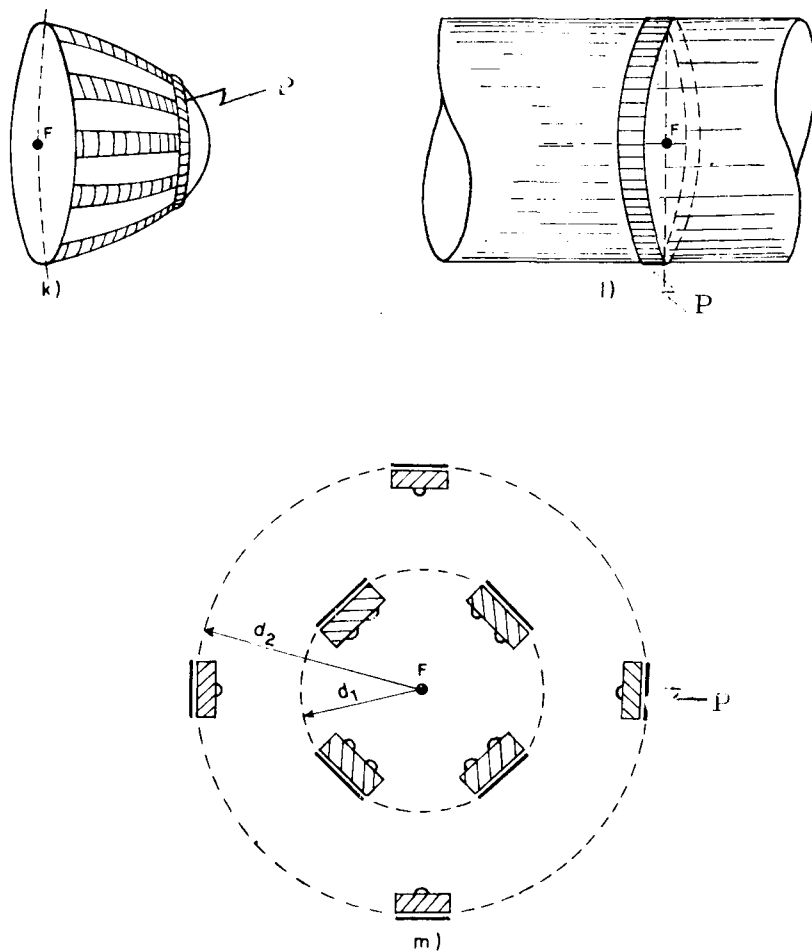


Fig. 26 Esquemas relativos a la geometría de irradiación para diversos tipos de piezas o instalaciones. F: Fuente radiactiva; P y P' placas o filmes

IRRADIACIONES PANORAMICAS



ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO O PRETENSADO

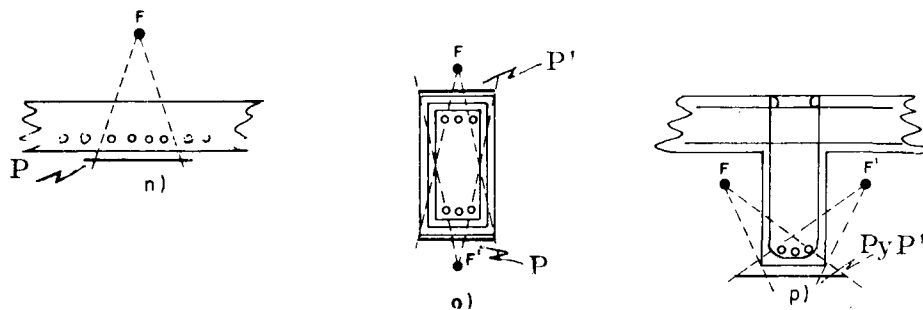


Fig.26 bis Esquemas relativos a la geometría de irradiación para diversos tipos de piezas o instalaciones. F: Fuente radiactiva; P y P': Placas o filmes

6.0.0 PANTALLAS INTENSIFICADORAS DE IMAGEN

Colocando pantallas metálicas o salinas (WO_4Ca) de pequeño espesor, sobre ambas caras de la película o filme, determinase una reducción sustancial del tiempo de irradiación o exposición necesaria para obtener una determinada densidad óptica; también se modifica la calidad de la imagen latente y visible.

Las alteraciones mencionadas y los tiempos de exposición son función de la naturaleza, espesor de las pantallas y posición relativa o contacto efectivo entre las pantallas y película. En la figura 27 a) y 27 b) está representada la posición más común de las pantallas intensificadoras respecto de la película. Las figuras 27 c) y d) corresponden a posiciones recomendadas en caso de objetos o piezas con espesores bien diferenciados en los que puede ser conveniente colocar dos películas, una lenta y otra rápida, para lograr así una calidad de imagen más uniforme a pesar de los fuertes cambios de espesores; en la película rápida se observarán preferentemente los detalles de los sectores de mayor espesor y en la lenta los de menor espesor.

Las pantallas intensificadoras, conjuntamente con la placa o placas son colocadas en sobres o "porta-placas" de plásticos o aluminio para evitar la acción de la luz solar o artificial. Sirven además estos sobres, para impedir el deterioro del conjunto durante la manipulación y etapas previas al revelado.

Es aconsejable montar las pantallas de plomo sobre una base liviana, preferentemente cartulina de aproximadamente 100 g/m^2 . Esta cartulina debe tener un espesor o gramaje constante para evitar que cualquier falla o falta de homogeneidad perjudique la calidad de la placa radiográfica.

Las pantallas metálicas de plomo laminado o excepcionalmente otro metal pesado (oro, plata, etc.), son recomendables para la mayoría de los radioisótopos usados en gammagrafía. Con algunos emisores de baja energía, como por ejemplo, el ^{170}Tm o el ^{192}Ir pueden usarse pantallas de WO_4Ca , similares a las empleadas con rayos X.

6.1.0 MECANISMOS Y FUNDAMENTOS DE LA INTENSIFICACION

Se define como factor de intensificación F del conjunto de pantallas, o bien de cada una de las pantallas por separado (anterior y/o posterior), a la relación:

$$F = \frac{t_0}{t_1}$$

t_0 , tiempo de exposición sin pantalla para lograr una determinada densidad;
 t_1 , tiempo de exposición con una o más pantallas para lograr la misma densidad.

Este factor F es función de:

- la fuente radiactiva empleada;
- la naturaleza y espesor de las pantallas;
- la naturaleza y espesor del material a inspeccionar;
- tipo de película y procesado posterior;
- campo de perturbación anterior y posterior (principalmente porta-placa y soportes o bases de pantallas).

La radiación γ primaria por interacción con los electrones de la pantalla, produce los electrones secundarios (efecto fotoeléctrico y efecto Compton), los que a su vez, cederán toda su energía a la emulsión fotográfica de la película. En ausencia de esas pantallas, la mayoría de los fotones primarios atravesarán la película sin interactuar con la emulsión, necesiéndose tiempos de exposición tres o cuatro veces mayores para obtener el mismo efecto que si se utilizaran dichas pantallas.

La acción de la radiación γ o X sobre la placa es prácticamente nula; los electrones producidos por efecto fotoeléctrico o Compton son los que contribuyen en mayor proporción a formar la imagen latente. La radiación γ o X directa contribuyen sólo en el 1% aproximadamente en el caso del ^{60}Co . Con emisores gamma de menor energía la participación es mayor, pero siempre de poca importancia respecto al fenómeno global. (21) (25)

La probabilidad de que se produzca el efecto fotoeléctrico es mayor cuanto menor es la energía del fotón incidente. El efecto Compton, en cambio, predomina con energías mayores. Para una energía de 0,1 MeV la probabilidad de que se produzcan los efectos Compton y fotoeléctrico es la misma. Para 0,6 MeV, en cambio, la posibilidad es 6 veces mayor para el efecto Compton.

Los electrones con componentes de velocidad hacia la película, formados y transmitidos por la pantalla anterior, y los electrones retrodispersados por la pantalla posterior, son los que participan preponderantemente en la formación de la imagen. Sin embargo, además de los electrones mencionados, llegan a interactuar con las placas los electrones que, habiéndose formado por idénticos mecanismos, proceden del material que se inspecciona, porta-placa (200 a 300 g/m² de material), soportes y otros medios u objetos perturbadores anteriores y posteriores a la placa.

La definición de electrones perturbadores o intensificadores no tiene aquí un carácter absoluto, ya que, por ejemplo, no todos los electrones formados en el "medio perturbador" son negativos en cuanto a su participación respecto a la calidad de la imagen; podríamos agregar que una fracción de electrones formados en las pantallas contribuyen e intensifican la imagen, pero también reducen la definición de ésta.

Cuando el número de electrones creados y transmitidos por las pantallas intensificadoras es superior al número de electrones creados y transmitidos por objetos y medios perturbadores decimos que las pantallas tienen poder intensificador: $f > 1$. En caso contrario, las pantallas sirven como "filtros": $f < 1$.

La figura 28 contribuye a valorar mejor el balance de los electrones intensificadores y perturbadores. El caso a) corresponde a $f > 1$, mientras que en b) la pantalla sirve de filtro.

Con simples experiencias de laboratorio, G. Courtois (21) demuestra que el factor f para el ^{60}Co es inferior a la unidad para todo espesor de acero menor que 17 mm; recién a partir de éste espesor, f supera la unidad. Respecto al ^{137}Cs y al ^{192}Ir , el factor es superior siempre a la unidad. Las experiencias fueron realizadas con pantallas anteriores solamente.

En la Fig. 29 está representado el factor f para ^{60}Co y espesores variables de acero. Para el ^{192}Ir y el ^{137}Cs hemos indicado en la tabla VI la influencia del espesor de la pieza a radiografiar respecto al factor de intensificación.

El factor antes mencionado está vinculado también al tipo de película, ya que la pantalla anterior intensifica más la radiación dispersa que la directa; la película de menor granulometría será por consiguiente, más efectiva.

Las pantallas intensificadoras cumplen, pues, las siguientes funciones:

- Generar electrones por efecto fotoeléctrico o Compton para impresionar convenientemente la emulsión sensible y acortar sustancialmente el tiempo de irradiación (pantallas metálicas), o generar radiación secundaria luminosa, con el mismo fin (pantallas fluorescentes).
- Absorber o "filtrar" la radiación secundaria dispersa originada en el "campo perturbador" anterior y posterior a la placa.

La intensificación de la pantalla anterior es poco efectiva en el caso del ^{60}Co como ya hemos visto. En cambio, la intensificación de esa pantalla crece cuando la energía del radioisótopo disminuye (^{137}Cs , ^{192}Ir , etc.).

La pantalla posterior, en cambio, tiene un factor de intensificación prácticamente independiente de la energía de los electrones generados o transmitidos por la misma. Este factor depende particularmente de la naturaleza de la pantalla y crece con el número atómico del elemento, Z ; como puede apreciarse, en el caso del plomo (Fig. 30) el 80% de los electrones que llegan o se forman en la pantalla posterior retornan a la placa. En cuanto a los materiales como el aluminio o plástico (utilizados para construir los "porta-placa") tienen un factor de retrodispersión mucho menor, tal como se indica en la figura citada. Lo expresado permite afirmar que la pantalla posterior siempre tiene poder intensificador.

El compromiso que surge entre la necesidad de intensificar (reducir tiempo de exposición) y "filtrar" la radiación secundaria generada en el campo de perturbación anterior y posterior (mejorar, en suma, el contraste y la definición) no permite definir con precisión el espesor óptimo del conjunto de pantalla. Este compromiso está agravado por las dificultades operativas y de manipulación que tienen las pantallas de muy bajo espesor.

La Tabla VII representa el factor de intensificación f para distintos espesores de pantallas de plomo.

En la práctica corrientemente se acepta usar los siguientes conjuntos para los radioisótopos más empleados:

Alta o mediana energía : 0,10/0,20 mm (Co-60, Cs-137, etc.).

Baja energía : 0,05/0,10 mm (Ir-192, Tm-170).

En este capítulo nos hemos referido particularmente a las pantallas intensificadoras de plomo que son las pantallas que corrientemente se emplean en gammagrafía. El mecanismo de excitación de las pantallas fluorescentes, aptas para ser usadas con ^{170}Tm u otros radioisótopos de baja energía puede ser consultado en el capítulo de ésta serie, que se refiere a "Transformación de la energía isotópica".

T A B L A VI

RELACION ENTRE EL ESPESOR DE HIERRO Y EL FACTOR DE
INTENSIFICACION(f) PARA $^{192}_{Ir}$ Y $^{137}_{Cs}$

ESPESOR DE Fe	f	
	$^{137}_{Cs}$	$^{192}_{Ir}$
mm		
1-5	2,25	3,1
10	2,4	3,0
15	2,5	3,0
20	2,7	2,7
25	2,7	2,7
30	2,8	2,5
40	2,9	2,5
50	3,0	2,5

NOTA: Estos factores están referidos a películas de mediana velocidad y pantallas de plomo (0,1 mm/0,2 mm).

T A B L A VII

FACTOR DE INTENSIFICACION PARA $^{170}_{Tm}$ Y $^{155}_{Eu}$
DISTINTOS TIPOS DE PANTALLAS DE PLOMO

ESPESOR DE LA PANTALLA		FACTOR DE INTENSIFICACION t
anterior	posterior	
mm	mm	
0	0	1
0,02	0,02	2,02
0,02	0,05	2,00
0,02	0,10	2,00
0,05	0,05	1,75
0,05	0,10	1,75
0,20	0,10	1,15
0,20	0,20	1,15

NOTA: Estos valores han sido obtenidos con película "Roentgen X".

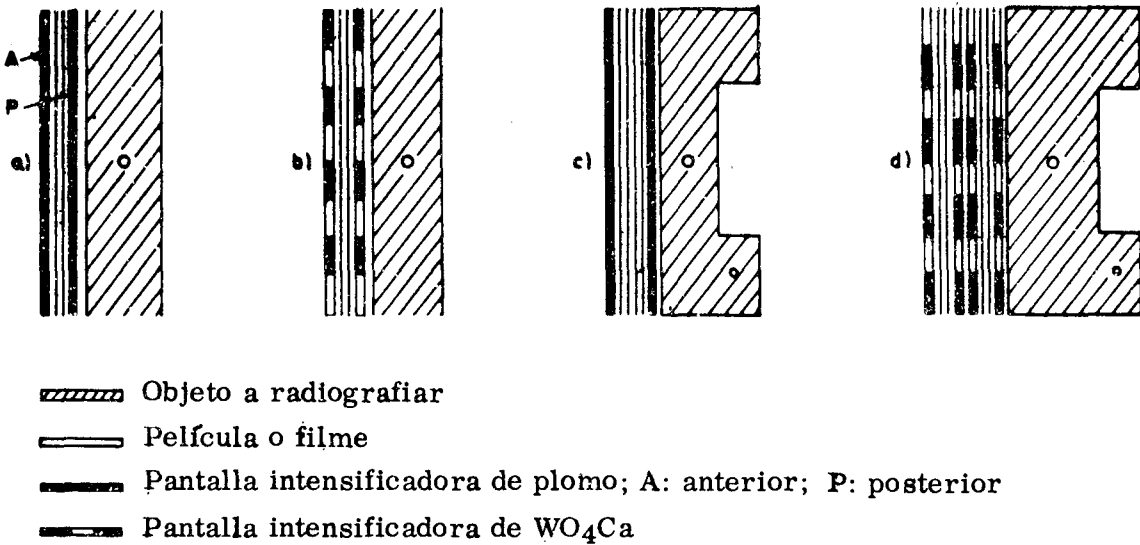


Fig. 27 Posibles posiciones relativas de pantallas intensificadoras y películas.

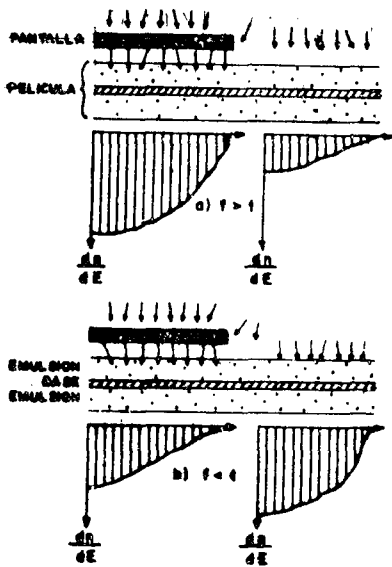


Fig. 28 Espectros de los electrones formados y transmitidos por pantallas y "medio perturbador"

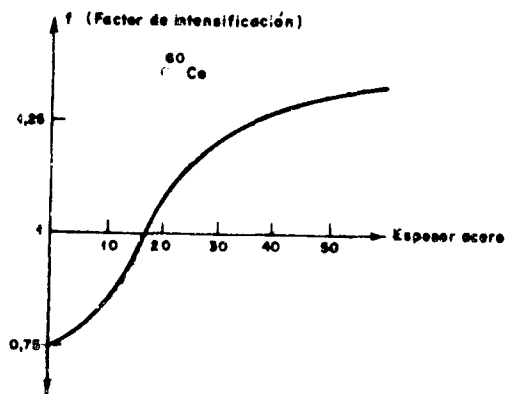


Fig. 29 Influencia del espesor de la pieza a radiografiar sobre el factor de intensificación

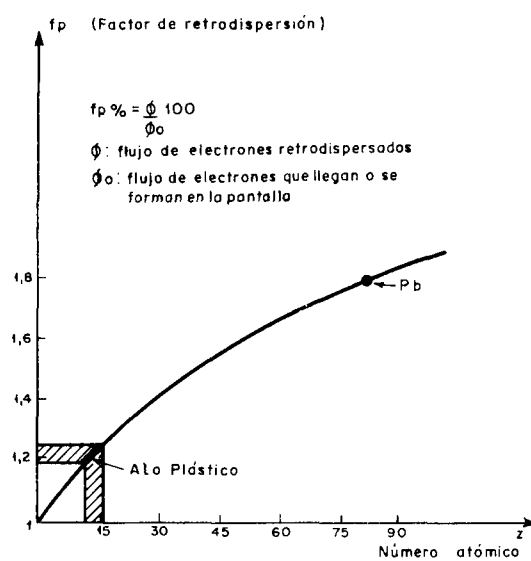


Fig. 30 Factor de retrodispersión f_p en función del número atómico

7.0.0 INDICADORES DE CALIDAD DE IMAGEN

En toda placa de radiografía o gammagrafía industrial debe ser observable una imagen que permita apreciar el grado de sensibilidad o calidad de imagen alcanzado, para tener así un límite (al menos aproximado) de las dimensiones mínimas de los defectos con probabilidad de ser detectados en las condiciones reales de irradiación.

Colocando sobre-espesores encima del material a inspeccionar es posible visualizar en la placa, después de la irradiación y proceso de laboratorio posterior, la imagen de los mismos, debido a la diferencia de densidad óptica por ellos provocada.

Con este fin se emplean pequeños dispositivos denominados Indicadores de calidad de imagen ("penetrómetros") para valorar así cuantitativamente y en forma práctica, la magnitud aproximada de los defectos mínimos detectables. La imagen de los indicadores es identificable y medible ya que la variación de densidad óptica es función del sobre-espesor, entre otros parámetros, como ya ha sido explicado.

Los indicadores están contruidos con una aleación similar a la de las piezas a inspeccionar; tienen formas, dimensiones y otras características reglamentadas por las distintas normas vigentes: AFNOR, ASTM, DIN, BWRA, etc. El Instituto Argentino de Racionalización de materiales (IRAM) estudia actualmente este problema e impondrá normas a corto plazo, respecto a este importante aspecto del control no destructivo. (26) (27) (28)

La fig. 32 representa algunos de los indicadores ya mencionados y en la tabla VIII se exponen algunas de las características de los mismos.

Si bien existen diversidad de criterios sobre el uso de los indicadores (y sobre las ventajas e inconvenientes de los mismos) es preciso recordar algunas reglas elementales que, aunque no estén contempladas en todas las normas, deben ser observadas para lograr un racional uso de esta técnica de inspección y análisis no destructivo:

- En toda radiografía o gammagrafía industrial ha de observarse la imagen de, por lo menos, un indicador o "penetrómetro". Cuando se trata de placas obtenidas con irradiaciones panorámicas, en espesores constantes (por ejemplo: cordones de soldadura circulares en depósitos cilíndricos o esféricos, calotas, etc.) se colocará un indicador por cuadrante o bien la cantidad y distribución de indicadores previstos por las normas respectivas.

- El indicador debe colocarse siempre en la cara de la pieza o material por el que penetran las radiaciones (cara anterior), es decir, la cara más alejada de la placa. Sólo en casos excepcionales puede colocarse el indicador en la cara adyacente a la placa (cara posterior), debiendo, en estos casos, dejarse expresa constancia de esta alteración y de las razones que la motivaron o justifiquen.

- Es aconsejable y prudente colocar el indicador en la zona crítica de la placa o sector comprendido dentro de la zona útil, en el que es previsible la más baja sensibilidad de detección; generalmente los extremos de la placa.

La sensibilidad real de detección de los defectos es, seguramente, un valor intermedio al obtenido analizando la imagen del indicador colocado en la cara anterior y la imagen del indicador colocado en la cara posterior. Sin embargo para obtener mayores índices de seguridad es necesario y conveniente ubicarse en el caso más desfavorable y colocar siempre el indicador en la cara externa mientras no medie una indicación contraria.

- Los indicadores de calidad de imagen deben estar aprobados por el organismo normalizador respectivo si las normas así lo establecen (DIN). En algunos casos pueden ser contruidos por los interesados siguiendo los lineamientos establecidos por las normas vigentes (ASTM).

- Cuando se efectúan trabajos de gammagrafía sin seguir una determinada norma es habitual colocar indicadores de espesor igual al 2% de la pieza o soldadura en estudio (ASTM). Si se usan indicadores tipo gradilla (AFNOR) o de hilos metálicos (DIN) uno de los valores intermedios de la gradilla o alambre suele ser igual al 2% de la pieza en estudio.

El porcentaje mencionado es de uso frecuente. El porcentaje de sensibilidad de detección a alcanzar, en realidad, ha de ser compatible con el sobrediseño estructural de la pieza y/o grado de seguridad buscado. Los límites tolerados han de contemplar las dimensiones máximas de los defectos y la densidad superficial o lineal de los mismos.

7.1.0 SENSIBILIDAD DE DETECCION PRACTICA

Se denomina sensibilidad de detección práctica (o sensibilidad respecto a los indicadores) en gammagrafía o radiografía industrial a la relación siguiente:

$$s (\%) = \frac{\Delta x \cdot 100}{x}$$

s , sensibilidad de detección práctica (%)

Δx , mínimo espesor, gradilla o alambre visible (mm)

x , espesor de la pieza, soldadura, etc. (mm).

Este concepto de sensibilidad práctica, alejado quizá de la rigurosidad con que debe tratarse el tema, resulta imprescindible cuando deben inspeccionarse placas en trabajos rutinarios.

Lamentablemente no pueden establecerse lazos entre esta sensibilidad y otros conceptos de sensibilidad teórica ya expuestos.

En cierta forma la sensibilidad práctica de detección debe asociarse más a la calidad relativa de la imagen obtenida (contraste y definición) que a las dimensiones mínimas de las fallas visibles. Un ejemplo puede quizá aclarar mejor estas indeterminaciones; Si es observable nítidamente en una placa la imagen de un indicador de 1 mm de espesor (2%) colocado como referencia al inspeccionar una pieza de 50 mm; Todas las cavidades o fisuras iguales o superiores a 1 mm serán visibles? La respuesta es dubitativa; cuando la cavidad o fisura tenga 1 mm de espesor en el sentido perpendicular a la placa o paralela a la dirección de la radiación primaria incidente posiblemente no pueda detectarse o visualizarse su imagen. En cambio sería observable toda fisura o cavidad igual o mayor que 1 mm siempre que esta dimensión corresponda al plano perpendicular a la radiación primaria y paralela al plano que contiene al indicador de calidad de imagen.

La sensibilidad real obtenida con una radiografía o gammagrafía industrial está vinculada a múltiples parámetros que no pueden ser tratados en conjunto. Ellos son:

- La técnica de irradiación (posición relativa fuente-objeto-película, materiales interpuestos en el área de perturbación, etc.)
- Fuente radiactiva (espectro de energías, forma, dimensiones, etc.)
- Tipo de película (dimensiones de los cristales, densidad, etc.)
- Tratamiento posterior (tiempo de revelado, drogas, etc.)
- Pantallas intensificadoras (naturaleza, contacto pantalla-película, etc.)
- Objeto (densidad, espesores, posición de la falla en la pieza, etc.)

Una sencilla experiencia de laboratorio cuyos resultados son expuestos en la Fig. 31, permite verificar la importancia que tiene la posición relativa del indicador de calidad de imagen respecto a la placa y objeto a inspeccionar. Han sido tomadas seis gammagrafías de tres planchas de 10 mm, 14 mm y 20 mm; en las tres primeras se colocó el indicador en la cara anterior de la pieza mientras que en las tres restantes el indicador fue colocado entre la placa y la cara posterior de la pieza. La figura 31 permite apreciar "la alta sensibilidad de detección" lograda con el indicador colocado en la posición mencionada en última instancia. Todas las otras variables susceptibles de alterar y no permitir la correcta comparación de estas seis gammagrafías fueron mantenidas constantes.

Hemos expuesto este ejemplo para evitar que el indicador de calidad de imagen se coloque entre el porta placas y el objeto a inspeccionar, salvo en aquellos casos que, por razones constructivas u operativas resulte imposible colocarlo en la cara anterior del objeto a controlar.

7.2.0 DISTINTOS TIPOS DE INDICADORES DE CALIDAD DE IMAGEN

a) INDICADORES AFNOR (FRANCIA)

La Fig. 32 a) muestra un indicador AFNOR, modelo Brachet del tipo mixto, gradilla y orificio.

El diámetro de los orificios es igual al espesor de la grada respectiva. Diámetro y espesor, por otra parte, varían en progresión geométrica de razón $\sqrt[10]{10}$ (Serie de Renard).

En estas normas la calidad obtenida está representada por un número, denominado índice de visibilidad, que puede ser positivo, nulo o negativo de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$N = a - b$$

N, índice de visibilidad

a, número de orificios efectivamente visibles

b, número de orificios que serían vistos si el último orificio visible tuviese un diámetro igual al 5% del espesor de la pieza en ensayo.

b) INDICADORES ASTM (USA)

Estos indicadores son para nosotros los más conocidos debido a que su uso se ha difundido mucho en la industria naval y metalúrgica pesada. En la Fig. 32 b) se ha representado un indicador ASTM similar a los aconsejados por las normas en vigencia.

Estos indicadores son fáciles de construir y no deben ser, necesariamente, aprobados por el organismo normalizador.

El diámetro de los orificios es un múltiplo entero del espesor de la plaqueta. Generalmente se coloca por lo menos una plaqueta equivalente al 2% del espesor a controlar. Con el objeto de indentificar el espesor de cada plaqueta, sobre las mismas están colocados números, contruados de plomo.

c) INDICADORES DIN (ALEMANIA)

Cada indicador está constituído por siete alambres o hilos metálicos montados sobre un soporte de plástico o goma (Fig. 32 c). El diámetro de los alambres crece en progresión aritmética (ver tabla VIII).

Existen tres indicadores para aleaciones de Fe, tres para aleaciones de Cu y otros tantos para aleaciones de Al. La calidad de la imagen se establece en base al número de alambres visibles: clase I y clase II (tabla VIII).

Además de los alambres, con letras de plomo figuran escritas las siguientes siglas para identificar cada indicador: DIN-ISO, año de reglamentación (1962) y el material del que están contruidos los alambres (Fe, Cu o Al). La relación numérica visible en la Fig. 32 c) corresponde al número asignado al primero y al último de los alambres del indicador.

d) OTROS INDICADORES DE CALIDAD DE IMAGEN

Hemos representado también en la Fig. 32 d) el indicador propuesto por las normas BWRA (Inglaterra) el que también es de tipo mixto.

PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE LOS INDICADORES DE CALIDAD

DIN

Norma: 54-109 - Marz 1962

INDICADORES DE CALIDAD E IMAGEN PARA:			A L A M B R E NUMERO Y ESPESOR (mm)						
Fe	Cu	Al	Nº mm	Nº mm	Nº mm	Nº mm	Nº mm	Nº mm	Nº mm
DIN FE 1/7	DIN CU 1/2	DIN AL 1/7	1 3,2	2 2,5	3 2,00	4 1,60	5 1,25	6 1,00	7 0,800
DIN FE 6/92	DIN CU 6/2	DIN AL 6/2	6 1,0	7 0,80	8 0,630	9 0,500	10 0,400	11 0,320	12 0,250
DIN FE 10/16	DIN CU 10/6	DIN AL 10/6	10 0,40	11 0,320	12 0,250	13 0,200	14 0,160	15 0,125	16 0,100

REFERENCIAS RESPECTO AL USO

ESPESOR DEL MATERIAL		CALIDAD DE IMAGEN I (debe ser visible hasta el alambre Nº)	CALIDAD DE IMAGEN I (debe ser visible hasta el alambre Nº)
mayor que mm	igual o menor que mm		
0	6	16	19
6	8	15	13
8	10	14	12
10	16	13	11
16	25	12	10
25	32	11	9
32	40	10	8
40	50	9	-
50	80	8	-
80	200	7	-
40	60	-	7
60	80	-	6
80	150	-	5
150	170	-	4
170	180	-	3
180	190	-	2
190	200	-	1

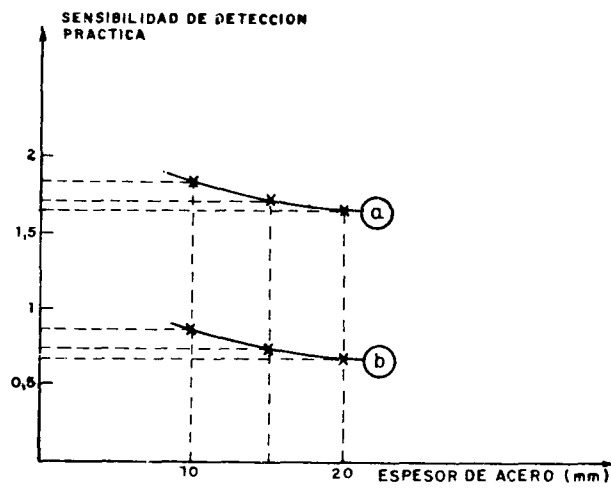
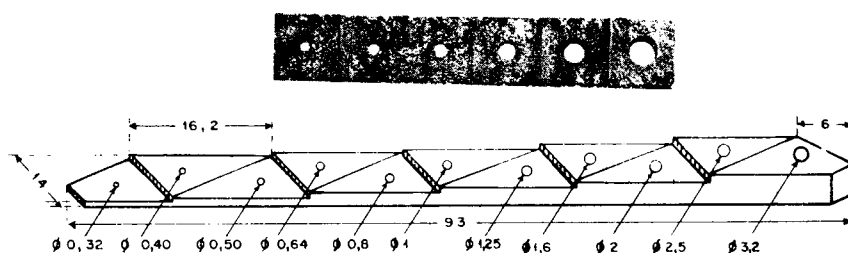
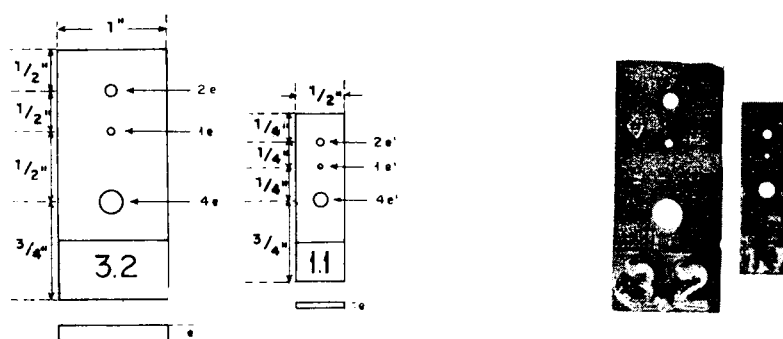


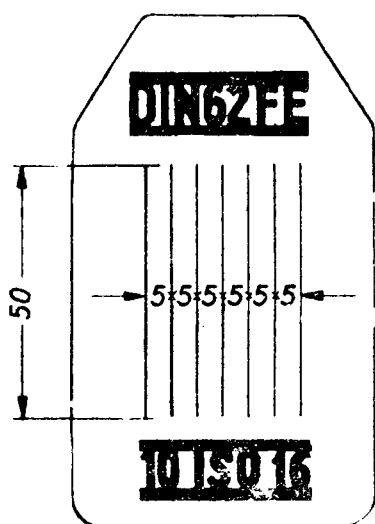
Fig. 31 Sensibilidad de detección práctica para dos posiciones del indicador de calidad
a) penetrómetro en la cara anterior.
b) penetrómetro en la cara posterior.



a) Indicador de calidad de imagen AFNOR (Francia)



b) Indicador de calidad de imagen ASTM-ASME (EE.UU)



c) Indicador de calidad de imagen
DIN (Alemania)



d) Indicador de calidad de imagen
BWRA (Inglaterra)

Fig 32 Indicadores de calidad de imagen

8.0.0 SENSIBILIDAD EN GAMMAGRAFIA

En los capítulos precedentes hemos expuesto algunos aspectos parciales referentes a los factores que intervienen en la sensibilidad de detección de defectos. En virtud de las múltiples variables y de la interdependencia entre las mismas, es quizás utópico pretender hacer un estudio global analítico de este tema. (29) (30)

La percepción de una imagen en la placa depende del contraste y de la definición lograda. Ambas características están a su vez afectadas por las siguientes variables:

. Contraste objeto

- naturaleza y espesores del objeto a inspeccionar (Cap. 8.0.0);
- espectro de energías de la fuente radiactiva (Cap. 8.0.0);
- radiación dispersa (Cap. 6.0.0).

. Contraste película

- tipo de película (Cap. 4.0.0);
- tiempo y temperatura de revelado (Cap. 4.0.0);
- agitación, fijado, etc. (Cap. 5.0.0);
- densidad óptica (Cap. 4.0.0)

. Definición. Factores geométricos

- tipo de película (Cap. 4.0.0)
- naturaleza y espesor de la pantalla (Cap. 6.0.0)
- espectro de energías del radioisótopo (Cap. 8.0.0)
- revelado y fijado (Cap. 4.0.0)

8.1.0 INFLUENCIA DE LA ENERGIA DE LA RADIACION Y DE LA NATURALEZA Y ESPESOR DEL MATERIAL A INSPECCIONAR RESPECTO A LA SENSIBILIDAD DE DETECCION DE DEFECTOS

Un fotón gamma que atraviesa un espesor dx de material tiene una probabilidad μ (por unidad de longitud o masa superficial) de ser absorbido o dispersado. Esta probabilidad μ , denominado coeficiente de atenuación (lineal o másico) está dada por la suma de los tres coeficientes de atenuación: fotoeléctrico, Compton y formación de pares, ya vistos en el capítulo 2.0.0. La intensidad de radiación que llega a la placa está dada por:

$$I_1 = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{erg/cm}^2 \text{ s}) \quad (1)$$

$$I_2 = I_0 e^{-\mu (x-\Delta x) + \mu_1 \Delta x} \quad (\text{erg/cm}^2 \text{ s}) \quad (2)$$

La expresión (2) corresponde a la intensidad de radiación que llega a la placa en el sector cubierto por el defecto, mientras que la (1) está referida a toda el área adyacente cuando la pieza inspeccionada tiene espesor uniforme.

Si llamamos γ a la característica sensitométrica de la placa (Fig. 33)

$$\gamma = \text{tg } \alpha = \frac{D_2 - D_1}{\log I_2 - \log I_1} = \frac{\Delta D}{\log \frac{I_2}{I_1}} \quad \therefore \quad \Delta D = \gamma \log \frac{I_2}{I_1} \quad (3)$$

Reemplazando (1) y (2) en (3)

$$\Delta D = \gamma \log \frac{e^{-\mu(x-\Delta x) + \mu_1 \Delta x}}{e^{-\mu x}}$$

$$\Delta D = \gamma 0,43 \ln e^{[\Delta x (\mu - \mu_1)]} \quad \therefore \quad \Delta D = \gamma 0,43 \ln e^{[\Delta x (\mu - \mu_1)]}$$

$$\Delta D = \gamma 0,43 \Delta x (\mu - \mu_1) \quad (4)$$

La discontinuidad o defecto Δx estará, luego, dada por:

$$\Delta x = \frac{\Delta D}{0,43 \gamma (\mu - \mu_1)}$$

Los coeficientes de atenuación μ y μ_1 están expuestos en la tabla II. El valor de μ_1 es aproximadamente igual a 0 para todas las inclusiones gaseosas.

La mayoría de las inclusiones no gaseosas están compuestas por óxidos, en cuyo caso el μ_1 es inferior al μ del material de base.

La fórmula (4) para inclusiones gaseosas quedaría, luego, reducida a:

$$\Delta x = \frac{\Delta D}{0,43 \gamma \mu} \quad (5)$$

La sensibilidad de detección de defectos S , quedaría luego expresada por la siguiente relación:

$$S = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 (\%) \quad (6)$$

Reemplazando (4) en (6) y (5) en (6)

$$S = \frac{\Delta D}{0,43 \gamma (\mu - \mu_1) x} \cdot 100 (\%) ; \quad S = \frac{\Delta D}{\gamma \mu x 0,43} \cdot 100 (\%) \quad (7)$$

En el rango de energías comprendido entre $0,1 \text{ MeV} < E < 2 \text{ MeV}$, (Tabla II) el coeficiente μ , que depende de la energía, aumenta a medida que ésta última disminuye. Las fórmulas (4) y (5) permiten luego afirmar que:

- los defectos pequeños serán más fáciles de detectar con bajas energías (^{197}Ir , ^{170}Tm , rayos X de 60 a 150 KVP, etc.) La sensibilidad de detección S , para un amplio rango de espesores y materiales aumenta (menor S) cuando la energía de los fotones primarios disminuye.
- las inclusiones serán más fácilmente detectadas si la diferencia $(\mu - \mu_1)$ es acentuada (disparidad de densidades).
- si la película tiene alto contraste (γ elevado), como es obvio, la sensibilidad de detección aumenta.
- el aumento de energía provoca un aumento de los espesores radiografiados (Amplitud o "latitud"). Este principio puede demostrarse sacando dos radiografías. Una con ^{192}Ir y otra con ^{60}Co , de una pieza con varios escalones (espesores): Con ^{60}Co se podrán identificar más escalones.

Estas conclusiones, obtenidas del análisis de las fórmulas (4) y (5), no tienen en cuenta:

- ni la definición (penumbra) que es particularmente importante con los defectos pequeños.
- ni la radiación dispersa.

El incremento o resalto mínimo $(\Delta D)_0$, capaz de ser visualizado y localizado por el ojo humano, está comprendido entre:

$$0,01 < (\Delta D)_0 < 0,1$$

Estos valores dependen, como es obvio, de las condiciones de observación, del negatoscopio utilizado y de la capacidad visual de la persona encargada de la interpretación de la placa.

Prescindiendo de las características de la placa radiográfica podemos determinar cual es la energía que permitiría alcanzar la mayor sensibilidad S en la inspec

ción de un determinado material y de allí seleccionar el radioisótopo (o equipo de rayos X) que mejor se adapta a la resolución del problema planteado. Derivando la conocida expresión exponencial $I_x = I_0 e^{-\mu x}$:

$$S = \frac{d I_x}{dx} = -\mu I_x = -\mu I_0 e^{-\mu x} \quad (8)$$

Para encontrar el valor de μ , para el cual la sensibilidad es máxima, basta con derivar la fórmula (8) con respecto a μ e igualar a 0

$$\frac{d S}{d \mu} = \mu \times I_0 e^{-\mu x} - I_0 e^{-\mu x} = I_0 \cdot e^{-\mu x} (\mu x - 1)$$

$$\mu x = 1 \quad \therefore \quad \mu = \frac{1}{x}$$

Por lo tanto, la máxima sensibilidad de detección se obtiene cuando el coeficiente de atenuación lineal es igual a la inversa del espesor.

Para un espesor de Fe de 1 cm el coeficiente de atenuación lineal más conveniente sería: $\mu = 1 \text{ cm}^{-1}$

Si queremos hallar la energía de los fotones X o γ que satisfacen esta condición acudimos a la tabla II. En ella los coeficientes de atenuación están expresados en cm^2/g (másicos); debemos pues hacer la conversión respectiva recordando que la densidad del Fe es igual a $7,8 \text{ g/cm}^3$:

$$\frac{1}{7,8} \frac{\text{cm}^{-1}}{\text{g/cm}^3} = 0,13 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \quad \therefore \quad \mu \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) = 0,13$$

En la columna referente al Fe, de la tabla II podemos obtener la energía más conveniente para el ejemplo planteado, la que en este caso esta comprendida entre 0,20 MeV y 0,30 MeV.

8.2.0 INFLUENCIA DE LA RADIACION DISPERSA Y DE LA INDEFINICION O PENUMBRA EN EL CALCULO DE SENSIBILIDAD

Para tener en cuenta los rayos γ secundarios que llegan a la placa se introduce en las expresiones exponenciales referidas a la atenuación de la radiación, un factor numérico b, denominado factor de multiplicación (build up factor):

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

Todas las fórmulas deducidas a partir de esta última, quedan, pues, afectadas por este factor.

El factor de multiplicación depende de:

- el absorbente o material a inspeccionar;
- la energía de los rayos γ primarios;
- la longitud de relajación: $u \cdot x$;
- la geometría del sistema.

Algunos autores proponen para el cálculo de sensibilidad la siguiente fórmula, en la que está contemplada la radiación dispersa:

$$S = \frac{2,3 (\Delta D)_0 F 10^{cx}}{\mu_1 \gamma x} \cdot 100 \quad (12)$$

S (%) ; sensibilidad;

$(\Delta D)_0$, límite de percepción; $0,01 < (\Delta D)_0 < 0,1$

γ , factor película (no tiene en cuenta la definición; depende además de la densidad D)

F , constante que depende del material y de la energía del radioisótopo.

$F = 1,3$ para ^{60}Co y Fe ; $F = 1,2$ para ^{192}Ir y Fe ; $F = 0,84$ para ^{170}Tm y Fe

c , constante que depende del material y de la energía del radioisótopo.

$c = 0,095$ para ^{60}Co y Fe ; $c = 0,006$ para ^{192}Ir y Fe ; $c = 0,006$ para ^{170}Tm y Fe .

La curva de la Fig. 34 representa $S = f(x)$ para Fe y un determinado radioisótopo. El mínimo S corresponde a un $(\Delta D)_0$ óptimo y el aumento de S a partir de $S_{\min}$ se debe, precisamente, a la influencia de la radiación dispersa.

Respecto a la influencia de la indefinición o penumbra, debemos recordar que la misma es causada por factores geométricos (tamaño de la fuente, distancia fuente-placa, distancia defecto-placa), factores debidos al filme (tamaño de grano, espesor de la emulsión, etc.) y factores debidos a la radiación dispersa; teniendo en cuenta dichos factores, la fórmula (12) quedaría expresada así:

$$S (\%) = \frac{2,3 (\Delta D)_0}{\gamma u_1} \cdot \frac{F \cdot 10^{cx}}{x} \cdot 100 \cdot \sqrt[3]{U_{\text{geom.}}^3 \cdot U_{\text{film}}^3 \cdot U_{\text{R. disp.}}^3}$$

En esta expresión existen términos, como la penumbra debida al filme (U_{film}) y la penumbra debida a la radiación dispersa ($U_{\text{R. disp.}}$) difíciles de conocer. Solamente ($U_{\text{geom.}}$) puede ser calculado y reducido si es preciso, aumentando la distancia fuente-placa.

8.3.0 LIMITES DE DETECCION EN GAMMAGRAFIA

Numerosos laboratorios han realizado sistemáticas experiencias para determinar los límites experimentales para detectar defectos utilizando distintos radioisótopos y películas de baja, mediana y alta sensibilidad. El material de referencia es generalmente una aleación de hierro y la densidad óptica más indicada está comprendida entre 1,5 y 2,5. Entre estos límites se alcanza la máxima sensibilidad, como puede apreciarse en la Fig. 35.

Resulta importante comparar también la sensibilidad de detección práctica (sensibilidad determinada con indicadores de calidad de imagen) que se logra con los radioisótopos más usuales, en función del espesor de hierro inspeccionado: Fig. 36.

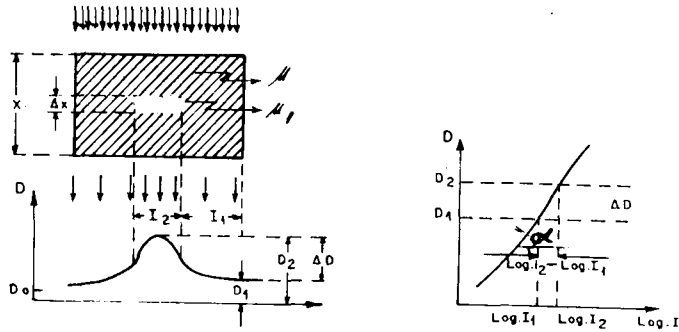


Fig. 33 Influencia de una falla sobre la densidad óptica.

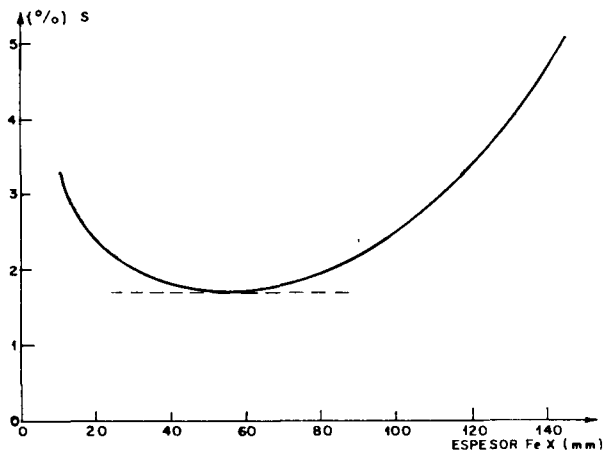


Fig. 34 Sensibilidad en función del espesor del material a inspeccionar .

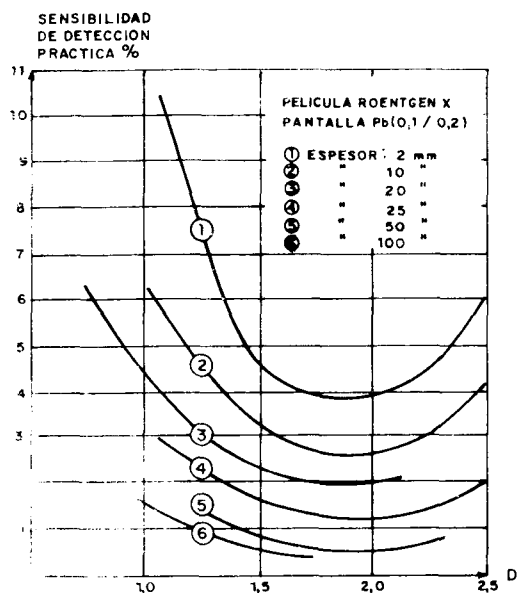


Fig.35 Curvas de sensibilidad práctica de detección en función de la densidad óptica para $^{153-154}\text{Eu}$

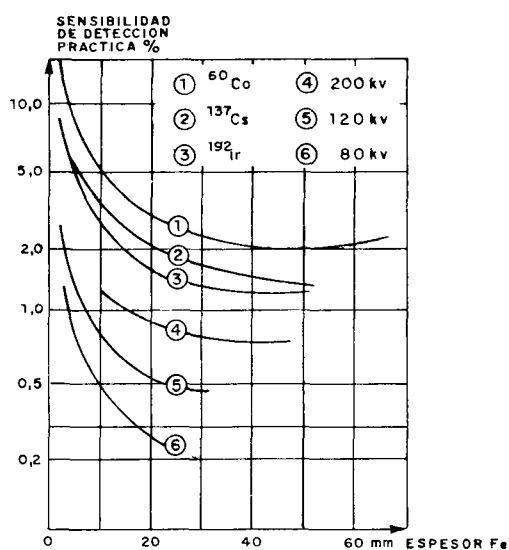


Fig.36 Curvas de sensibilidad práctica porcentual para distintos espesores de hierro

9.0.0 CALCULO DEL TIEMPO DE EXPOSICION

La densidad óptica de una película expuesta y procesada depende, entre otras variables, de la exposición recibida por la misma; esta exposición involucra, además de la intensidad de radiación que recibe la película, el tiempo que ella ha permanecido expuesta a la radiación. Cuando el tiempo de exposición es menor que el óptimo, algunos de los defectos de la pieza pueden no ser percibidos por el observador debido a la falta de contraste. En casos de sobre-exposición o tiempos de exposición superiores a los óptimos, la gran opacidad de la placa puede, a su vez, provocar idénticos inconvenientes; en este caso, sin embargo, interviene preponderantemente en el éxito de la localización, la intensidad luminosa del negatoscopio empleado para examinar la placa y las condiciones, medio y capacidad óptica del observador,

En gammagrafía es usual y conveniente calcular el tiempo de exposición para densidades comprendidas entre $1,5 < D < 2,2$. La mayoría de los estudios sistemáticos referentes a la perceptibilidad de defectos pequeños en función del tipo de película, espectro de energías, dimensiones de fuentes, espesores de materiales, etc., coinciden en aconsejar este rango de densidades. En casos especiales, sin embargo, puede ser necesario, siempre que se cuente con un negatoscopio adecuado, superar los límites mencionados y llegar a densidades cercanas a 3.

Según lo expresado en capítulos anteriores la exposición E es:

$$E_{\alpha} = \frac{At}{d^2} \quad ; \quad E_{\alpha} = E_0 \cdot e^{-\mu x}$$

A , actividad de la fuente;

t , tiempo de exposición;

d , Distancia fuente-placa;

μ , coeficiente de atenuación del material a inspeccionar;

x , espesor del material a inspeccionar;

E , exposición sobre la placa colocada detrás del material a inspeccionar;

E₀ , exposición sobre la cara anterior del material a inspeccionar.

Los términos involucrados en los segundos miembros de las dos relaciones anteriores son constantes cuando están fijadas las condiciones de trabajo y el operador sólo puede variar la distancia fuente-placa para reducir o aumentar el tiempo de exposición. La actividad de la fuente radiactiva es constante ya que, en la mayoría de los casos, el tiempo de exposición es muy reducido respecto al período de semidesintegración ($t \ll T_{1/2}$). En cuanto al coeficiente de atenuación, que depende de la energía de la radiación, naturaleza del material y espesor, se puede suponer aquí también constante.

Al tratar la "curva característica" de las películas usadas en radiografía industrial dimos ejemplos para calcular el tiempo de exposición. Sin embargo, resultan más

prácticos los ábacos suministrados por los fabricantes de películas, especialmente contruidos para calcular el tiempo de exposición para diversos radioisótopos. Como no existe uniformidad de criterios respecto a las variables que intervienen en los mis mos exponemos a partir de la Fig. 37 los ábacos y otras referencias técnicas respecto al cálculo del tiempo de exposición para las películas industriales usadas en nuestro medio.

9.1.0 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA FUENTE-PLACA

Una de las variables críticas en el cálculo de tiempos de exposición es la distancia fuente-placa. La calidad de la imagen en la placa procesada está íntimamente vinculada a esta variable ya que dicha imagen es la proyección del defecto u objeto so bre la placa quedando por consiguiente, supeditada la nitidez de la imagen a la distancia de proyección y al tamaño de la fuente radiactiva.

Sin embargo, en virtud de ser la exposición, en un punto, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente, el operador debe elegir una distancia fuente-placa considerando el compromiso calidad-coste unitario, ya que, reducidas distancias permiten obtener muchas placas en cortos lapsos pero la calidad de la imagen y sensibilidad alcanzada pueden ser inferiores a las exigidas por las normas respectivas.

En virtud de lo expresado haremos algunas consideraciones respecto a esta importante limitación.

Cuando las dimensiones útiles de la placa (alto o largo), son considerables res pecto a la distancia fuente-placa, las densidades ópticas en los extremos de la misma pueden ser muy reducidas respecto a la densidad óptica en el centro de la placa. La intensidad de radiación I_B que recibe el extremo B de la placa es inferior a la intensidad de radiación I_A en el centro por dos razones (Fig. 38)

a) La distancia $d_B > d_A$

De acuerdo a una ley antes enunciada:

$$\frac{d_B^2}{d_A^2} = \frac{I_A}{I_B} ; \quad \frac{d_B^2}{d_A^2} = \frac{I'_A}{I'_B} \quad (1)$$

b) El espesor que debe atravesar la radiación para llegar a la placa en B es mayor que el espesor en A: $x_B > x_A$

$$I_A = I'_A e^{-\mu x_A} ; \quad I_B = I'_B e^{-\mu x_B} \quad (2)$$

De la figura anterior se deduce que:

$$d_B = \frac{d_A}{\cos \varphi} , \quad x_B = \frac{x_A}{\cos \varphi} \quad (3)$$

Reemplazando (3) y (1) en (2) y dividiendo ambas igualdades

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{I_A}{I'_B} \frac{e^{-\mu x_A}}{e^{-\frac{\mu x_A}{\cos \varphi}}} = \frac{d_B^2}{d_A^2} e^{-\mu x_A - (-x_A/\cos \varphi)}$$

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{d_A^2}{d_A^2 \cos^2 \varphi} e^{\mu x_A (1/\cos \varphi - 1)} \quad (4)$$

Sin incurrir en un considerable error es admisible suponer que la densidad óptica es proporcional a la intensidad de radiación.

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{D_A}{D_B} \quad \therefore \quad D_B = D_A \frac{I_B}{I_A} \quad \therefore \quad \Delta D = D_A - D_B = D_A - D_A \frac{I_B}{I_A} \quad (5)$$

Reemplazando (4) en (5)

$$\Delta D = D_A \left(1 - \frac{I_B}{I_A} \right) = D_A \left[1 - \cos^2 \varphi \cdot e^{\mu x_A (1 - 1/\cos \varphi)} \right] \quad (6)$$

En casos extremos, cuando la altura o longitud de placa es considerable respecto a la distancia fuente-placa, debe ser prevista, en base a la fórmula (6), la diferencia de densidad entre el extremo y el centro de la placa.

En los capítulos 5.0.0 y 7.0.0 están expuestas otras consideraciones respecto a la distancia fuente-placa.

9.2.0 INFLUENCIA DE LA NATURALEZA DEL MATERIAL EN EL CALCULO DEL TIEMPO DE EXPOSICION

Todos los ábacos aquí expuestos han sido contruidos para calcular el tiempo de exposición cuando el material a inspeccionar es Fe ó aleaciones de Fe. Para aleaciones de densidad superior o inferior es preciso calcular previamente el espesor equivalente de Fe y entrar en los ábacos con ese valor. Tabla IX.

Para aleaciones de aluminio, cobrè, bronce, etc., el espesor equivalente a Fe puede calcularse, sin incurrir en errores incompatibles con la precisión del cálculo que dan los ábacos usados, a partir de la fórmula:

$$d_{\text{Fe}} (\text{equivalente}) = d \frac{\rho}{\rho_{\text{Fe}}} \quad (7)$$

d_{Fe} , espesor de Fe equivalente al espesor del material a inspeccionar (cm);

d , espesor del material a inspeccionar (cm);

ρ , peso específico del material a inspeccionar (gr/cm^3)

ρ_{Fe} , peso específico del Fe: $7,8 \text{ gr}/\text{cm}^3$.

La proporcionalidad entre densidades y espesores expuesta en la fórmula (7) se cumple para muchas aleaciones dentro de un amplio rango de espesores. En virtud de ser la intensidad de radiación que llega a la película, función del coeficiente de atenuación μ y este a su vez, dependiente de la naturaleza del material atravesado por la radiación, del espesor del mismo y de la energía, deben introducirse correcciones cuando el material es muy pesado (Pb) y la energía del radioisótopo muy reducida (^{170}Tm , ^{192}Ir).

En la tabla IX están expuestos los factores de equivalencia por los cuales es necesario multiplicar el espesor del material o aleación a inspeccionar para obtener el espesor equivalente de Fe.

No ha sido tenido en cuenta en la misma el concreto, hormigón armado o pretensado; sin embargo se incluyen ábacos (Fig. 37) aptos para calcular directamente el tiempo de exposición en función del espesor de la viga, columna o losa.

9.3.0 EJEMPLOS DE CALCULO DE TIEMPO DE REFERENCIA

9.3.1 Calcular el tiempo de exposición necesario para obtener una densidad óptica con una película tipo "AA" (Fig. 37 a.)

La pieza de hierro a inspeccionar tiene 10 mm de espesor y la distancia adoptada fuente-placa es de 1,20 m mientras que la fuente radiactiva de ^{192}Ir tiene 10 c.

$$T = \frac{F A D^2}{S} \quad (\text{ver Fig. 37 a.})$$

$$T = \frac{4,5 \cdot 5,3 \cdot 120^2}{10.000}$$

$$T = 34,4 \text{ min}$$

El tiempo de exposición necesario será luego de 34,4 min.

9.3.2 Calcular el tiempo de exposición necesario para obtener una densidad óptica 2 utilizando una película tipo Structurix D 10 (Fig. 37 b).

La pieza de hierro a inspeccionar tiene 2,4" y la distancia fuente placa es, en este caso, de 24"; radioisótopo: ^{60}Co con 10 c.

En el gráfico 37 b obtenemos el factor de exposición que para 2,4" de Fe es 1,1 c-hora

$$\frac{1,1 \text{ c-hora}}{10} = 0,11 \text{ horas} = 6,6 \text{ min}$$

El tiempo de exposición es de 6,6 min.

9.3.3 Calcular el tiempo de exposición para inspeccionar una pieza de aluminio de 2,4"

Otras referencias respecto al problema planteado son: $D = 2$; Distancia fuente-placa 50"; la película usada es la misma del ejemplo anterior. La actividad de la fuente de ^{192}Ir es de 20 c.

Cuando el material a inspeccionar es distinto al de referencia se busca el espesor equivalente. Tabla IX.

Para ^{192}Ir y Al este factor es 0,35

$$e_e (\text{espesor equivalente}) = 2,4'' \cdot 0,35 = 0,84''$$

De la Fig. 37 b sacamos el factor exposición que para 0,84" es igual a 3,2 c-hora.

$$\frac{3,2}{20} \frac{\text{c-hora}}{\text{c}} = 0,16 \text{ horas}$$

Hemos buscado en el gráfico el factor de exposición para 2 " pues esta es la mayor distancia contemplada en el mismo. Sin embargo, en nuestro caso la distancia es de 50", debemos pues corregir en base a la fórmula vista anteriormente:

$$\frac{0,16}{x} \frac{\text{horas}}{\text{horas}} = \frac{24^2}{50^2} \quad x = 0,69 \text{ hora}$$

El tiempo de exposición es por consiguiente aproximadamente igual a 41 min.

T A B L A IX

FACTOR DE EQUIVALENCIA PARA DISTINTOS METALES REFERIDOS AL HIERRO

ALEACION DE:	R A D I O I S O T O P O			
	^{192}Ir	^{137}Cs	^{60}Co	Ra
Aluminio	0,35	0,35	0,35	
Hierro	1,00	1,00	1,00	1,00
Cobre	1,10	1,10	1,10	1,10
Zinc	1,10	1,00	1,00	1,00
Bronce	1,10	1,10	1,10	1,10
Plomo	4,00	3,20	2,30	2,00

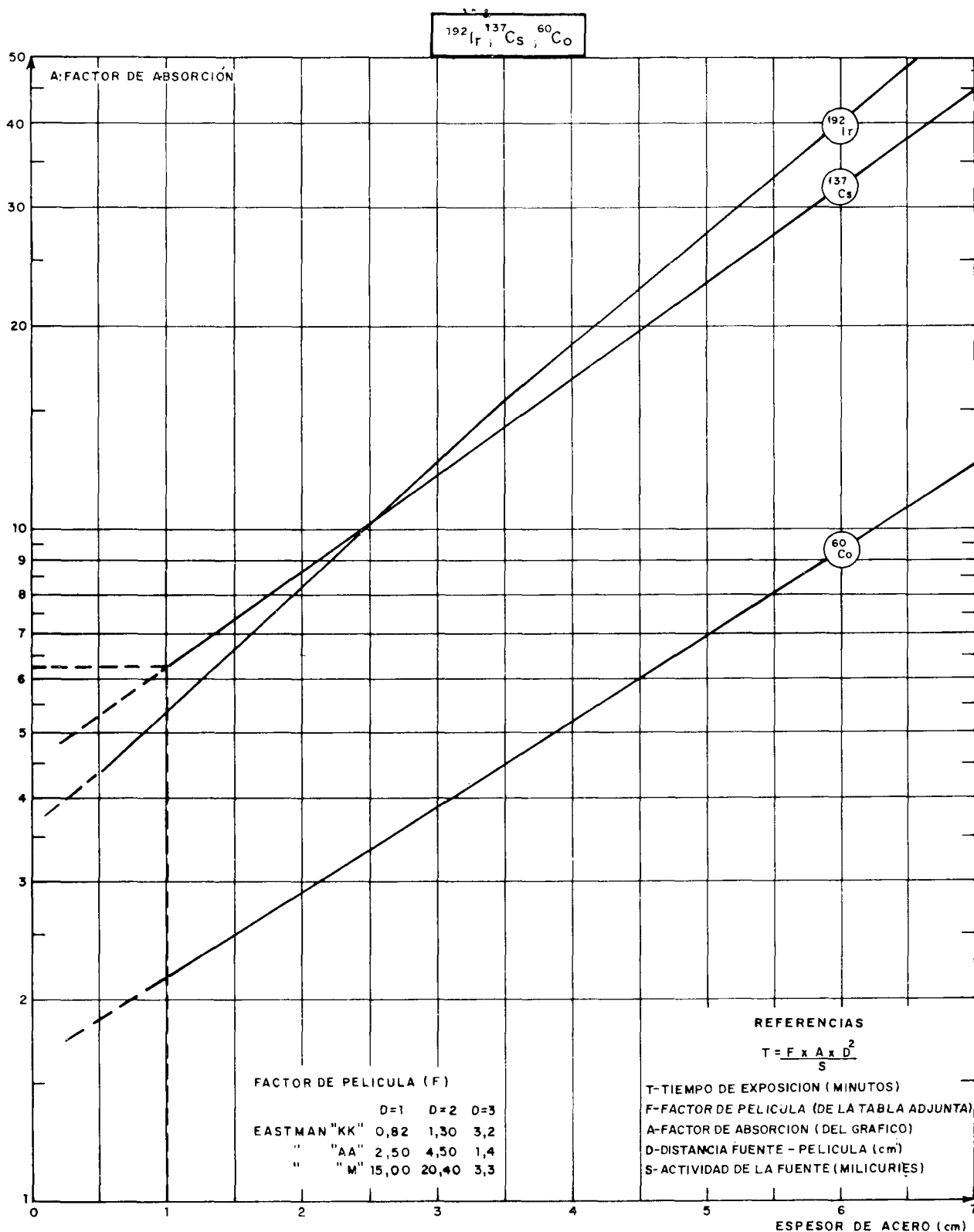


Fig. 37 a) Curvas para calcular el tiempo de exposición. Películas marca Kodak tipo "KK", "AA" y "M"

^{192}Ir ^{60}Co

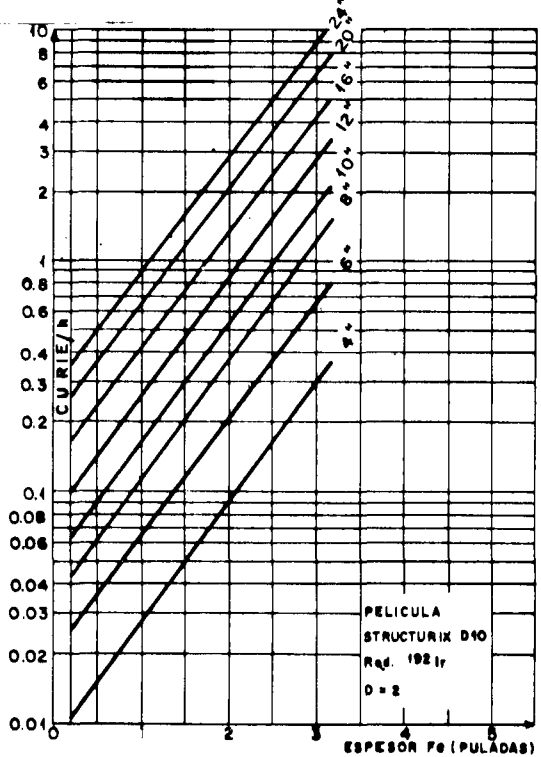
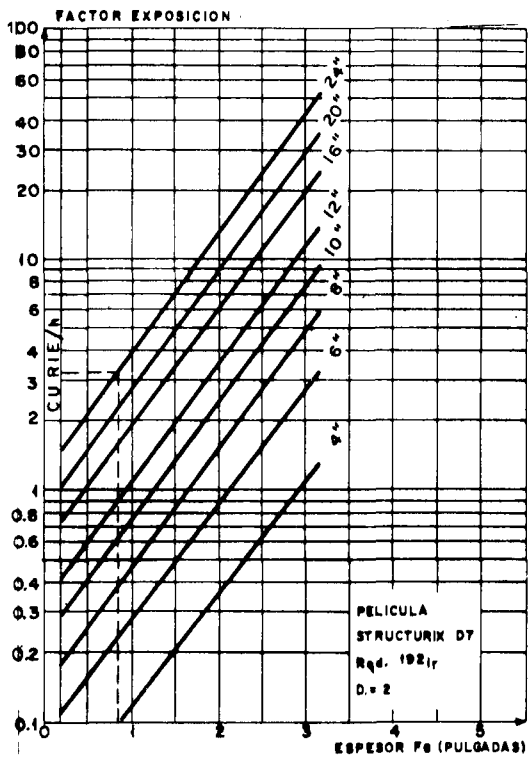
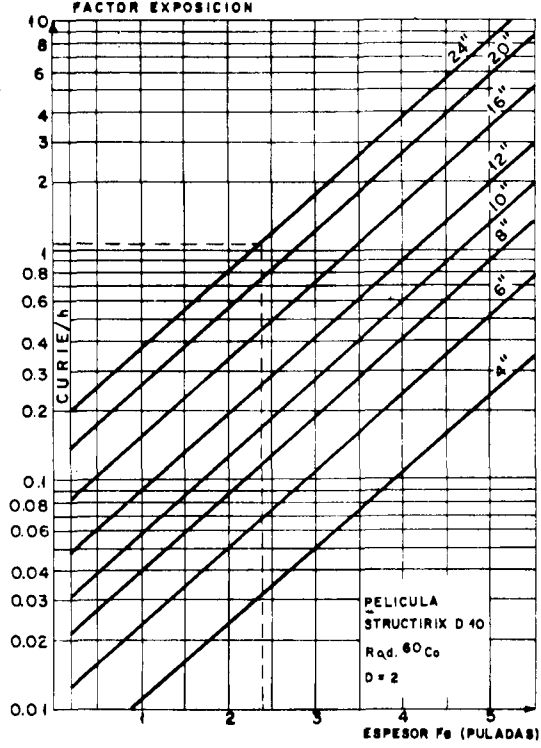
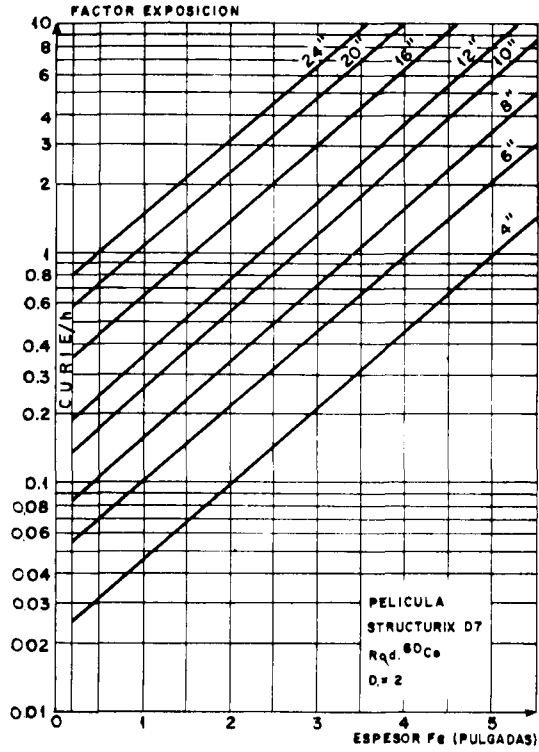


Fig. 37 b) Curvas para calcular el tiempo de exposición. Películas marca "Agfa-Gevaert"

^{137}Cs

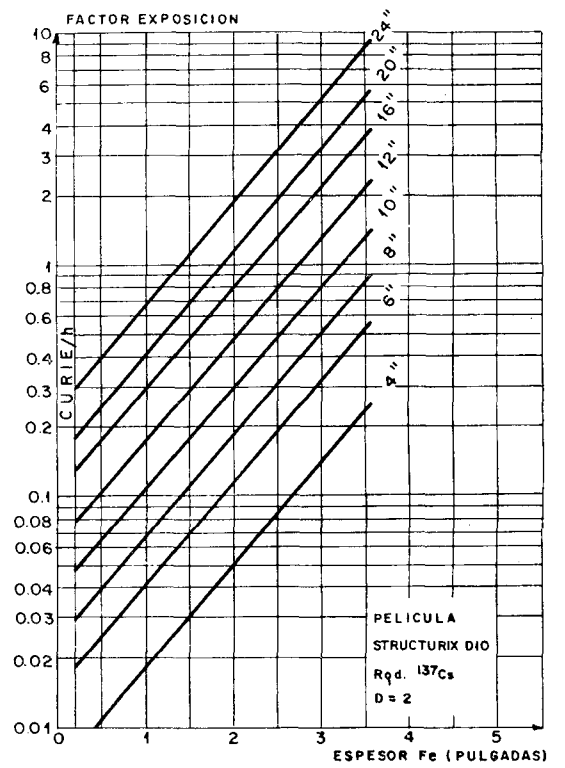
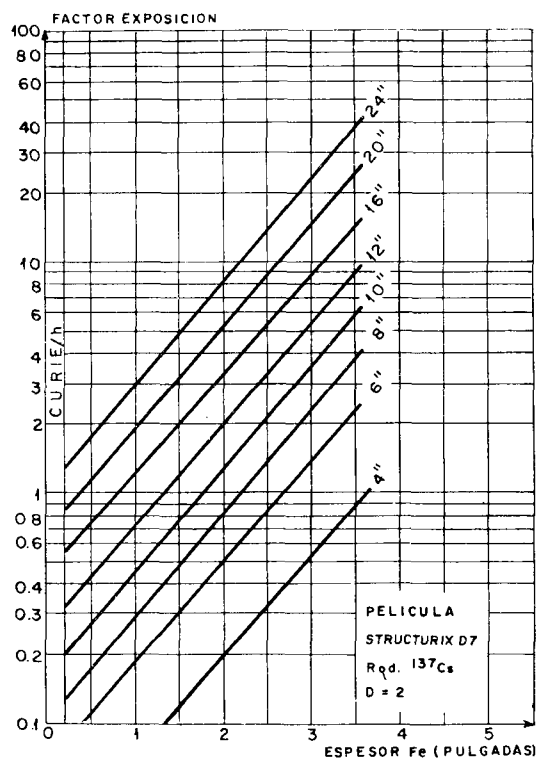


Fig. 37 b) Curvas para calcular el tiempo de exposición. Películas marca "Agfa-Gevaert"

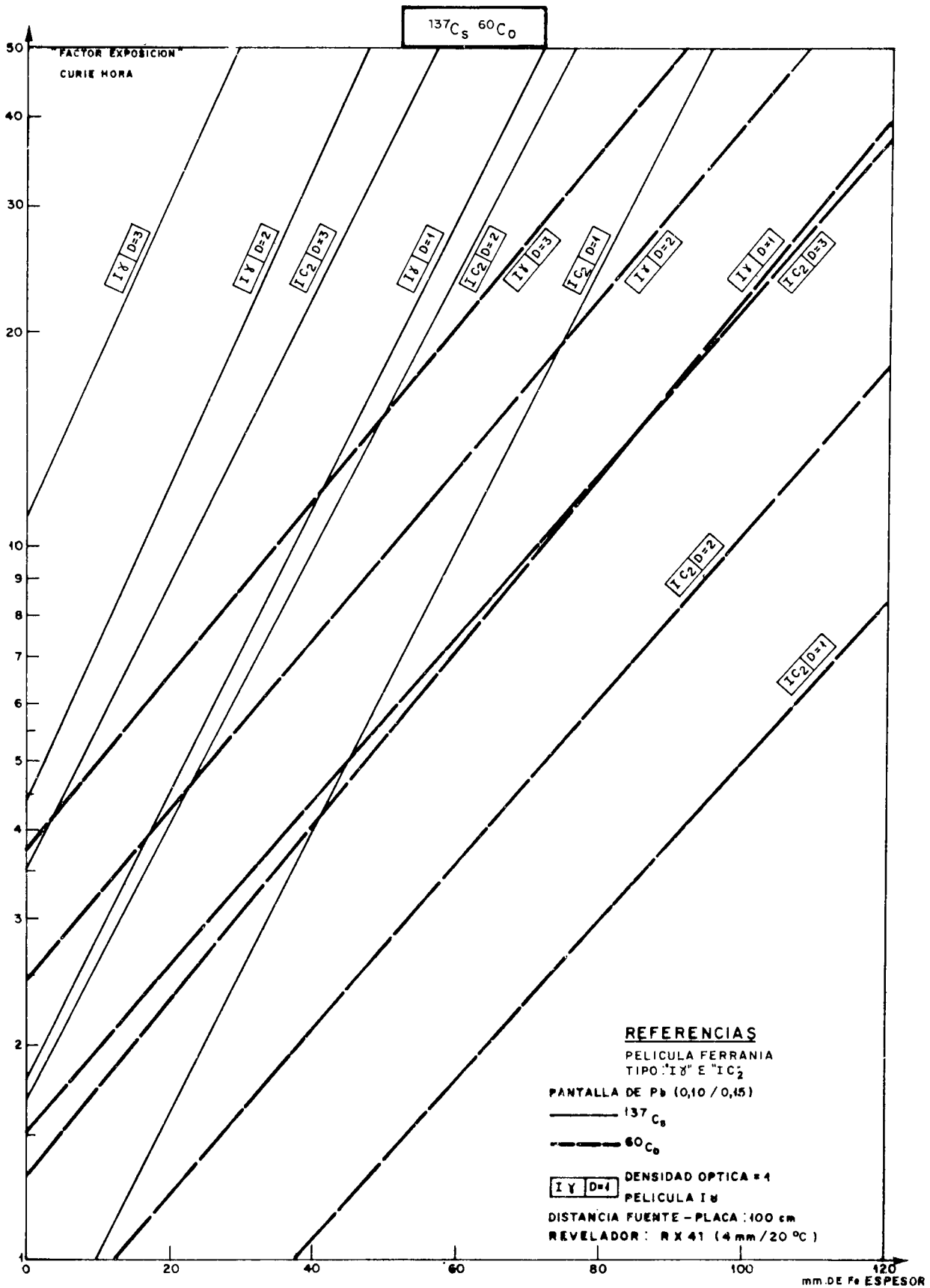


Fig 37 c) Curvas para calcular el tiempo de exposición. Películas marca Ferrania

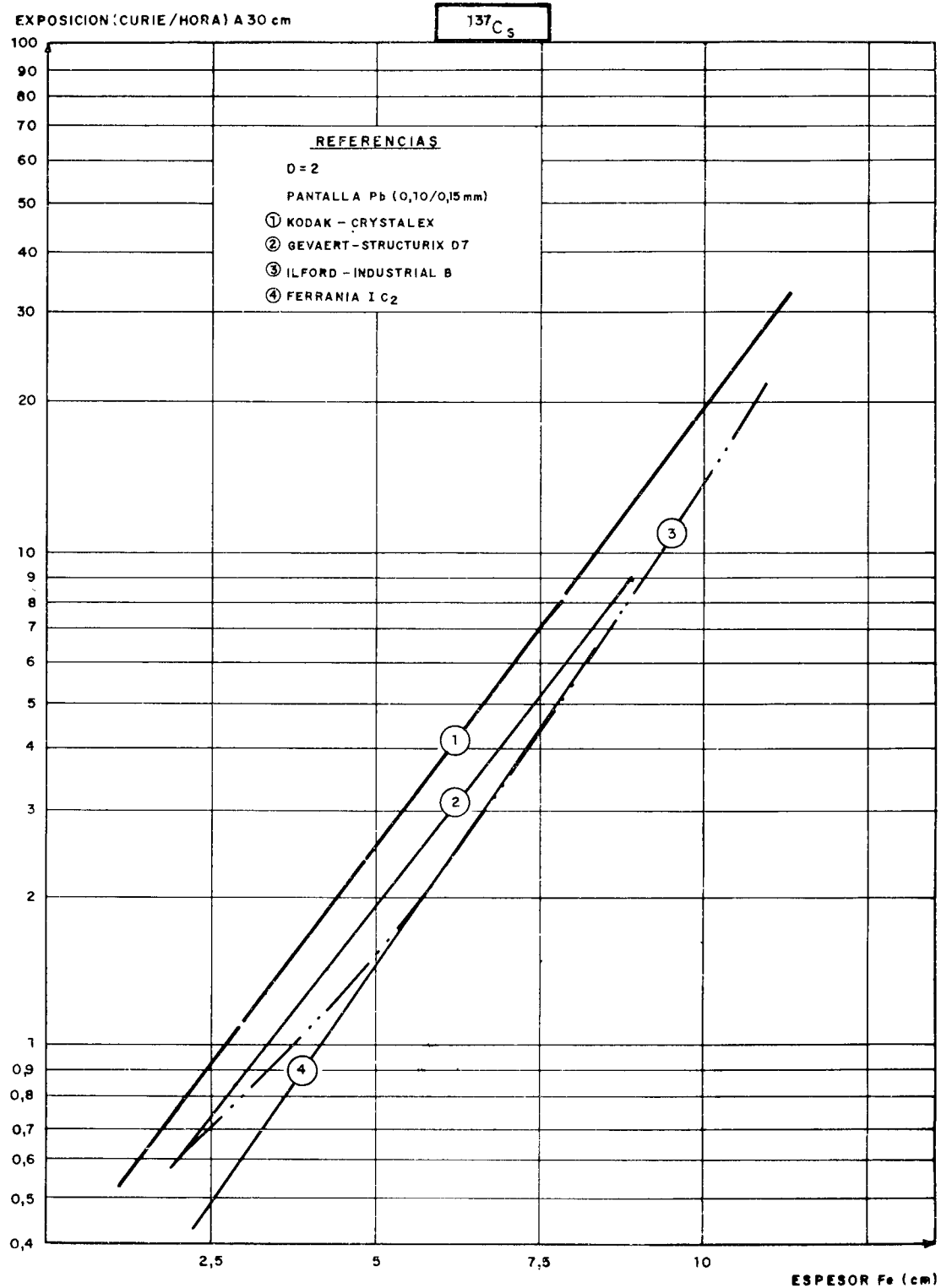


Fig. 37 d) Curvas para calcular el tiempo de exposición.
 Películas marca Kodak, Gevaert, Ilford y Ferrania.

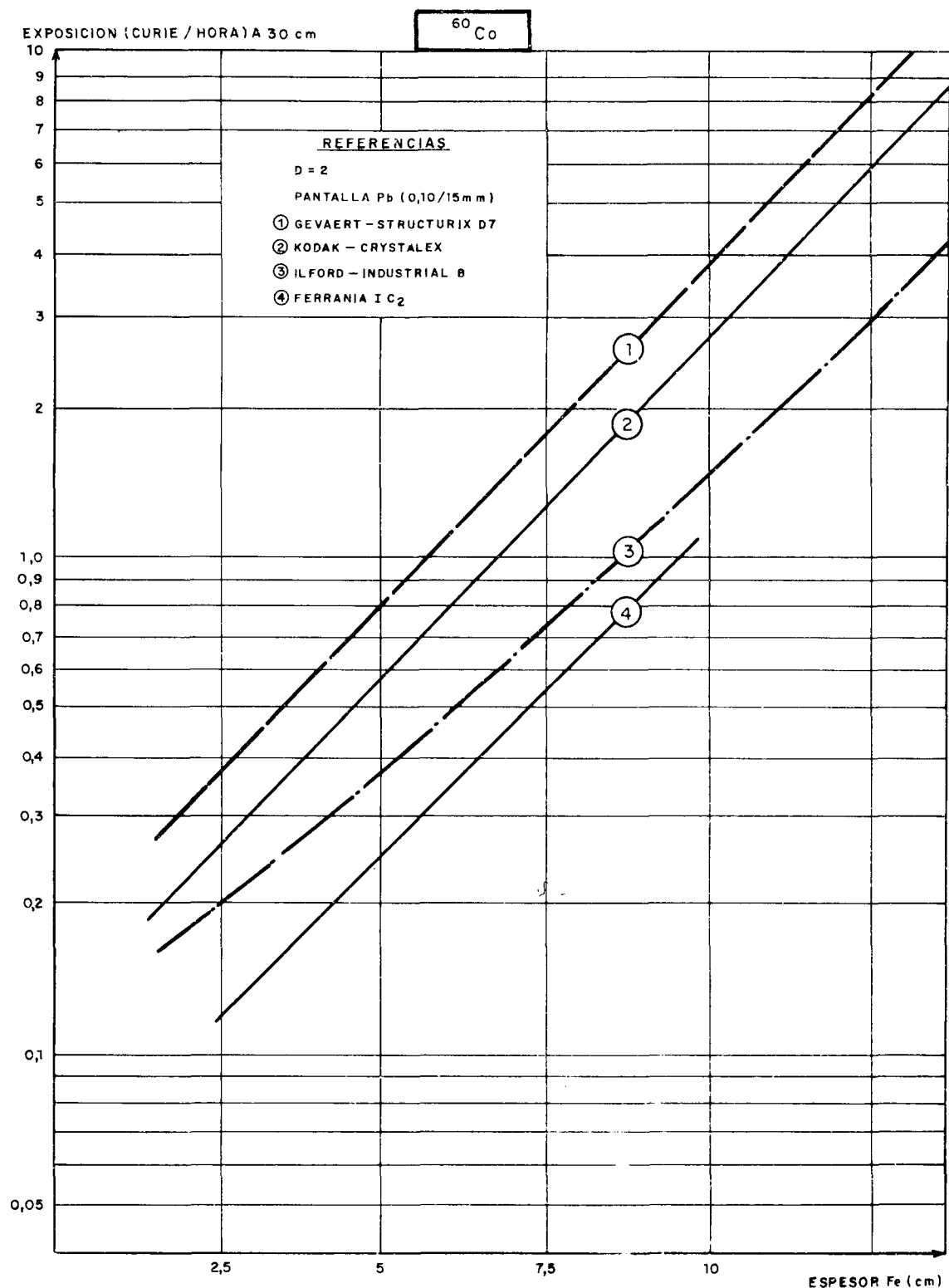


Fig 37 d) Curvas para calcular el tiempo de exposición.
Películas marca Gevaert, Kodak, Ilford y Ferrania

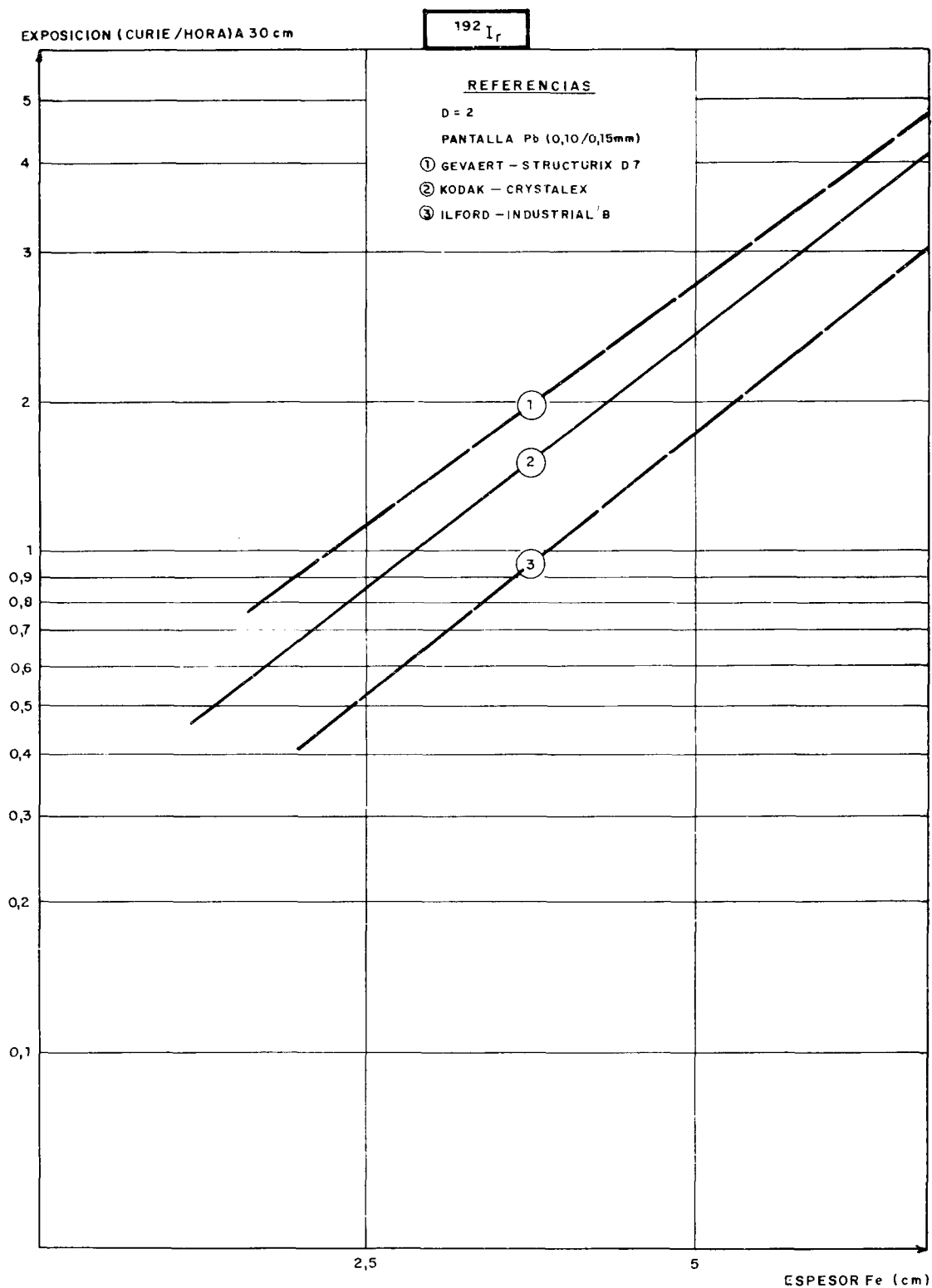


Fig 37 d) Curvas para calcular el tiempo de exposición.
Películas marca Gevaert, Kodak e Ilford

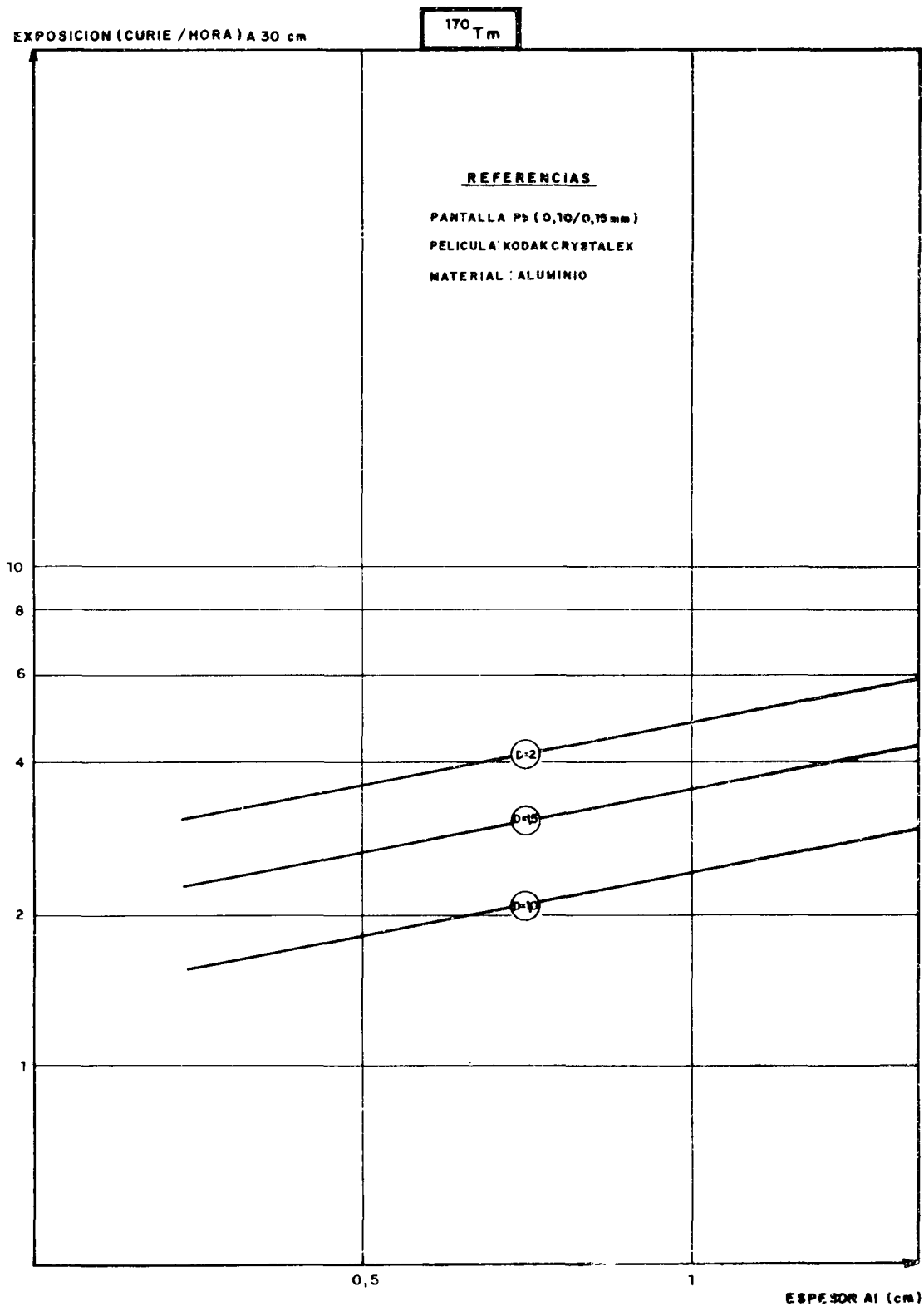


Fig. 37 d) Curvas para calcular el tiempo de exposición. Película marca Kodak

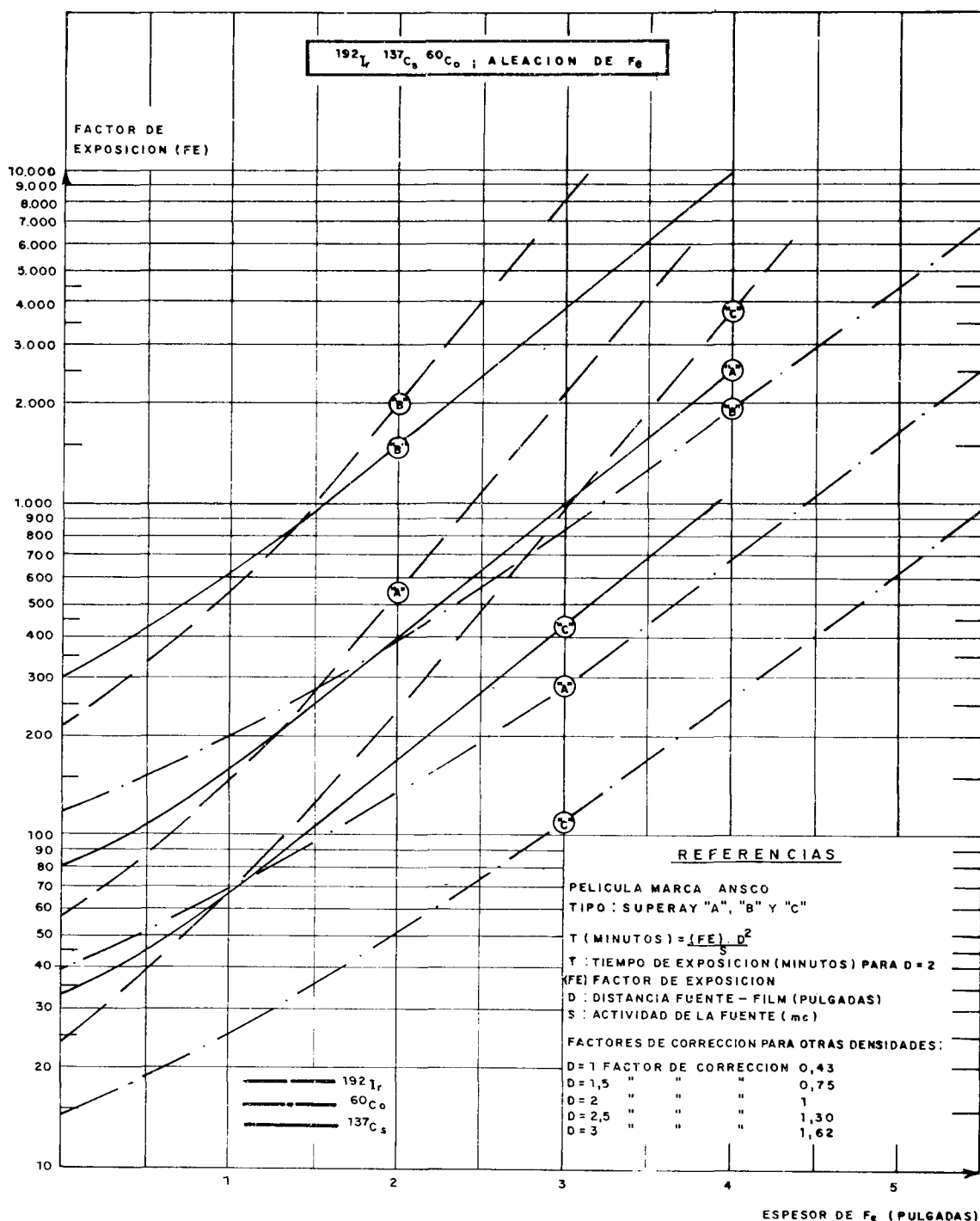


Fig.37 e) Curvas para calcular el tiempo de exposición. Película marca Ansco

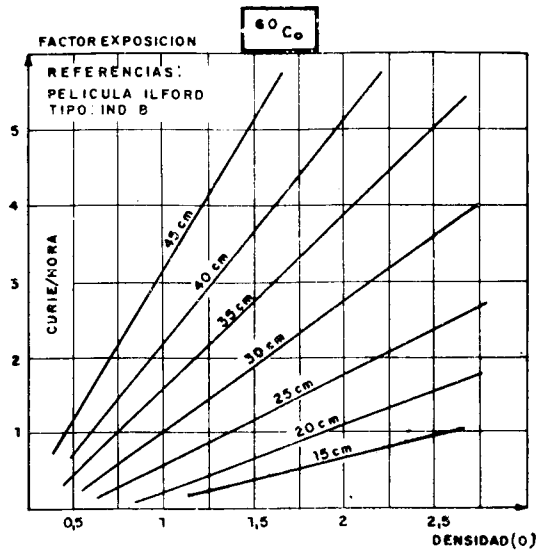


Fig. 37 f) Curvas para calcular el tiempo de exposición. Material: Hormigón o concreto. Película marca Ilford

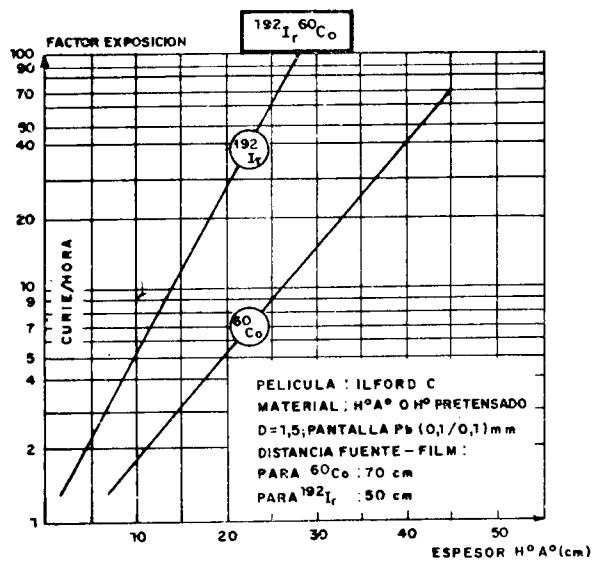


Fig. 37 g) Curvas para calcular el tiempo de exposición. Material: hormigón o concreto. Película marca Ilford.

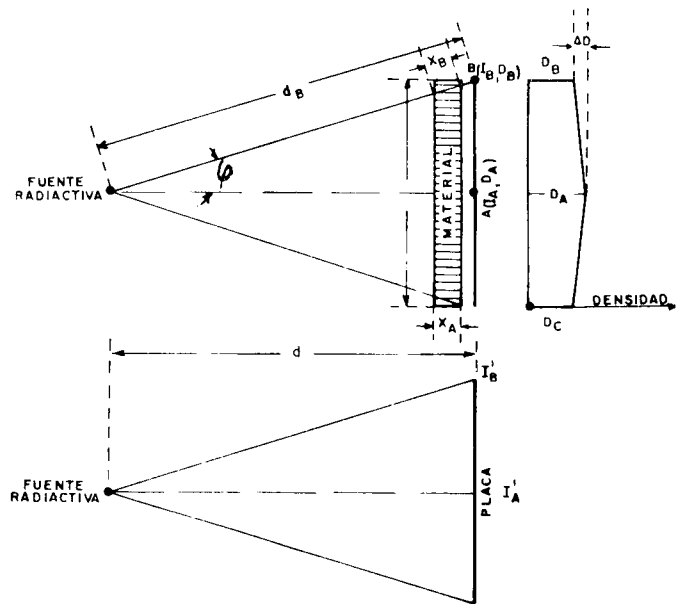


Fig.38 Influencia de la distancia fuente-placa

10.0.0 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL CON OTROS TIPOS DE FUENTES RADIATIVAS

Asistimos actualmente al desarrollo de nuevas fuentes de radiación que tienden a complementar a los emisores de radiación gamma descritos hasta aquí. Son las fuentes de radiación de frenado (bremsstrahlung) aptas para inspeccionar rangos de espesores reducidos o materiales de baja densidad y las fuentes de neutrones o generadores de neutrones que permiten radiografiar ciertos materiales haciendo visibles imágenes e informaciones no siempre identificables con la radiografía gamma ó X.

10.1.0 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL CON RADIACION X DE FRENADO Y X CARACTERISTICA

Los rayos X, de idéntica naturaleza que los gamma, sólo reconocen respecto a estos una diferencia: el origen; tienen luego las mismas propiedades: penetran, atraviesan, son absorbidos o dispersados por la materia, etc.

Una partícula β^- al atravesar un material (blanco), produce radiación electromagnética debido a la aceleración provocada por el campo eléctrico del núcleo: es la radiación X de frenado que tiene un espectro continuo de energías. El espectro depende del número atómico Z y del espesor del material usado como blanco; como es obvio, también del espectro continuo de emisión (de radiación β^- de la fuente).

Cuando un electrón monoenergético (E) es frenado por un material de número atómico Z la energía E_β radiada por electrón como radiación de frenado está dada por:

$$E_\beta = 5,8 \cdot 10^{-4} Z E^2 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{electrón}} \right) \quad (1)$$

Como las partículas β^- tienen un espectro continuo, la energía promedio será:

$$E_\beta = \frac{5,8 \cdot 10^{-4} Z}{N} \sum E_i^2 \Delta N_i \left(\frac{\text{MeV}}{\text{electrón}} \right)$$

siendo

$$N = \sum \Delta N_i \quad (\text{partículas } \beta^-)$$

Además del proceso descrito las partículas β^- y los fotones de frenado, al atravesar el blanco, provocan la eyección de electrones de las capas internas de los átomos; esta vacante es ocupada por un electrón de otra órbita más externa produciéndose simultáneamente la emisión de un fotón $h\nu$ característico de energía o energías definidas.

La Fig. 39 a muestra el espectro de radiación X de frenado y característica obtenida con una fuente de ^{147}Pm y blanco de distinta naturaleza mientras que en la Fig. 39 b los blancos son de la misma naturaleza y distinto espesor.

Las fuentes de rayos X de frenado y característica aún están, consideramos, en una etapa de desarrollo. El ingreso masivo en la inspección industrial se producirá cuando se logren fuentes de alta actividad, reducidas dimensiones y costos reducidos que permitan competir con los generadores de rayos X de baja energía (60 a 120 kV)

Las bases de desarrollo de estas fuentes están orientadas a la obtención de:

- Emisores β^- de alta actividad específica;
- Blancos de alto Z para lograr elevado rendimiento de conversión β^-/X ;
- Una apropiada relación geométrica o espacial entre el radioisótopo y el blanco que permita construir fuentes pequeñas. Dos alternativas compiten: Emisor-blanco intimamente mezclados o emisor cubierto en ambas caras por el blanco (tipo sandwiche).

Los radioisótopos y blancos producidos hasta el presente, aptos para radiografiar bajos espesores o materiales livianos son:

- ^{147}Pm con blancos de W, Pt ó Ag.
- $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ con blancos de Al, Pt ó Ag.
- ^{204}Tl con blancos de I, Pt ó Ag.

Las pantallas intensificadoras de tungstato de calcio son más aptas que la de plomo para usar con este tipo de fuentes.

10.2.0 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL CON NEUTRONES

Los neutrones, al igual que los rayos X ó γ penetran y son absorbidos o dispersados por la materia. Sin embargo, mientras la radiación electromagnética interactúa con los electrones, los neutrones, en cambio, lo hacen preponderantemente con los núcleos. Esta diferencia hace que algunos materiales que atenúan considerablemente la radiación X ó γ puedan ser atravesados fácilmente por los neutrones y viceversa. (31) (32)

Ello permite además visualizar en el material a inspeccionar, detalles o defectos no revelados por la radiografía con rayos X ó γ . Otra particularidad de esta técnica es la de permitir, en algunos casos, visualizar inclusiones de un material de número atómico vecino al número atómico del material de base, ya que la atenuación de neutrones puede diferir substancialmente, entre elementos de números atómicos cercanos o adyacente en la tabla periódica.

Los neutrones, al igual que los rayos X ó γ , no sensibilizan directamente la emulsión fotográfica y es preciso, por consiguiente, usar pantallas intensificadoras capaces de producir radiación secundaria cuando los neutrones interactúan con los átomos de la misma. Las pantallas usadas son habitualmente construidas con B, Cd, Ag, Au, Rh o In.

Las fuentes de neutrones rápidos aptas para radiografía industrial más conocidas son: Po-Be; Ra-Be ó Am-Be; estas mismas fuentes, rodeadas de un moderador producen neutrones térmicos. Los generadores de neutrones son también empleados en esta etapa experimental de la radiografía con neutrones.

Esta técnica tiene posibilidades de aplicación en la radiografía de elementos livianos y en estructuras o cuerpos contruidos con elementos de números atómicos vecinos.

Por último y sólo a título informativo, mencionaremos una particularidad de esta técnica. En algunos casos es posible obtener radiografías sin exponer simultáneamente la pieza a inspeccionar y la placa radiográfica; se expone primero la pieza y las pantallas intensificadoras, luego, las pantallas "activadas" son acondicionadas en íntimo contacto con las placas, dejándose el conjunto en esa posición durante un lapso prefijado.

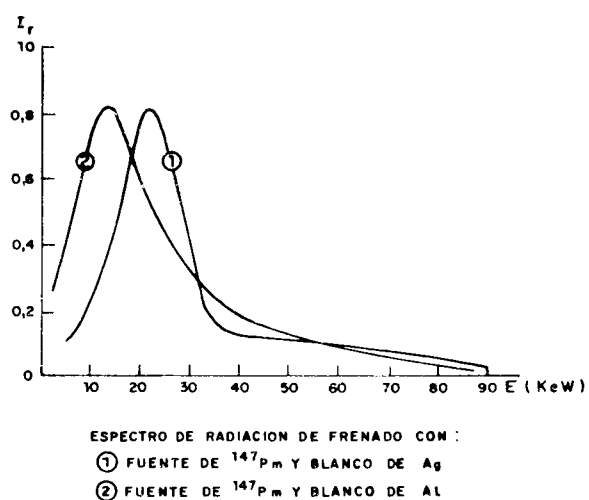


Fig. 39 a) Espectro de radiación X de frenado y X característica con ^{147}Pm y blancos de distinta naturaleza

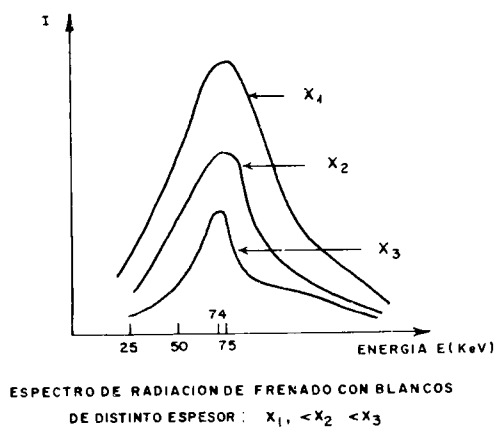


Fig. 39 b) Espectro de radiación X de frenado y X característica con blancos de igual naturaleza y distinto espesor.

11.0.0 BASES Y ESPECIFICACIONES PARA LA EJECUCION E INTERPRETACION DE RADIOGRAFIAS INDUSTRIALES

El fin u objetivo de la radiografía industrial es, en la mayoría de los casos, poner en evidencia fallas o inclusiones que puedan perjudicar la eficiencia o el pleno aprovechamiento del material o la estructura inspeccionada. En otras circunstancias se busca seleccionar materiales, poner a punto una técnica, un procedimiento de fabricación o, por último, calificar y seleccionar operarios.

El analista o inspector debe, frente a estos objetivos diversos, ejercer su juicio para aceptar o rechazar una radiografía, ponderar las causas de las imperfecciones o prever el comportamiento del material analizado ante un estado de solicitud extrema o durante la fase crítica del servicio para el que fue concebido.

No todas las fallas o inclusiones hacen al material inspeccionado rechazable. Existen ciertas tolerancias previstas en el cálculo y diseño que suelen estar reglamentadas por normas, especificaciones, etc. y que fijan los límites de calidad aceptables.

Quien juzga y decide frente a una placa radiográfica debe, por consiguiente, conocer y tener experiencia respecto a todos estos problemas, sin olvidar, como es obvio las características particulares de la técnica o método de control no destructivo empleado. (23) (33)

11.1.0 NORMAS Y ESPECIFICACIONES REFERENTES A LA EJECUCION DE RADIOGRAFIAS INDUSTRIALES

Complementado lo ya expuesto en capítulos anteriores expondremos aquí algunas recomendaciones o especificaciones contempladas o no en las normas existentes que, interpretamos, son de fundamental importancia:

a) En toda radiografía industrial deben ser visibles:

- por lo menos un indicador de calidad de imagen por placa; en caso de irradiaciones panorámicas uno por cuadrante. Ver 7.0.0;
- el nombre o siglas del fabricante;
- números o letras que identifiquen inequívocamente el recipiente, pieza, tramo o sección y las indicaciones necesarias para la fácil localización del area respectiva.
- un número o letra que identifique las placas ejecutadas por segunda o tercera vez en zonas repasadas o en aquellas áreas donde surjan dudas respecto a la sensibilidad de detección alcanzada.

- b) Los números, letras o indicadores no deben interferir posibles fallas o inclusiones; en caso de dudas debe repetirse la gammagrafía o radiografía.
- c) Las placas radiográficas deben ser acompañadas por una descripción de la técnica usada: tipo de fuente radiactiva, placa, distancia fuente-placa, dimensiones de la fuente y otras referencias que se consideran de interés para la correcta valoración de la técnica empleada.
- d) Las colecciones de radiografías ejecutadas deben guardarse en lugares aptos durante un lapso prudente. Cinco años es el tiempo recomendado por las normas ASME para soldadura.

11.2.0 ESPECIFICACIONES, NORMAS Y PATRONES DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL EN SOLDADURA

Una falla o inclusión implica una reducción en la sección útil y una concentración de tensiones en torno a ella; las dimensiones, forma y orientación de la falla son por consiguiente factores que deben considerarse al evaluar su importancia frente al estado de sollicitación estática, reiterada o de impacto previsible.

El porcentaje de soldadura a controlar con rayos X ó gamma suele ser fijado por las normas adoptadas. Las normas API (American Petroleum Institute) por ejemplo, establecen esos porcentajes para cañerías tipo gasoducto o poliducto; las normas DIN o ASME (Deutscher Normenausschuss o American Society of Mechanical Engineers) los fijan para recipientes a presión, calderas, etc.

Las condiciones de trabajo previstas, los coeficientes de seguridad adoptados y el sobrediseño de la soldadura son las bases que se consideran para establecer esos porcentajes. Por regla general se controlan todas las areas consideradas críticas.

El control radiográfico debe seguir y responder al ritmo impuesto por los soldadores, al menos en la primera etapa de los trabajos. De esta manera se corrigen errores personales, se reemplazan electrodos y se pone a punto la técnica.

Expondremos ahora algunas referencias respecto a los defectos más comunes en uniones soldadas. Fig. 40

11.2.1 Cavidades y porosidades (Gas holes and porosity).

Aparecen en las placas como manchas oscuras de forma circular, dimensiones diversas, unas veces aisladas y otras agrupadas o asociadas a otros defectos. El tono (oscuro en el negativo, claro en el positivo) se debe a la menor densidad de la cavidad respecto al material base.

Las tolerancias son fijadas de acuerdo al número de cavidades por unidad de superficie. Las normas ASME han publicado radiografías patrones que sirven de referencia para establecer los límites de calidad aceptables.

11.2.2 Inclusiones de escoria (Weld slag inclusions)

Se producen más frecuentemente en soldaduras de múltiples pasadas por deficiente limpieza del cordón; óxidos u otras impurezas quedan atrapadas en alguna de las pasadas sucesivas.

La presencia de este tipo de discontinuidad es identificable en las placas por la forma alargada y sinuosa que con frecuencia se manifiesta. La tonalidad también es más oscura que el fondo y puede estar asociada con la falta de penetración o fusión.

Las máximas longitudes de escoria toleradas de acuerdo a las normas ASME son:

0,25"	para	$e < 0,75"$	(e = espesor nominal)
$0,33 \cdot e"$	para	$0,75" \leq e < 2,25"$	
0,75"	para	$e \geq 2,25"$	

11.2.3 Grietas o fisuras (Cracks or breaks)

Son producidas por las tensiones derivadas de la contracción del metal durante el enfriamiento; están orientadas en cualquier dirección y en algunas ocasiones se extienden u originan en el metal adyacente al cordón soldado.

Cuando están orientadas desfavorablemente son de muy difícil detección siendo conveniente recurrir a otras técnicas para ponerlas en evidencia.

Generalmente no existen tolerancias respecto a este tipo de fallas debiendo, en todos los casos procederse a la reparación de las mismas.

11.2.4 Falta de penetración (lack of penetration)

Cuando la separación entre las chapas, previamente punteadas, no es la adecuada para el electrodo usado, se producen discontinuidades en la raíz de las soldaduras. El aspecto en la placa es similar al de una contrastada línea o franja oscura, con bordes bastante definidos. Las normas en general son bastante estrictas con este tipo de fallas.

11.2.5 Falta de fusión (lack of fusion)

Se produce en los flancos, la raiz o entre las sucesivas capas en las soldaduras de múltiples pasadas. La forma y tonalidad es bastante similar a la anterior y las tolerancias son también reducidas.

11.2.6 Inclusiones de tungsteno

Por ser el tungsteno un material de mayor densidad que las aleaciones corrientemente inspeccionadas la imagen de esta falla tiene tonalidad más clara que la tonalidad del resto de la placa. Se produce por desprendimientos producidos en los electrodos.

11.2.7 Discontinuidades externas

Las rebabas, ondulaciones, etc. pueden confundir al que interpreta una radiografía. Deben ser eliminadas si ello es posible.

11.3.0 ESPECIFICACIONES, NORMAS Y PATRONES DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL EN FUNDICION

Existen normas que establecen tolerancias y límites de calidad respecto a defectos o inclusiones en fundiciones de hierro, aluminio y magnesio. Las normas ASTM dividen a los materiales sujetos a inspección radiográfica en 5 clases. Las restricciones disminuyen a medida que crece el número de orden.

Clase 1: Fundiciones de Fe que trabajan con altas presiones, altas temperaturas o ambas a la vez; $e < 1''$.

Fundiciones de Fe que trabajan con bajas presiones; $e < 1''$. Partes móviles de máquinas o mecanismos destinadas a servicios sujetos a solicitaciones reiteradas o cargas de impacto. $e < 0,5''$.

Clase 2: Fundiciones de Fe que trabajan con altas presiones, altas temperaturas o ambas a la vez; $e \geq 1''$.

Fundiciones de Fe que trabajan con bajas presiones; $e < 1''$. Partes móviles de máquinas o mecanismos destinadas a servicios sujetos a solicitaciones reiteradas o cargas de impacto; $e \geq 0,5''$.

Clase 3: Fundiciones de Fe que trabajan con bajas presiones; $e \geq 1''$. Partes móviles de máquinas o mecanismos destinadas a trabajar con cargas normales o de impacto; $e \geq 1''$.

Clase 4: Organos fijos de máquinas, mecanismos, o estructuras solicitados por cargas considerables; $e \leq 3''$. Partes móviles de máquinas o mecanismos solicitadas reiteradas poco importantes; $e \leq 3''$.

Clase 5: Estructuras sujetas a cargas considerables; $e \geq 3''$.

La gammagrafía es útil para detectar los posibles defectos de las fundiciones en la etapa previa o posterior al maquinado. La información por ella suministrada suele ser también aprovechada en el desarrollo y puesta a punto de nuevas técnicas de fundición.

Algunos de los defectos más corrientes en fundiciones de hierro o metales livianos quedan aquí expuestos y representadas en la figura 41

11.3.1 Orificios de gas (gas holes)

Los gases disueltos en el metal fundido o los que ascienden desde el fondo del molde suelen quedar atrapados por el metal durante el enfriamiento. Estos defectos pueden quedar aislados, agrupados o dispersos. En la placa aparecen como oscuras manchas de bordes suaves.

El tamaño del orificio y la posición del mismo respecto al diagrama de tensiones de la sección transversal que lo contiene, juegan importante papel en la decisión de rechazo o aceptación del material inspeccionado.

Cuando los orificios están agrupados se suele considerar toda el area por ellos abarcada como discontinuidad.

11.3.2 Porosidades

Son causadas por gases. Aparecen en la radiografía como pequeñas manchas circulares aisladas o agrupadas. Cuando se producen por contracción del metal durante el enfriamiento pueden adquirir formas irregulares; ésta última discontinuidad se manifiesta preponderantemente en la fundición de aluminio.

11.3.3 Inclusiones

Los materiales extraños a la aleación más corriente en la fundición, son arenas, óxidos, escorias, etc. La densidad del cuerpo extraño respecto al material de base determina la tonalidad de la falla en la placa. Cuando ambas densidades son similares puede resultar difícil la localización del defecto. Las formas de las inclusiones suelen ser diversas, sin embargo, generalmente acusan bordes definidos.

11.3.4 Fallas de vaciado (Miss runs)

Se producen cuando el metal fundido no llena completamente los moldes.

11.3.5 Cortes fríos

Cuando el metal en estado de fusión fluye por el molde puede ocurrir que dos

corrientes líquidas que se encuentran no tengan igual temperatura, solidificándose y produciéndose una discontinuidad entre ambas. Este defecto es muy corriente en la fundición del magnesio debido al rápido enfriamiento del metal fundido.

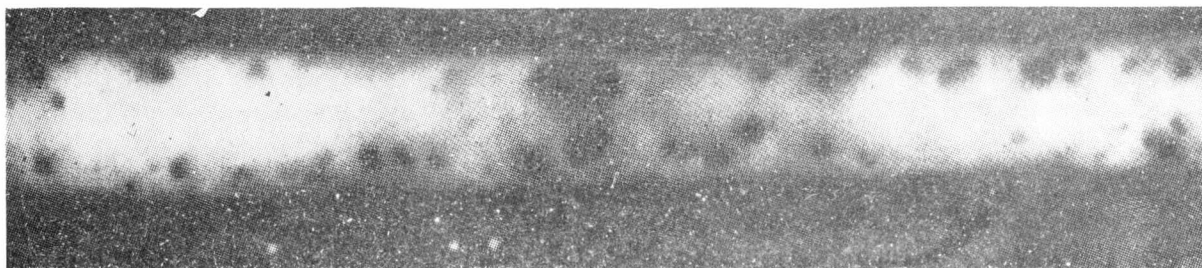
11.3.6 Grietas

Son causadas por distintos factores: contracciones o tensiones debidas a causas diversas, incorrecta técnica de vaciado o manipulación del molde durante el enfriamiento, etc.

Toda grieta es generalmente inaceptable en la mayoría de las fundiciones y lamentablemente es de difícil detección. Para localizarlas puede ser preciso ejecutar varias radiografías desde distintas posiciones.

11.3.7 Segregaciones

Cuando los metales que constituyen una aleación se enfrían, pueden tender a separarse unos de otros en distintos sitios, lo que será registrado en la placa como manchas oscuras y claras. En general se rechazan las fundiciones que muestran estos defectos, excepto en casos en los que el área que los muestra es relativamente pequeña.

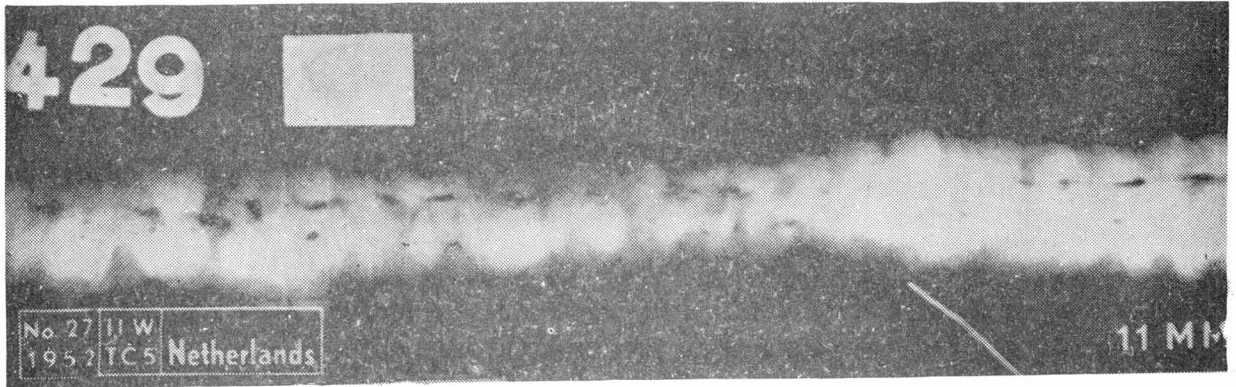


a) porosidades de gas

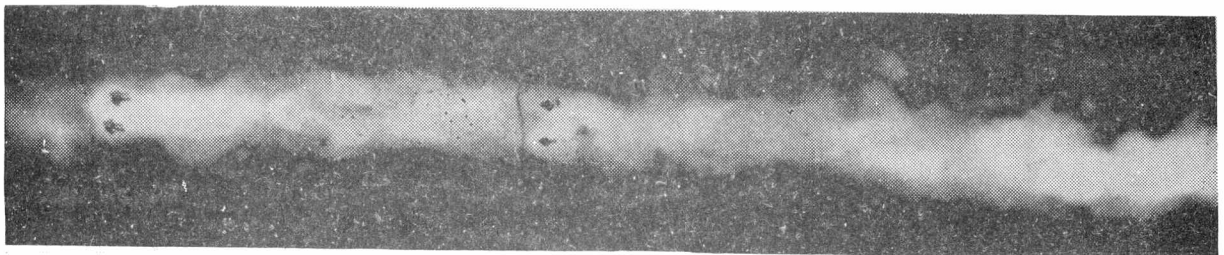


b) burbujas de gas

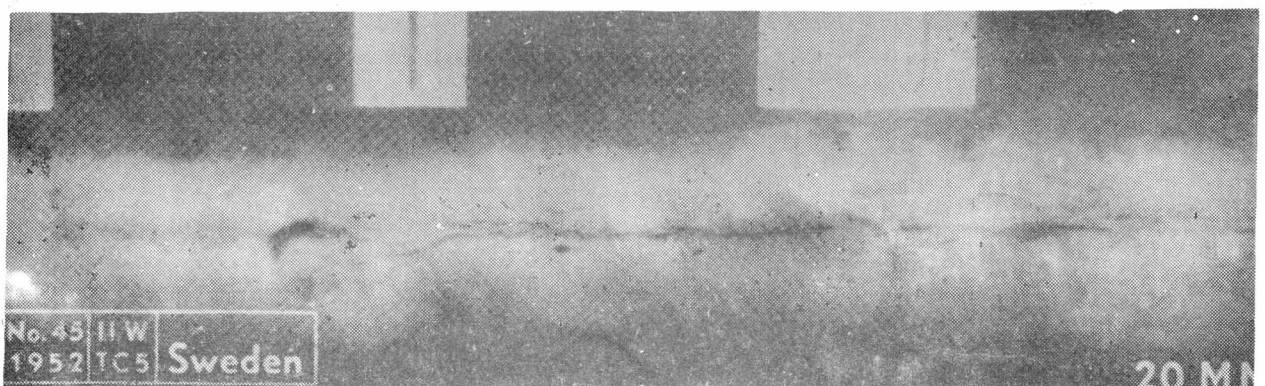
Fig. 40 Algunos defectos e inclusiones en soldaduras.



c) inclusiones

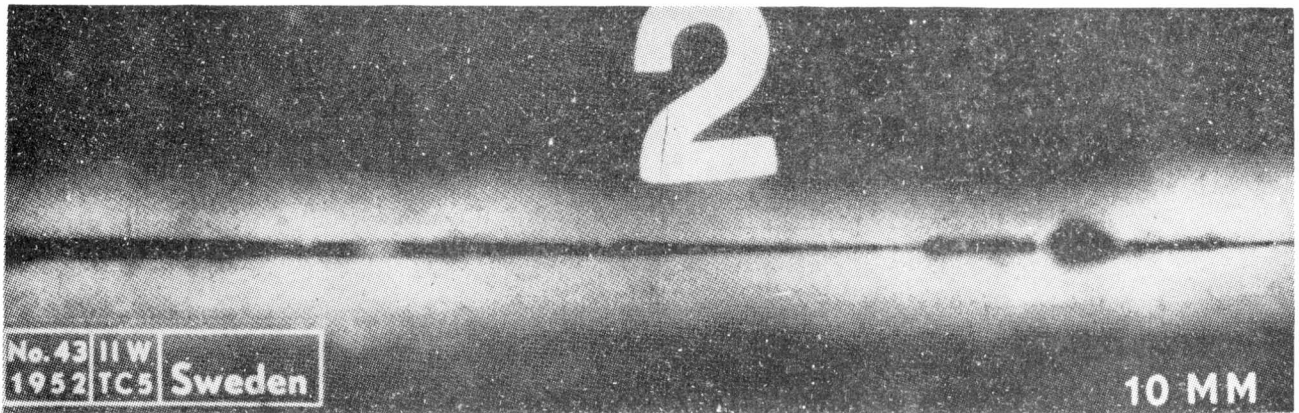


d) grieta transversal

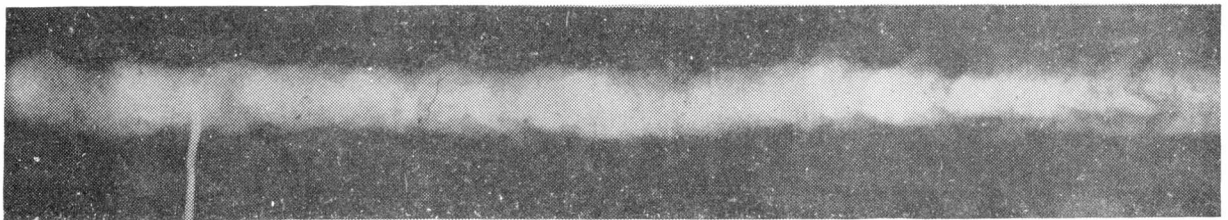


e) grieta longitudinal

Fig. 40 bis. Algunos defectos e inclusiones en soldaduras.

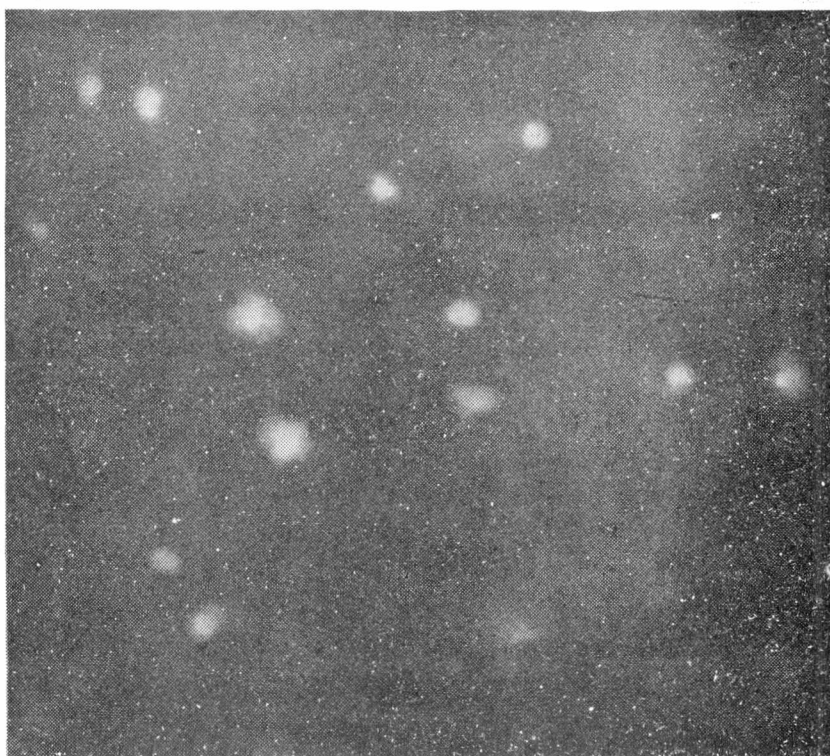


f) falta de penetración



g) defectos superficiales

Fig. 40 bis. Algunos defectos e inclusiones en soldadura

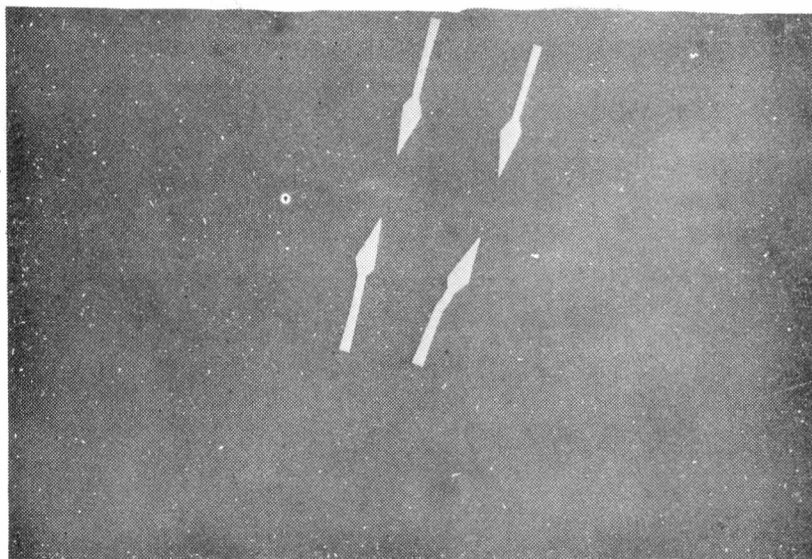


a) Porosidad de gas.



b) Burbujas de gas.

Fig. 41 Defectos e inclusiones en fundición de hierro.

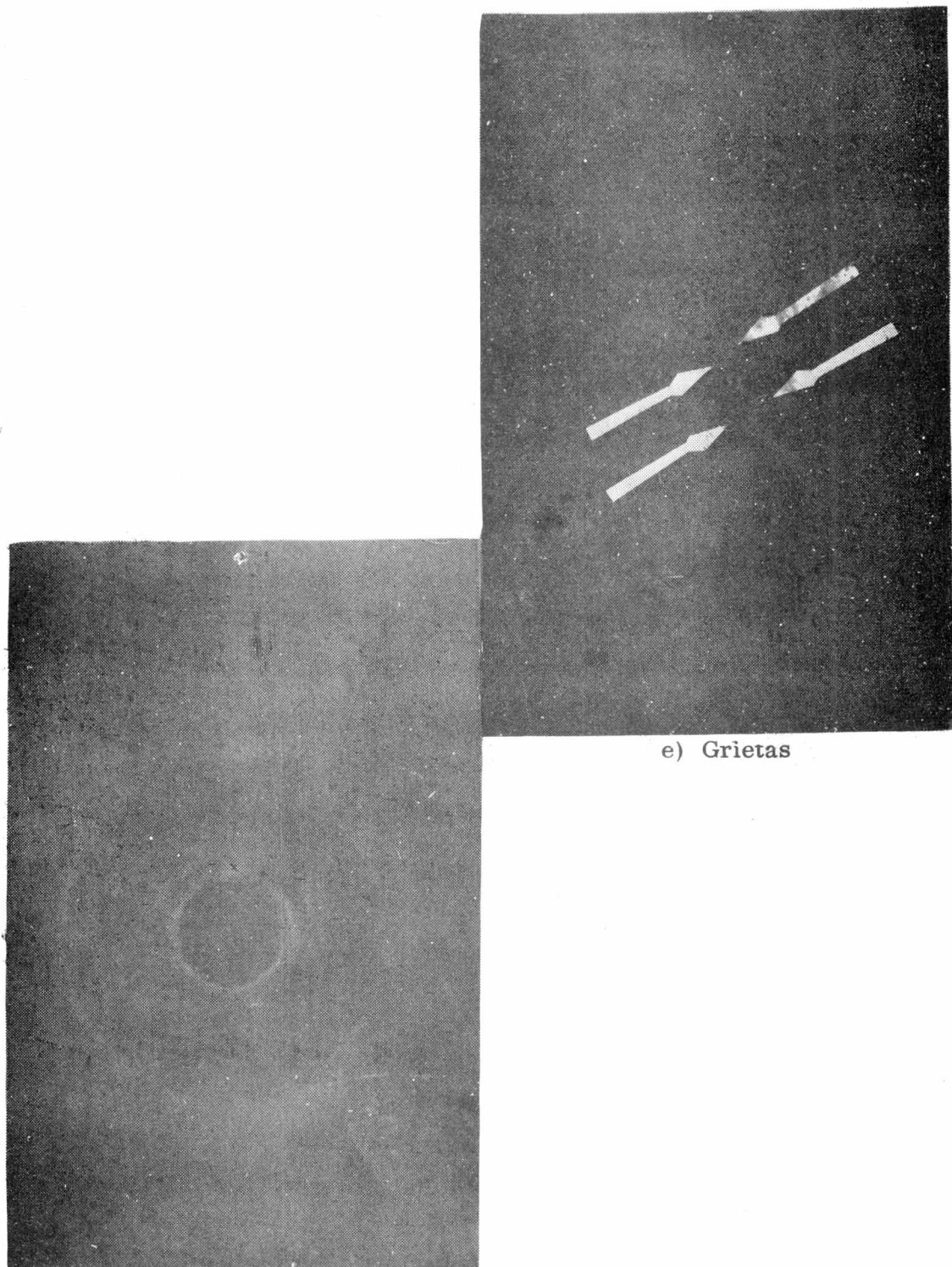


c) Contracciones internas.



d) Desgarramiento.

Fig. 41 bis. Defectos e inclusiones en fundición de hierro.



e) Grietas

f) Bordes no tundidos.

Fig. 41 bis. Defectos e inclusiones en fundición de hierro.

REFERENCIAS

- (1) CNEA, Equipos para la gammagrafía industrial, informe R.I. 23, (1962).
- (2) CNEA, Aplicaciones de radioisótopos en la industria argentina, informe CNEA, (1963).
- (3) Kohl, J., Zentner, R.D., Lukens, H.R., Van Nostrand Nuclear Science Series, (1961), Radioisotopes Applications Engineering.
- (4) Erwall, L.G., Forsberg, H.G., Ljunggren, K., Industrial Isotope Techniques, Munksgaard, Copenhagen (1964).
- (5) Evans, R.D., The atomic Nucleus, McGraw-Hill, (1955).
- (6) CNEA, Dosimetría de radiaciones ionizantes.
- (7) CNEA, Radioisótopos. Catálogo y lista de precios, (1968).
- (8) Commissariat à l'énergie atomique. Radioéléments-molécules marquées Catálogo - Francia. (octubre 1968).
- (9) The Radiochemical Centre-Amersham-Radioactive Products, Catálogo Inglaterra, (1967/1968).
- (10) New England Nuclear Corp. Catálogo N-1968/1969.
- (11) Ilford, Películas radiográficas Médicas y Productos Químicos.
- (12) Agfa-Gevaert, Industrial X-Ray Films, (1966).
- (13) Ferrania, Products for Industrial Radiography, (1963).
- (14) Eastman Kodak Co-X-Ray Division, Radiography in modern industry, (1957).
- (15) Agfa-Gevaert, In-Motion Radiography.
- (16) Dupont, Dosimeter Film.
- (17) Agfa-Gevaert, Industrial Radiography, (1968).
- (18) Castagnet, A.C. Registrador automático de espesor de nieve por gammagrafía. CNEA, III Congreso Nacional del Agua, San Juan.

REFERENCIAS (cont)

- (19) Surugue, J., Techniques générales du Laboratoire de Physique Centre National de la Recherche Scientifique, (1952).
- (20) Eastman-Kodak Co. Sensitometric Properties of X-Ray Films.
- (21) Courtois, G., Rapport CEA, No. 1.308, Centre D'Etudes Nucleaires de Saclay. Les Ecrans Renforceurs Metalliques en Gammagraphie. Centre D'Etudes Nucleares de Saclay, (1959).
- (22) Ruault, P.A., Aspects particulieres de la qualité d'image radiographique dans l'industrie du gaz en France (Gaz de France, Paris), 4ème. Colloque International de la Radiographie Industrielle, 31/3 - 1/4/1966.
- (23) Industrial Radiography, Manual, U.S. Atomic Energy Commission, D.E. 84 a 36.
- (24) Settiponi, A., Etude bibliographique concernant la gammagraphie du beton arme et premier cas d'application d'un pont.
- (25) Roderick, J.F., Photographic Contrast in Roentgenology, Phot products Dept., Dupont.
- (26) IRAM (Inst. Arg. de Racionalización de Materiales), Esquema 1 de Normas IRAM 679, 22/12/1964.
- (27) ASTM, Radiographyc Standards for Steel Castings (Gamma Ray).
- (28) Rath R., Forest, G., Comparaison des indicateurs de la qualité d'images dans la radiographie des fortes epaisseurs (Electricité France), 4ème Colloque International de la Radiographie Industrielle, (31/3-1/4/1966).
- (29) Blondel, A., Le control non destructif des materiaux par gammagraphie, E. Techniques des Industries de la fonderie (1959).
- (30) Rumyantsev, S., Industrial Radiology. Foreing Language Publishing House.
- (31) Barton, J.P., Boutaine, J.L., Premiers developpements de la Radiographie par neutrons en France, Supl. en Bulletin d'Informations.
- (32) Berger, H., For non-destructive testing Neutron Radiography-Nucleonics, Vol. 20 No. 9, September, 1962.
- (33) Asociación Italiana de Metalurgia, Term. de los defectos en las piezas fundidas.