



T
621.367020
L 835

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica

DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA DETERMINACION DE EXPOSICION
RADIOGRAFICA MEDIANTE COMPUTADORA

PROYECTO DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

JULIO CESAR LOJANO MERA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1992

AGRADECIMIENTO

A mis padres, hermanos y amigos que de una manera desinteresada han venido apoyándome durante toda mi vida estudiantil para mi superación como persona.

Al ING. OMAR SERRANO Director de Tópico, por su ayuda y colaboración para la realización de este trabajo.

Al CYCYT y demás personas que prestaron su valiosa ayuda para la culminación de esta obra.

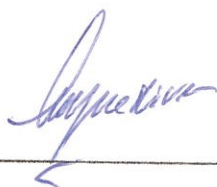
DEDICATORIA



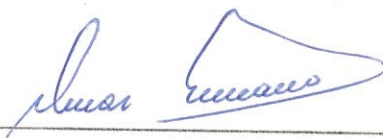
A JEHOVA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS



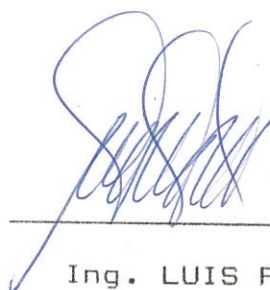
Ing. JORGE DUQUE
DECANO



Ing. OMAR SERRANO
DIRECTOR DE TOPICO



Ing. JOSE PACHECO
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

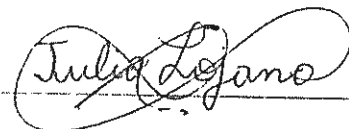


Ing. LUIS RODRIGUEZ
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos , ideas y doctrinas expuestos en este Proyecto de Grado , me corresponden exclusivamente; y , el patrimonio intelectual del mismo a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Tópico de Graduación)

A handwritten signature in dark ink, reading "Julio Lozano", written over a horizontal line.

JULIO LOJANO MERA

RESUMEN

La importancia de utilizar métodos computacionales en el cálculo de los parámetros de la Exposición Radiográfica, radica principalmente en la facilidad y rapidez con que se pueden obtener dichos parámetros, además de permitir obtener resultados de gran precisión.

En el presente trabajo se han desarrollado algoritmos matemáticos, partiendo de valores experimentales de exposición, con el objeto de que dichos algoritmos sean utilizados para desarrollar programas computacionales de exposición radiográfica. Para conseguir esto, este trabajo se ha dividido en dos partes.

En la primera parte se realizan exposiciones radiográficas, sobre un mismo material (acero), pero utilizando solamente película structurix D7. Estas exposiciones se realizan en base a los siguientes parámetros: kv, mA y tiempo con el objeto de encontrar diversos valores de densidad. A partir de

la densidad se obtienen gráficos y algoritmos matemáticos que a su vez van permitir la determinación de la exposición radiográfica, pero esta vez de una manera algoritmica.

En la segunda parte se realizan nuevas exposiciones, pero ahora utilizando películas structurix D7 y D4, con el objeto de encontrar las curvas sensitométricas. A partir de estas curvas se formulan nuevos algoritmos matemáticos que junto con los algoritmos obtenidos en la parte anterior se complementan para determinar ciertos factores de corrección. Estos factores van a ser de mucha utilidad para comparar diversos tipos de película y equipos radiográficos y que son necesarios para darle mayor versatilidad al programa de exposición a desarrollarse.

INDICE GENERAL

	Pags.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE FIGURAS	XI
INDICE DE TABLAS	XIII
INDICE DE ABREVIATURAS	XV
CAPITULO I	
INTRODUCCION TEORICA	
1.1 FUENTES DE RADIACION	17
1.2 PENUMBRA GEOMETRICA	21
1.3 DENSIDAD RADIOGRAFICA	26
1.4 EXPOSICION RADIOGRAFICA	28
1.5 ABSORCION DE LA RADIACION	29
1.6 PELICULAS RADIOGRAFICAS	32
CAPITULO II	
DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA EXPOSICION RADIOGRAFICA	
2.1 DENSIDAD RADIOGRAFICA	41
2.1.1 CONDICIONES PARA LA EXPOSICION	

RADIOGRAFICA	43
2.1.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES	48
2.2 DETERMINACION DE LA DENSIDAD RADIOGRAFICA POR ALGORITMOS MATEMATICOS	84
2.3 DETERMINACION DE LA DESVIACION ENTRE LA DENSIDAD EXPERIMENTAL Y ALGORITMICA	85
2.4 DETERMINACION MATEMATICA DEL COEFICIENTE DE CORRECCION DE LA DENSIDAD RADIOGRAFICA	101
2.5 DETERMINACION MATEMATICA DE LA EXPOSICION RADIOGRAFICA	108
2.5.1 REPRESENTACION GRAFICA	111
2.5.2 REPRESENTACION ALGORITMICA	113
2.5.3 APLICACION DEL ALGORITMO MATEMATICO PARA SIMULACION DE LA EXPOSICION	121
CAPITULO III	
DETERMINACION DE FACTORES DE CORRECCION PARA EL USO DE PROGRAMAS DE EXPOSICION RADIOGRAFICA	
3.1 DETERMINACION DE CURVAS SENSITOMETRICAS	125
3.1.1 CONDICIONES PARA LA EXPOSICION RADIOGRAFICA	126
3.1.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES	127
3.2 REPRESENTACION ALGORITMICA DE LAS CURVAS SENSITOMETRICAS	128
3.3 APLICACION DEL ALGORITMO MATEMATICO PARA PROGRAMAS DE EXPOSICION RADIOGRAFICA	132
3.3.1 DETERMINACION DEL FACTOR DE CORRECCION	

PARA CAMBIOS EN EL EQUIPO RADIOGRAFICO...	134
3.3.2 DETERMINACION DEL FACTOR DE CORRECCION	
PARA CAMBIOS EN EL TIPO DE PELICULA	138
CAPITULO IV	
ANALISIS DE RESULTADOS	144
CAPITULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
BIBLIOGRAFIA	153

INDICE DE FIGURAS

- 1.- Espectro característico de la radiación X emitida por un tubo con anticátodo de wolframio.
- 2.- Penumbra Geométrica.
- 3.- Transformación de la radiación incidente al atravesar un material absorbente.
- 4.- Definición objetiva.
- 5.- Curvas características de películas radiográficas.
- 6.- Escalerilla.
- 7.- Representación esquemática del equipo y material experimental.
- 8.- Densidad vs Exposición.
- 9.- Densidad vs Exposición, KV = 120, 1-3-5 mm.
- 10.- Densidad vs Exposición, KV = 120, 7-9-11 mm.
- 11.- Densidad vs Exposición, KV = 140, 1-3-5 mm.
- 12.- Densidad vs Exposición, KV = 140, 7-9-11 mm.
- 13.- Densidad vs Exposición, KV = 140, 13-15 mm.
- 14.- Densidad vs Exposición, KV = 160, 3-5-7 mm.
- 15.- Densidad vs Exposición, KV = 160, 9-11-13 mm.
- 16.- Densidad vs Exposición, KV = 160, 15-17 mm.
- 17.- Densidad vs Exposición, KV = 160, 19-21 mm.
- 18.- Densidad vs Exposición, KV = 180, 3-5-7 mm.
- 19.- Densidad vs Exposición, KV = 180, 9-11-13 mm.
- 20.- Densidad vs Exposición, KV = 180, 15-17-19 mm.
- 21.- Densidad vs Exposición, KV = 180, 21-23-25 mm.
- 22.- Densidad vs Exposición, KV = 200, 5-7-9 mm.

- 23.- Densidad vs Exposición, KV = 200, 11-13-15 mm.
- 24.- Densidad vs Exposición, KV = 200, 17-19-21 mm.
- 25.- Densidad vs Exposición, KV = 200, 23-25 mm.
- 26.- Densidad vs Exposición, KV = 200, 27-29 mm.
- 27.- Densidad vs Exposición, KV = 220, 5-7-9 mm.
- 28.- Densidad vs Exposición, KV = 220, 11-13-15 mm.
- 29.- Densidad vs Exposición, KV = 220, 17-19-21 mm.
- 30.- Densidad vs Exposición, KV = 220, 23-25 mm.
- 31.- Densidad vs Exposición, KV = 220, 27-29 mm.
- 32.- Densidad vs Exposición, KV = 240, 5-7-9 mm.
- 33.- Densidad vs Exposición, KV = 240, 11-13-15 mm.
- 34.- Densidad vs Exposición, KV = 240, 17-19-21 mm.
- 35.- Densidad vs Exposición, KV = 240, 23-25 mm.
- 36.- Densidad vs Exposición, KV = 240, 27-29 mm.
- 37.- Coeficiente b vs Voltaje del tubo (desde 1 a 21 mm).
- 38.- Coeficiente b vs Voltaje del tubo (desde 17 a 31 mm).
- 39.- Exposición vs Espesor (desde 120 a 230 KV).
- 40.- Exposición vs Espesor (desde 240 a 300 KV).
- 41.- Densidad vs Logaritmo de exposición relativa
- 42.- Densidad vs Logaritmo de exposición relativa (para cambios de equipo radiográfico).
- 43.- Densidad vs Logaritmo de exposición relativa (para cambios en el tipo de película con referencia a la densidad).
- 44.- Densidad vs Logaritmo de exposición relativa (para cambios en el tipo de película con referencia a la exposición).

INDICE DE TABLAS

- 1.1.- Clasificación de las películas radiográficas industriales.
- 2.1.- Determinación experimental de la densidad, KV = 120
- 2.2.- Determinación experimental de la densidad, KV = 140
- 2.3.- Determinación experimental de la densidad, KV = 160
- 2.4.- Determinación experimental de la densidad, KV = 180
- 2.5.- Determinación experimental de la densidad, KV = 200
- 2.6.- Determinación experimental de la densidad, KV = 220
- 2.7.- Determinación experimental de la densidad, KV = 240
- 2.8.- Coeficientes a y b para la función lineal densidad.
- 2.9.- Densidad calculada con KV = 120
- 2.10.- Densidad calculada con KV = 140
- 2.11.- Densidad calculada con KV = 160
- 2.12.- Densidad calculada con KV = 180
- 2.13.- Densidad calculada con KV = 200
- 2.14.- Densidad calculada con KV = 220
- 2.15.- Densidad calculada con KV = 240
- 2.16.- Desviación entre la densidad experimental y algoritmica con KV = 120
- 2.17.- Desviación entre la densidad experimental y algoritmica con KV = 140
- 2.18.- Desviación entre la densidad experimental y algoritmica con KV = 160
- 2.19.- Desviación entre la densidad experimental y

- algoritmica con KV = 180
- 2.20.- Desviación entre la densidad experimental y algoritmica con KV = 200
- 2.21.- Desviación entre la densidad experimental y algoritmica con KV = 220
- 2.22.- Desviación entre la densidad experimental y algoritmica con KV = 240
- 2.23.- Valores evaluados y calculados del coeficiente b con referencia a un espesor de 9 mm
- 2.24.- Valores del coeficiente b
- 2.25.- Valores del coeficiente b para voltajes de tubo mayores de 240 KV
- 2.26.- Valores del coeficiente b para voltajes de tubo desde 130 hasta 290 KV
- 2.27.- Valores de la función Exposición para una densidad igual a 2 (Desde 120 hasta 300 KV con incrementos de 20 KV)
- 2.28.- Valores de la función Exposición para una densidad igual a 2 (Desde 130 hasta 290 KV con incrementos de 20 KV)
- 2.29.- Coeficientes M y N para la función Exposición
- 2.30.- Coeficientes A y B para la función densidad
- 3.1.- Exposiciones radiográficas con película D7 (Plancha de acero de 15 mm)
- 3.2.- Exposiciones radiográficas con película D4
- 3.3.- Comparación entre las densidades experimental y algoritmica

INDICE DE ABREVIATURAS

U _g	-Penumbra geométrica
F	-Tamaño del foco o fuente de radiación
t	-Espesor del objeto
d _o	-Distancia foco-objeto
U _i	-Penumbra interna o inherente
D.F.P.	-Distancia mínima foco - película
D	-Densidad radiográfica
I _i	-Intensidad del haz luminoso que se hace incidir sobre la película para su observación
I _t	-Intensidad de luz transmitida
E	-Exposición
M	-Intensidad
T	-Tiempo
I	-Intensidad de la radiación emergente
I _o	-Intensidad de radiación incidente
u	-Coeficiente de absorción lineal
ASTM	-American Society of Testing and Materials
c	-Contraste
a	-Coeficiente que depende del espesor del material y el voltaje del tubo
b	-Coeficiente que depende del espesor del material y el voltaje del tubo
A	-Coeficiente gobernado por el espesor del material y el voltaje del tubo
B	-Coeficiente gobernado por el espesor del material

y el voltaje del tubo

- M -Coeficiente gobernado por el voltaje del tubo
- N -Coeficiente gobernado por el voltaje del tubo
- β -Logaritmo de exposición relativa
- C -Coeficiente de caracterización de la película
- D -Coeficiente de caracterización de la película
- β_c -Logaritmo de exposición relativa calculada
- E_1 -Exposición calculada
- E_2 -Exposición real
- K_2 -Factor de corrección para el equipo disponible
- K_1 -Factor de corrección para el tipo de película



CAPITULO I

INTRODUCCION TEORICA

1.1 Fuentes de radiación.

En la radiología industrial se utilizan dos tipos de fuentes de radiación que responden a principios físicos completamente distintos. En el caso de los rayos X, la fuente emisora de la radiación es un tubo electrónico más o menos complejo, cuyo funcionamiento requiere un cierto consumo de energía eléctrica. Por el contrario, las fuentes emisoras de radiación gamma, son fuentes isotópicas que generan la radiación por un proceso espontáneo e irreversible implicado en determinadas reacciones nucleares, por lo que estas fuentes, radian constantemente sin consumo de energía y únicamente van perdiendo actividad con el tiempo. Como la experiencia a realizarse va a ser llevada a cabo con rayos X, nos limitaremos a hablar exclusivamente de ella.

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

energía, chocan contra un obstáculo material cualquiera.

Cuando un electrón con suficiente energía interacciona con un electrón orbital de un átomo puede crearse una radiación X "característica", llamada así porque depende de la estructura característica del átomo que la engendró. Existe, también, la posibilidad de que el electrón choque contra el núcleo del átomo, en cuyo caso la energía del electrón se transforma en un cuanto de radiación, produciéndose la radiación correspondiente al espectro continuo o "radiación de frenado", que no depende de las características del átomo que ha sufrido el impacto del electrón. De todo ello resulta que, en el espectro continuo, correspondiente a la radiación de frenado, se superponen discontinuidades de la intensidad para determinadas longitudes de onda, correspondientes a la radiación característica del elemento de que se trate. Al ser emitidas las dos radiaciones simultáneamente se obtiene el correspondiente espectro característico (Fig. 1).

Para crear las condiciones requeridas para producir o engendrar la radiación X, es preciso disponer de:

a) - una fuente de electrones (cátodo)

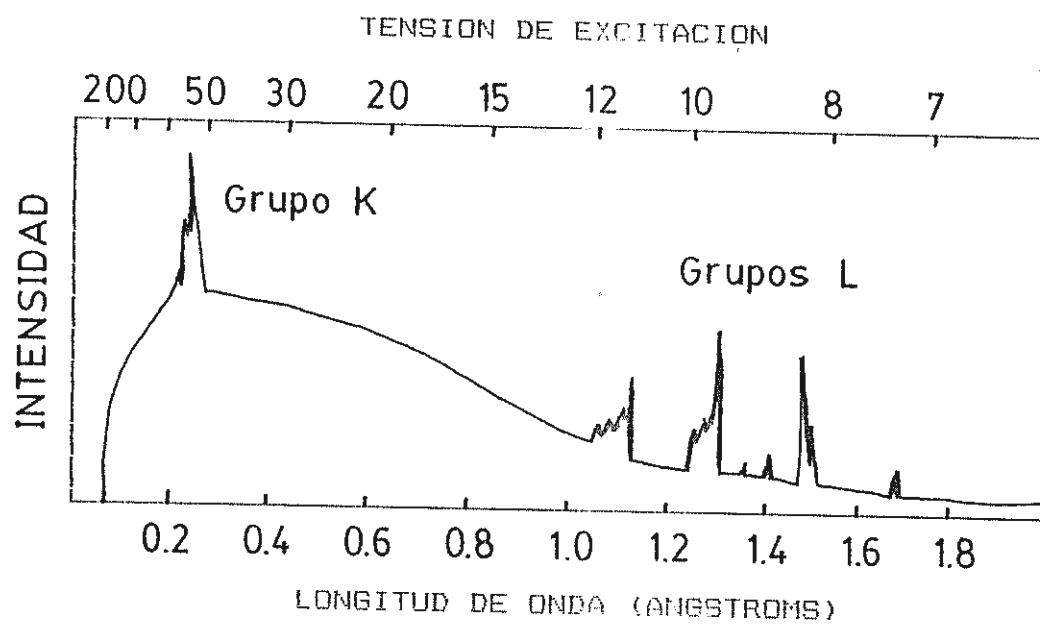


FIGURA 1

ESPECTRO CARACTERISTICO DE LA RADIACION X EMITIDA
POR UN TUBO CON ANTICATODO DE WOLFRAMIO (REF. 1)

- b) - un material que actúe como blanco y contra el cual choquen los electrones (anticátodos)
- c) - un medio para acelerar estos electrones y hacer que choquen contra el anticátodo animados de gran velocidad (circuito eléctrico generador de alta tensión).

La radiación X así producida presenta como características principales las siguientes:

- a) - la emisión de un tubo de rayos X comprende un fondo continuo, en el cual se superponen, en condiciones favorables, las radiaciones características;
- b) - la intensidad del fondo continuo crece con el número atómico del metal que forma el anticátodo, pero el aspecto de la curva es el mismo para todos los elementos;
- c) - un aumento de la tensión utilizada ocasiona un aumento de la intensidad siguiendo una ley de cuadrados;
- d) - un aumento de la tensión hace que la radiación sea más penetrante;
- e) - para una tensión dada, la intensidad de la radiación en todas sus longitudes de onda es directamente proporcional a la intensidad de la corriente de alimentación del tubo;

f) - la cantidad de energía que lleva un electrón del haz emitido por el cátodo y que es transformada en radiación X es muy pequeña.

La necesidad de tener que examinar espesores cada vez más fuertes, hace que sea preciso disponer de radiaciones de mayor poder de penetración. Como se ha indicado, el aumento de la tensión de excitación que se aplica a un tubo de rayos X, determina el poder de penetración de la radiación engendrada. Cuanto mayor sea esta tensión, tanto mayor será la energía del electrón, menor la longitud de onda de la radiación y mayor su poder de penetración.

1.2 Penumbra geométrica.

Los focos emisores de radiación X y las fuentes de radiación gamma, al igual que las fuentes luminosas, tienen en la práctica unas dimensiones finitas. En este caso, cada punto del foco o fuente emisora de radiación se comporta como si estuviera aislado y da lugar a la formación de una sombra; la superposición de estas sombras reduce las dimensiones de la sombra propiamente dicha, apareciendo ésta rodeada de una zona menos iluminada, que es la "penumbra" y que podemos designar como "penumbra geométrica".

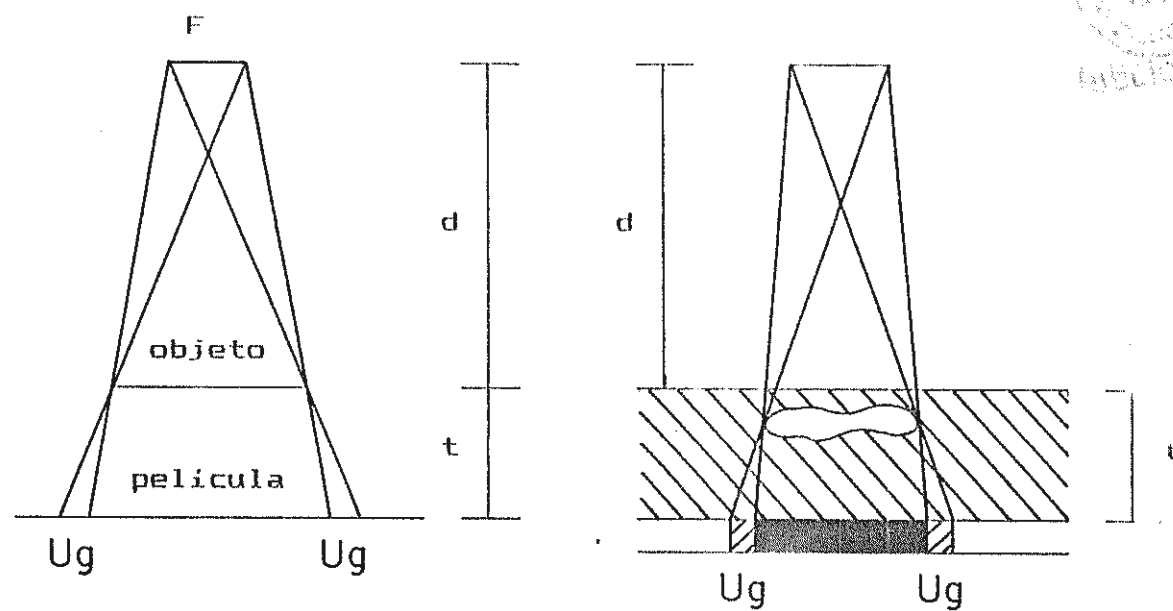


FIGURA 2

PENUMBRA GEOMETRICA (REF. 1)

La distancia foco-pantalla, o bien, en el caso de la radiografía, foco-película (Fig. 2) para reducir al valor mínimo el valor de la penumbra geométrica, depende de las dimensiones del foco emisor de la radiación y de las distancias foco-objeto y objeto-película. El valor de esta penumbra viene dado por la ecuación:

$$U_g = \frac{F \cdot t}{d_o} \quad (1.1)$$

en la cual:

U_g = penumbra geométrica.

F = tamaño del foco o fuente de radiación.

t = espesor del objeto.

d_o = distancia foco-objeto.

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

La nitidez de la imagen radiográfica es afectada, además de por la penumbra geométrica y de la debida al proceso, por otro factor que podemos denominar "penumbra interna o inherente" U_i , que depende del tipo de película radiográfica utilizada y de la energía de la radiación empleada.

Cuando la radiación X o gamma penetra en una emulsión fotográfica choca con los átomos que la forman y se da lugar a una emisión de electrones que, al dirigirse en todas direcciones, actúan sobre los granos de halogenuro de plata y los activan de forma análoga a como ocurre con la radiación incidente. El resultado es que al revelar la película aparecen granos de plata, no solamente en las zonas en las que ha actuado la radiación, sino también en una zona próxima alrededor de la expuesta, originándose así una penumbra.

La penumbra, que podemos llamar total depende, esencialmente, de los factores considerados. Ahora bien, si eliminamos las causas de movimiento de la fuente emisora, el objeto o la película, una vez determinado el tipo de película y de radiación que se va a utilizar, la falta de definición depende únicamente de la penumbra geométrica.

Como ya se dijo anteriormente la distancia foco-película es un factor importante en la penumbra geométrica, por lo tanto para una distancia foco objeto d_o , y un espesor de éste t , la distancia foco-película, teniendo en cuenta que ésta debe estar tan próxima como sea posible a la zona del objeto que se radiografía, la distancia foco-película será:

$$D.F.P. = d_o + t \quad (1.2)$$

como por otra parte, se conoce el valor de la penumbra U_g , sustituyendo valores y considerando el valor que se establezca para la penumbra se tendrá que el valor mínimo aconsejable para la D.F.P. que permita obtener una imagen de buena calidad, será:

$$D.F.P. = \frac{F t}{U_g} + t \quad (1.3)$$

expresión en la cual:

D.F.P. = distancia mínima foco-película

F = tamaño efectivo del foco o fuente emisora

t = espesor atravesado por la radiación

U_g = valor de la penumbra geométrica

Tomando como base las recomendaciones obtenidas en el código ASME (Ref. 2), encontramos que para el valor

de la penumbra geométrica se establece que estos no deben ser superiores a los siguientes:

<u>Espesor del material</u>	<u>Penumbra máxima</u>
Hasta 51 mm	0,5 mm
$51 < t < 76$ mm	0,76 mm
$76 < t < 102$ mm	1,00 mm
$t > 102$ mm	1,80 mm

Como tamaño efectivo del foco emisor F, se tomará la dimensión máxima de la fuente radioactiva o de la mancha focal del tubo de rayos X, tal como se ve desde el lugar en que está situada la película. Para fuentes radiactivas cilíndricas, sin colimador o mancha focal rectangular, el tamaño efectivo no es el diámetro o la longitud del lado mayor, sino el valor de la diagonal que se proyecta sobre la película. En el caso de fuentes radiactivas que se utilicen con colimador se tomará como valor de F su diámetro.

1.3 Densidad radiográfica.

El ennegrecimiento que se produce en la película radiográfica, una vez que se ha sometido al tratamiento adecuado, es función de la cantidad de plata metálica depositada por unidad de superficie, dependiendo a su vez de la cantidad de radiación

absorbida por la emulsión sensible de la película .
El término empleado, tanto en fotografía como en radiología, para designar el grado de ennegrecimiento de una película expuesta a la acción de una radiación es el de "densidad radiográfica" y se define como:

$$D = \log. \frac{I_i}{I_t} \quad (1.4)$$

siendo:

I_i = intensidad del haz luminoso que se hace incidir sobre la película para su observación.

I_t = Intensidad de la luz transmitida.

D = Densidad radiográfica.

La relación I_i/I_t es llamada "opacidad óptica" de la película y su valor recíproco "transmitancia". Para una película que transmita íntegramente la luz incidente. o sea, en la cual $I_i = I_t$, la opacidad será igual a 1 y su densidad radiográfica $D = 0$. En la película que transmita la mitad de la luz, la opacidad será 2 y $D = 0,3$. Las películas que transmiten 1/10, 1/100, 1/1000 de la luz incidente tienen una opacidad respectiva de 10, 100 y 1000, mientras que sus correspondientes densidades serán 1, 2 y 3.

En el Código ASME , se especifica que la densidad radiográfica, en la zona sobre la que ha de hacerse la interpretación, tendrá un valor mínimo de 1,8 para las radiografías obtenidas con rayos X y cuya interpretación se haga sobre una sola película; la densidad máxima, será igual a 4 (Ref. 2).

1.4 Exposición radiográfica.

La cantidad total de radiación emitida por un tubo de rayos X, depende de: la intensidad de la corriente que circula por el tubo (mA), tensión de excitación (kV) y de la duración de estas dos acciones o tiempo de exposición (T). Sin embargo, teniendo en cuenta que la intensidad de la corriente, o cuando menos su valor máximo, viene determinado por las características del tubo, resulta recomendable trabajar siempre con un valor establecido de esta intensidad. Como por otra parte, en función del espesor del material que se ha de radiografiar se habrá fijado el valor de la tensión de excitación, resulta que la cantidad de radiación es directamente proporcional al tiempo de exposición lo cual permite establecer que:

$$E = M T \quad (1.5)$$

en cuya expresión:

E = exposición.

M = intensidad en mA.

T = tiempo.

Lo cual permite dar el valor de la exposición en términos de mA.min o mA.sec sin tener que dar los valores de la intensidad de corriente ni del tiempo.

1.5 Absorción de la radiación.

El mecanismo de la absorción de la radiación por los cuerpos es bastante complicado. Esquemáticamente, la absorción de la radiación obedece a la siguiente ley:

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1.6)$$

en la que

I_0 = intensidad de la radiación incidente.

I = intensidad de la radiación emergente.

μ = coeficiente de absorción lineal.

t = espesor del material absorbente.

Se puede admitir que, cuando la radiación atraviesa un cuerpo (Fig. 3), las dos formas básicas de radiación que emergen son: radiación primaria transmitida no modificada y radiación secundaria

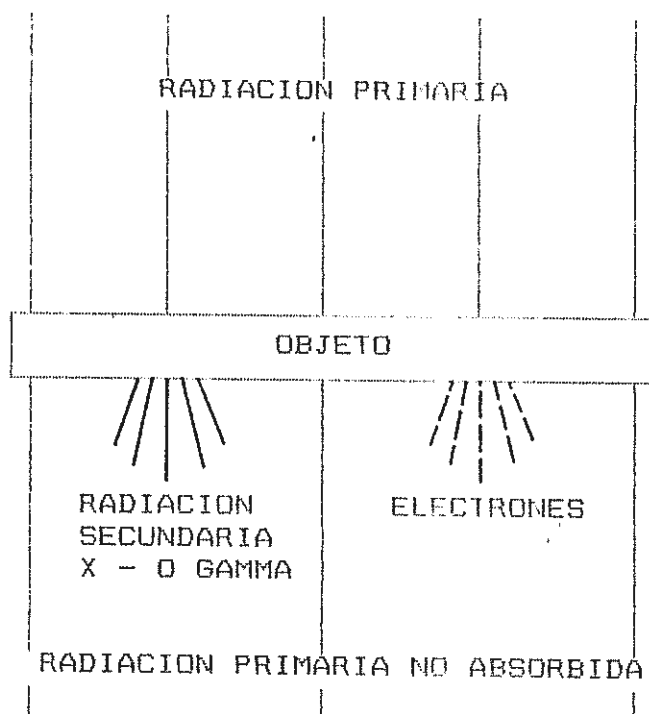


FIGURA 3

TRANSFORMACION DE LA RADIACION INCIDENTE
AL ATRAVESAR UN MATERIAL ABSORBENTE (REF. 1)

modificada. La radiación primaria es la que ha seguido una trayectoria rectilínea desde la fuente emisora a través del material que se va a examinar, sin que en ella se hayan producido en ella fenómenos de absorción o desviación. Este es el componente de radiación útil registrado y medido en un examen radiográfico.

La radiación que ha sufrido alteración o cambio por el mecanismo de absorción o difracción se denomina radiación secundaria o modificada. Aunque la longitud de onda de esta radiación varía entre amplios límites, la mayor parte corresponde a radiaciones blandas poco penetrantes, lo que no excluye que una parte apreciable de ellas emerja del objeto examinado, dando lugar a efectos no deseados. Las posibilidades de ésta radiación secundaria disminuyen a medida que aumenta la energía de la radiación incidente.

Una parte de la radiación que atraviesa un cuerpo, especialmente la radiación secundaria, es difundida en todos los sentidos por los átomos que constituyen el objeto radiografiado. Esta radiación, cuya cantidad crece al aumentar el espesor del objeto produce sobre la película radiográfica un velo

uniforme que reduce el contraste y resta definición a la imagen radiográfica.

1.6 Películas radiográficas.

La película radiográfica es básicamente análoga a la empleada en fotografía. Ambas presentan como componentes fundamentales una "capa sensible" constituida por una suspensión de halogenuros de plata en gelatina, extendida en forma de capa fina (aprox. 0,025 mm) sobre un soporte transparente. La diferencia fundamental entre la película fotográfica normal y la radiográfica es que esta última presenta dos capas de emulsión, una por cada lado del soporte o "base". De esta forma se consigue reducir el tiempo de exposición y obtener una imagen radiográfica más contrastada.

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

Las películas radiográficas industriales se clasifican, de acuerdo con la norma ASTM en cuatro grandes grupos o tipos (Tabla 1.1), en función de su rapidez, contraste y tamaño de grano (Ref. 3).

Cuando se observa una radiografía por transparencia mediante un iluminador (negatoscopio) adecuado, se ve la imagen como variaciones en la intensidad de la luz transmitida a través de las diferentes densidades de la película. La diferencia de densidad entre dos zonas adyacentes se denomina "contraste". Por ejemplo, el contraste C entre dos zonas que presentan densidades $D_1 = 1.5$ y $D_2 = 3.2$ será

$$C = 3.2 - 1.5 = 1.7$$

El paso de una densidad D_1 a otras densidad D_2 en dos regiones contiguas no tiene lugar de una forma brusca, sino que existe una zona más o menos amplia, en la que se pueden observar una serie de densidades intermedias, cuanto más estrecha sea esta zona tanto mejor "definición" la imagen radiográfica. (Fig. 4).

Los conceptos de contraste y definición, tal y como, han sido definidos, dependen de la radiografía en si y para nada de la apreciación del observador, en su consecuencia pueden ser designados como "contraste

TABLA 1.1

CLASIFICACION DE LAS PELICULAS RADIOGRAFICAS INDUSTRIALES

(REF. 3)

PELICULA TIPO	CARACTERISTICAS		
	RAPIDEZ	CONTRASTE	TAMAÑO DE GRANO
1	LENTA	MUY ALTO	MUY PEQUEÑO
2	MEDIA	ALTO	PEQUEÑO
3	ALTA	MEDIO	GRANDE
4 a)	MUY ALTA a)	MUY ALTO a)	b)
<p>a) PELICULA PARA SER UTILIZADA CON PANTALLAS REFORZADORAS FLUORESCENTES. CUANDO ESTAS PELICULAS SE EX- PONEN DIRECTAMENTE O CON PANTALLAS DE PLOMO, SU RAPI- DEZ CONTRASTE Y TAMAÑO DE GRANO SON MEDIOS.</p> <p>b) EL TAMAÑO DE GRANO DEPENDE DE LAS CARACTERISTICAS DE LAS PANTALLAS FLUORESCENTES UTILIZADAS.</p>			

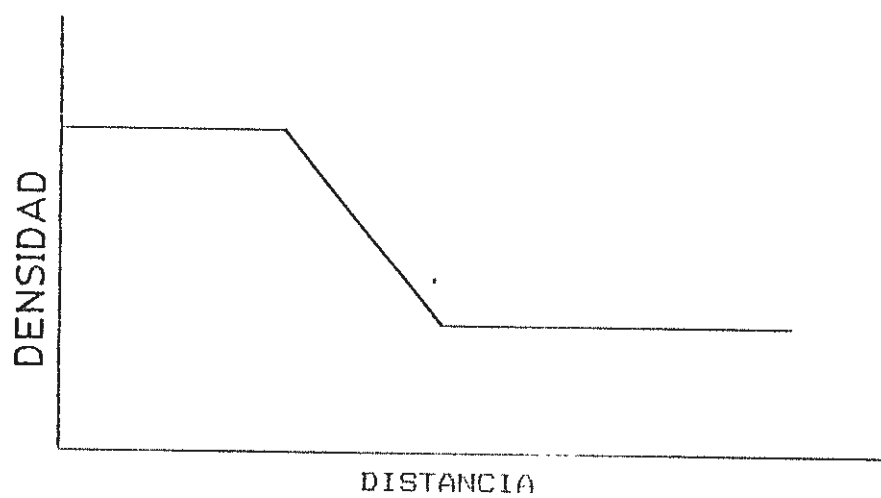
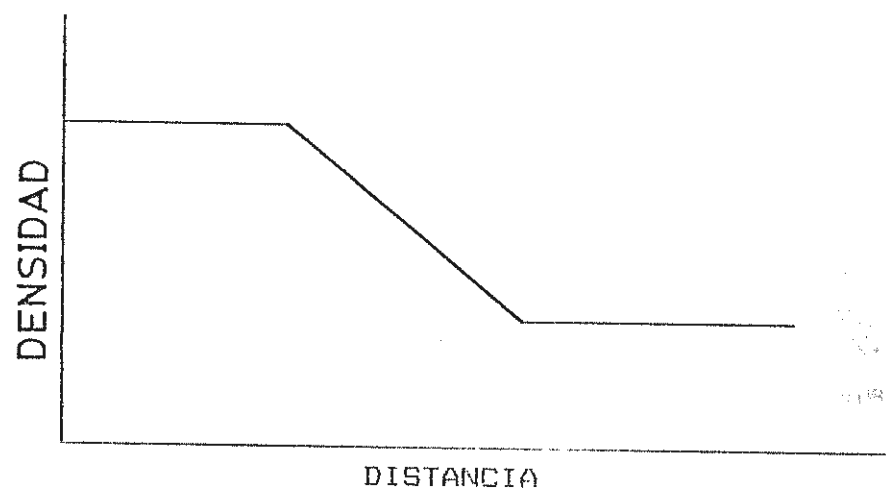


FIGURA 4

DEFINICION OBJETIVA (REF. 1)

objetivo" y "definición objetiva". Ahora bien, el contraste percibido por el observador, al depender de las condiciones en las que la observación se realice y del propio observador, es un "contraste subjetivo".

Este contraste, a diferencia de lo que ocurre con el contraste objetivo, no puede ser medido y depende de un gran número de factores, encontrándose entre los más importantes la intensidad y el color de la iluminación, el tamaño del campo observado, el gradiente de densidad, el grado de iluminación del lugar en que se observa la película y el deslumbramiento producido por las zonas que transmiten una gran cantidad de luz. Análogamente, mientras que la definición objetiva puede medirse con un densitómetro, haciendo una serie de medidas a lo largo de una banda que atraviere las zonas contiguas de distancia densidad, existe una "definición subjetiva" que depende del valor de la diferencia de luz transmitida por dos campos próximos, de tal forma que, cuanto mayor sea esta diferencia tanto mejor será la definición subjetiva; es decir, la definición subjetiva queda influenciada por el contraste, de tal forma que en dos imágenes con la misma definición objetiva, aquella que presente mejor contraste es la que un observador normal considerará como mejor definida.

Las películas radiográficas, al igual que todas las películas fotográficas, pueden ser comparadas entre sí de una forma cualitativa en cuanto se refiere a su rapidez y contraste. No obstante, para un mejor conocimiento de las películas y sus posibilidades de aplicación, es preciso realizar un examen cuantitativo de lo que los términos contraste y rapidez, representan. Para este examen cuantitativo, se determinan las "curvas características", "curvas sensitométricas" o "curva H-D" (Hurter-Driffield) de las películas, que relaciona la exposición aplicada a una película con la densidad resultante, obtenida en condiciones de procesamiento de las películas previamente establecidas y normalizadas.

La figura 5 muestra las curvas características correspondientes a los cuatro tipos de películas indicados en la tabla 1.1. Si se observan estas curvas, se aprecia en primer lugar que ninguna de ellas comienza en la densidad cero. Esto se debe a que toda película presenta una pequeña densidad inherente o "velo", que puede ser medida sobre una película que no haya sido expuesta y que se ha procesado en condiciones normales. La aparición de este velo se debe fundamentalmente a dos causas: en primer lugar a la absorción de la luz por el soporte o base y en segundo lugar a la aparición del velo

CURVAS CARACTERISTICAS DE PELICULAS RADIOGRAFICAS (REF. 1)

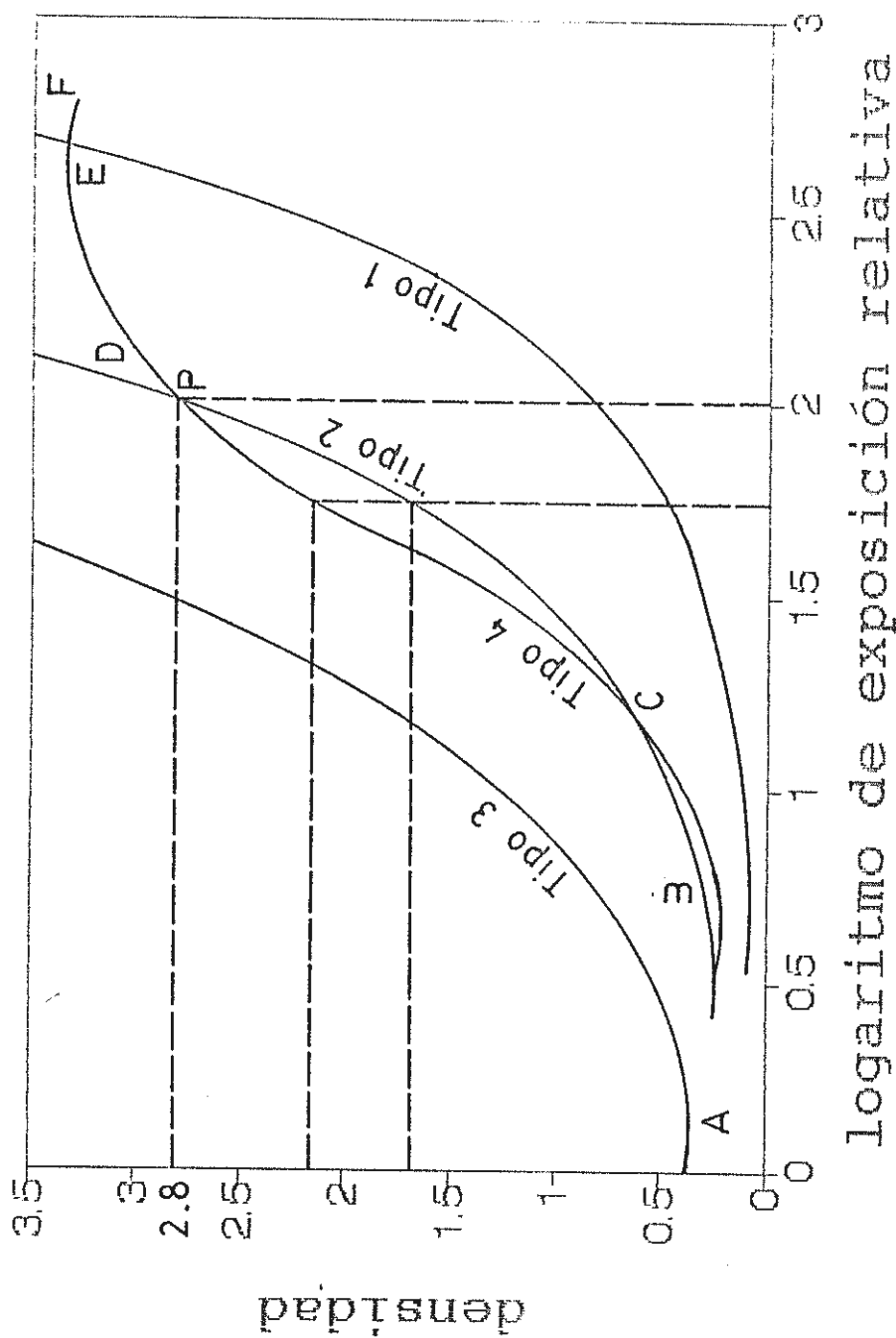


FIGURA 5

químico como consecuencia de la acción ejercida por los reactivos químicos utilizados en los baños de revelado y fijado sobre la emulsión.

Estas curvas características permiten explicar las propiedades relativas de las películas. Así por ejemplo, comparando las curvas 2 y 4, puede verse que:

- a) - la película 4 tiene un velo superior al de la película 2.
- b) - en las zonas bajas de las curvas las densidades obtenidas con exposiciones iguales son mayores para la película 4 que para la 2, en su consecuencia la película 4 es más rápida que la 2.
- c) - en el punto P, se cortan ambas curvas y al que le corresponde una densidad igual a 2,8 y un logaritmo de la exposición relativa de 2,07, ambas películas tienen la misma rapidez.
- d) - por encima de la densidad 2,5 el contraste de la película 2 continúa aumentando con la exposición mientras que en la película 4 decrece gradualmente.

Asimismo, es posible hacer una comparación cuantitativa del rendimiento en contraste de ambas películas, para lo cual no hay más que comparar las

densidades conseguidas en cada una de ellas con dos exposiciones distintas. En el caso a que nos estamos refiriendo, si comparamos las exposiciones cuyos logaritmos de la exposición relativa son 2,07 y 1,80 se tiene:

$$\text{película 2, } D2 - D1 = 2,8 - 1,64 = 1,16$$

$$\text{película 4, } D2 - D1 = 2,8 - 2,18 = 0,62$$

en su consecuencia, la película 2 tiene mejor contraste que la 4. Esto se aprecia claramente en el gráfico, ya que la curva 2 presenta una pendiente mucho más marcada que la curva 4, para la misma zona de exposiciones.

CAPITULO II

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA EXPOSICION RADIOGRAFICA.

2.1 Densidad radiográfica

La densidad radiográfica puede ser determinada por medio de dos diferentes aproximaciones:

- a) por un número extensivo de datos experimentales, y
- b) por algoritmos matemáticos.

La primera aproximación involucra la identificación de la densidad a través de la exposición con la ayuda de parámetros previamente asumidos. Estos parámetros serán explicados posteriormente.

El número extensivo de datos experimentales es el resultado de la gran cantidad de variables afectadas que son consideradas en esta experiencia.

En el segundo caso, el valor de la densidad es derivado por la interpolación de los diversos datos de exposición, obviamente la interpolación es limitada a un rango de aplicación y por lo tanto

requiere una cantidad apreciable de datos experimentales inclusive superior al primer caso.

En esta experiencia se deberán tomar aproximadamente 300 exposiciones con el mismo objeto de prueba y con el mismo tipo de película debiendo tomarse en cuenta que las reexposiciones experimentales son inevitables.

El primer paso a seguirse es establecer los parámetros de exposición a fin de obtener la densidad radiográfica. Estos parámetros son establecidos sobre las bases de las condiciones de exposición, relacionado con:

- El material y espesor de lo radiografiado.
- La distancia fuente-película.
- El tipo de película usado.
- El tipo de pantallas intensificadoras.

Existen factores adicionales que influyen en la exposición, relacionados con el proceso de revelado de la película.

- Tipo de químicos.
- Tiempo de revelado.
- Temperatura de las soluciones.

El proceso de revelado deberá ser controlado chequeando periódicamente las soluciones, de lo contrario obtendremos películas que no estarán acorde con la experiencia y por lo tanto se perderá material y tiempo.

2.1.1 Condiciones para la exposición radiográfica.

La exposición experimental tiene que ser realizada sobre una escalerilla de acero, de 38 x 130 mm en tamaño, que contiene 13 escalones de 1 a 13 mm de espesor con incrementos de 1 mm tal como se muestra en la figura 6. Ahora bien, como se van a realizar exposiciones hasta un espesor de 31 mm, se deberá aumentar a la escalerilla 2 planchas de acero, que contienen las mismas dimensiones de la escalerilla pero con espesores de 6 y 12 mm para cada una de las planchas.

Todas las exposiciones tiene que ser llevadas a cabo por un equipo radiográfico tipo "Seifert" con una distancia constante de fuente a película de 70 cm.

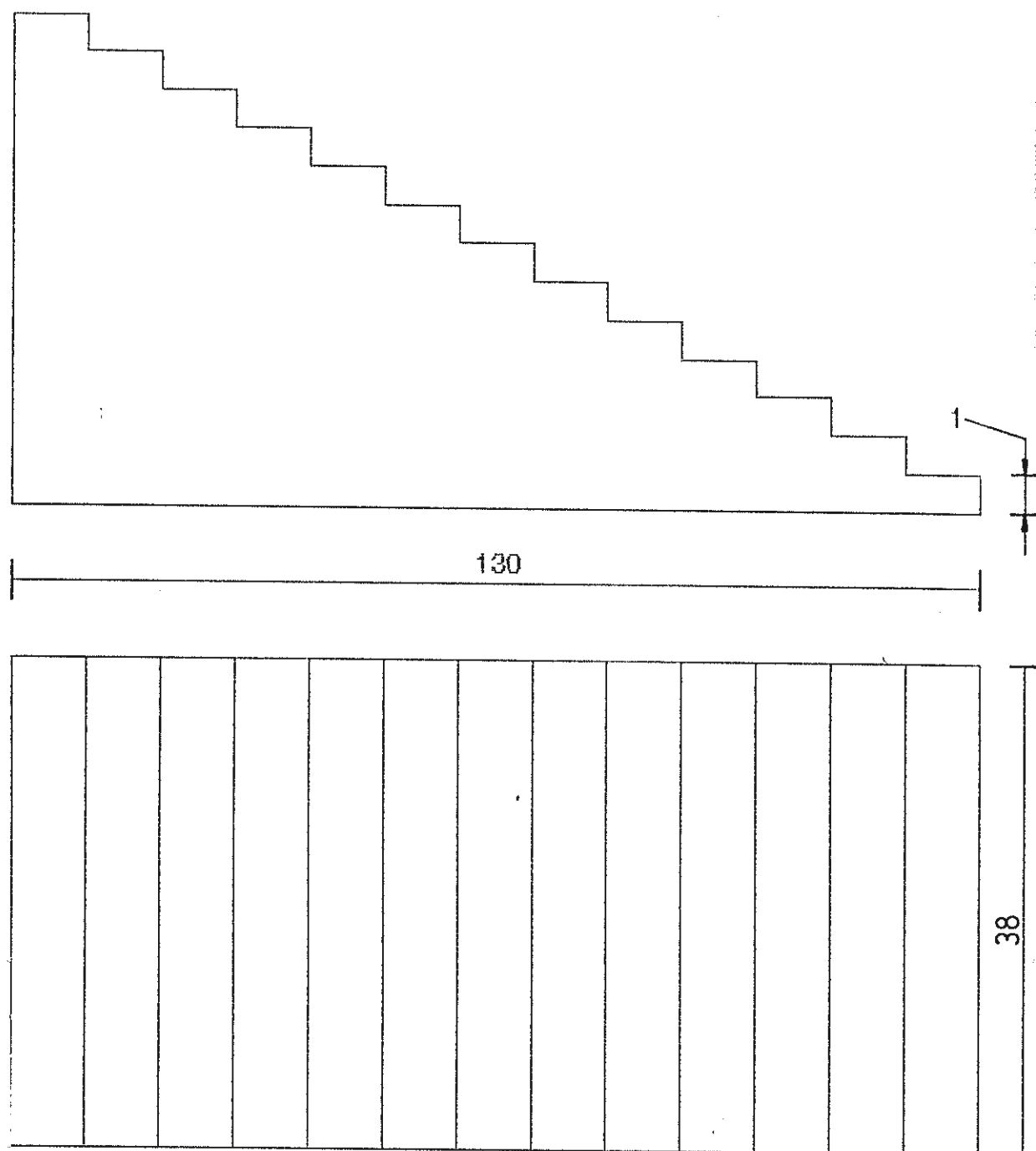


FIGURA 6
ESCALERILLA

El tipo de película a usarse es Struct D7 con pantallas de plomo. La exposición deberá realizarse con la escalerilla en posición perpendicular a la fuente de radiación, la película tiene que ser colocada en el suelo con la interposición de una plancha de plomo de 10 mm de espesor tal como lo indica la figura 7.

El plan experimental ha sido concebido tomando en cuenta las siguientes variables:

- a) voltaje del tubo (KV);
- b) exposición en mA.min.

Siete voltajes han sido seleccionados, con incrementos de 20 KV empezando desde 120 KV, estos son:

120 - 140 - 160 - 180 - 200 - 220 - 240 KV

Para cada valor de voltaje se deberán realizar 12 exposiciones en los siguientes niveles:

1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 7 - 9 - 12 - 16 - 20 -
25 - 30 mA.min.

Una vez que la película ha sido tomada y posteriormente revelada la densidad será evaluada en un densitómetro digital. Si se obtienen densidades inconsistentes con

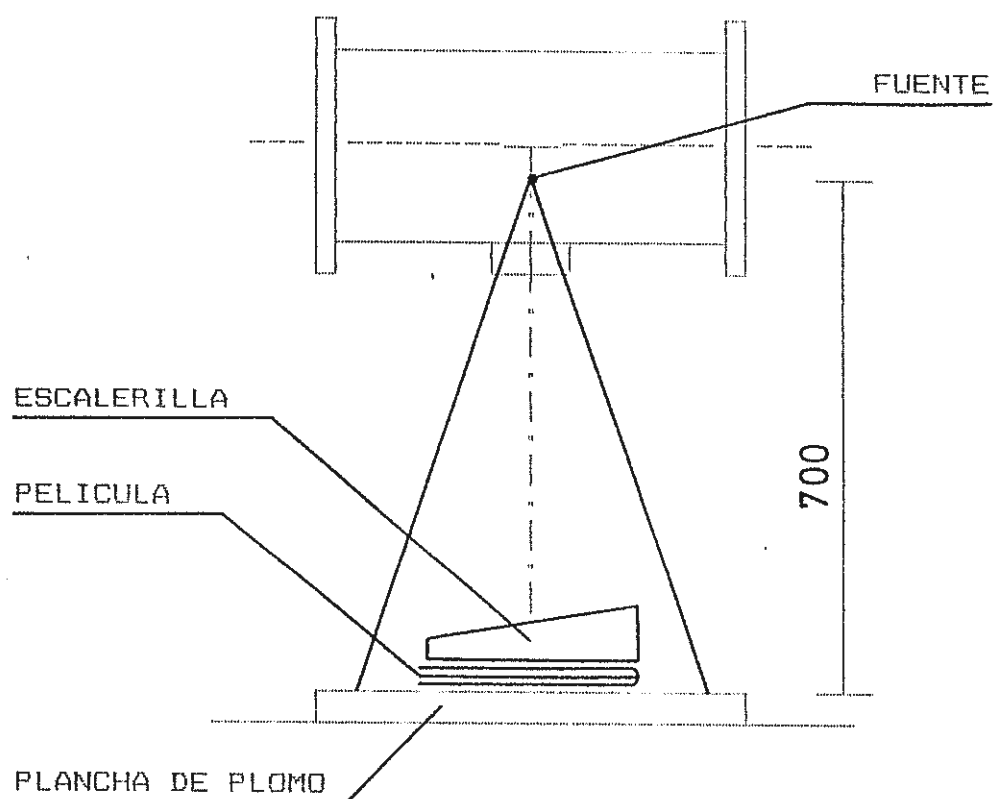
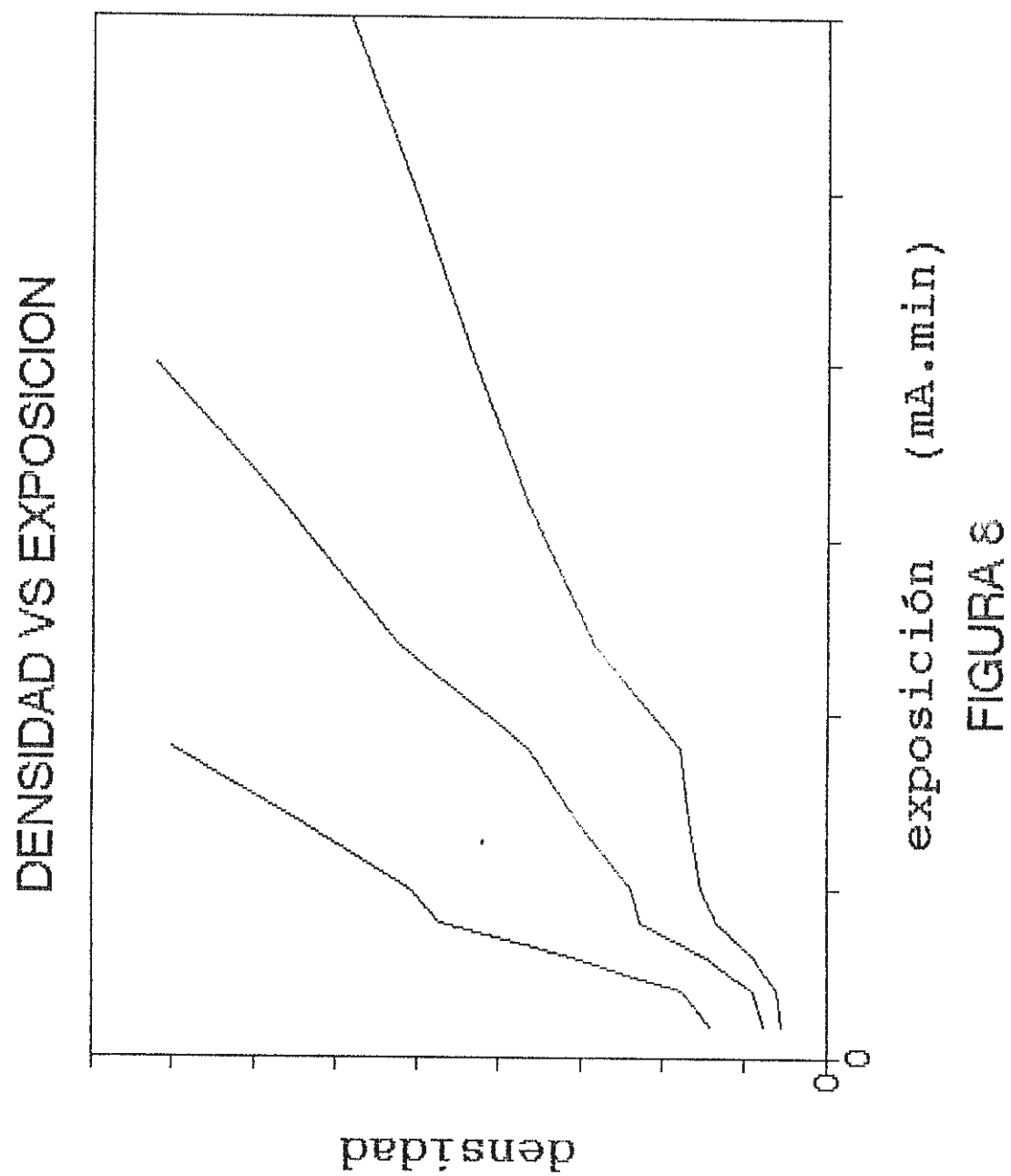


FIGURA 7

REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL EQUIPO Y MATERIAL
EXPERIMENTAL (REF. 4)



variaciones aceptables sobre una base razonable, una nueva exposición deberá llevarse a cabo para ratificar o rectificar los valores de la densidad experimental.

Posteriormente, para cada uno de los voltajes, se realiza el gráfico densidad versus exposición con los valores de densidad obtenidos tal como lo indica la figura 8, por último cada curva obtenida deberá ser rectificadas por el método de los mínimos cuadrados (Ref. 5).

2.1.2 Resultados experimentales.

En las siguientes páginas se detallan los resultados experimentales de acuerdo al plan previamente trazado.

Para cada voltaje de tubo usado en la experiencia, los resultados se muestran de la siguiente manera:

- a) Evaluación de la densidad para varios espesores (tablas 2.1 a 2.7);
- b) Gráficos de densidad versus exposición con sus respectivas líneas de rectificación (figuras 9 a 36).

TABLA 2.1

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD KV = 120

EXPOSIC. m ² .min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1	0.96	0.8	0.71	0.61	0.56	0.53	0.45	0.35	0.32							
2	1.26	1.21	0.94	0.71	0.59	0.55	0.5	0.37	0.35							
3	1.76	1.26	0.95	0.7	0.6	0.54	0.54	0.38	0.38							
4	2.13	1.75	1.29	0.8	0.66	0.6	0.56	0.4	0.38							
5	2.54	1.95	1.29	0.94	0.68	0.6	0.59	0.43	0.39							
7	2.91	2.13	1.27	0.93	0.69	0.6	0.59	0.45	0.38							
9	3.53	2.54	1.33	0.93	0.72	0.62	0.6	0.4	0.37							
12		3	1.61	1.05	0.77	0.59	0.59	0.41	0.39	0.39						
16		3.71	1.85	1.03	0.8	0.64	0.63	0.41	0.39	0.38						
20			2.22	1.26	0.95	0.67	0.66	0.42	0.37	0.37						
25			2.64	1.92	1.03	0.68	0.62	0.43	0.36	0.36						
30			3.34	2.25	1.42	0.98	0.9	0.47	0.36	0.36						

TABLA 22

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD KV = 140

EXPOSIC. mA.min	E S P E S O R m m														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
1	1.03	1.03	0.8	0.73	0.66	0.63	0.66	0.69	0.69	0.68					
2	1.57	1.21	0.93	0.86	0.77	0.69	0.66	0.4	0.39	0.38					
3	1.94	1.60	1.15	1.03	0.87	0.76	0.7	0.4	0.39	0.38					
4	2.09	1.78	1.26	1.1	0.92	0.83	0.71	0.42	0.42	0.39					
5	2.66	2	1.6	1.4	1.29	0.97	0.85	0.43	0.42	0.41	0.29				
7		2.54	1.96	1.6	1.33	1.03	0.9	0.44	0.43	0.4	0.39	0.38			
9		2.65	2	1.65	1.42	1.27	0.95	0.46	0.45	0.42	0.41	0.4			
12			2.48	1.93	1.46	1.3	1.1	0.47	0.45	0.42	0.41	0.4			
16			2.66	2	1.74	1.48	1.07	0.48	0.45	0.41	0.4	0.39			
20			2.66	2.13	1.84	1.42	1.28	0.48	0.43	0.4	0.4	0.39			
26				2.4	2.17	1.69	1.09	0.6	0.44	0.42	0.4	0.4			
30				2.76	2.25	1.9	1.34	0.65	0.44	0.42	0.4	0.39	0.38		

TABLA 23

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD KV = 160

EXPOSIC. mÁ min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1	2.02	1.3	1	0.93	0.98	0.75	0.7	0.45	0.42	0.41	0.4	0.39	0.39	0.38		
2		1.88	1.55	1.35	1.21	1.01	0.75	0.55	0.43	0.42	0.4	0.39	0.39	0.38		
3		2.45	1.83	1.49	1.3	1.1	0.8	0.6	0.46	0.44	0.42	0.41	0.39	0.38		
4		2.84	2.23	1.66	1.4	1.2	0.85	0.65	0.48	0.45	0.42	0.4	0.38	0.38		
5		3.4	2.45	2.13	1.49	1.23	0.91	0.71	0.5	0.46	0.44	0.42	0.4	0.4		
7			3.02	2.22	1.81	1.24	1.1	0.84	0.55	0.47	0.43	0.42	0.41	0.4		
9			3.33	2.78	2.05	1.61	1.23	0.94	0.7	0.6	0.47	0.44	0.41	0.4		
12			3.9	3	2.5	1.78	1.31	0.95	0.74	0.53	0.5	0.45	0.43	0.41	0.4	
16				3.83	2.78	1.92	1.4	0.98	0.76	0.63	0.51	0.45	0.44	0.42	0.41	
20					3.15	2.23	1.42	1	0.77	0.65	0.52	0.43	0.45	0.42	0.41	
25					3.43	2.44	1.45	1.01	0.8	0.67	0.54	0.49	0.48	0.42	0.41	
30						2.9	1.6	1.03	0.84	0.72	0.54	0.49	0.43	0.47	0.47	0.46

TABLA 2.4

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD $KV = 180$

EXPOSIC. m.k.min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1	2.81	1.89	1.5	1.25	1.04	1	0.75	0.65	0.55	0.49	0.46	0.45	0.39	0.35		
2	3.02	2.45	2.19	1.97	1.65	1.25	0.95	0.82	0.69	0.53	0.5	0.47	0.3	0.3		
3		2.25	2.6	2.21	1.85	1.33	1	0.94	0.65	0.57	0.53	0.49	0.31	0.3		
4		3.68	3.01	2.55	1.93	1.53	1.23	1.05	0.79	0.63	0.55	0.5	0.3	0.29		
5			3.63	2.74	2.31	1.67	1.29	1.12	0.82	0.72	0.56	0.51	0.3	0.3		
7				3.19	2.7	2.05	1.62	1.27	0.95	0.8	0.56	0.51	0.35	0.24	0.22	
9				3.37	2.95	2.14	1.81	1.31	0.93	0.84	0.67	0.57	0.4	0.33	0.35	
12					3.73	3	2.95	1.4	1.12	0.95	0.67	0.6	0.41	0.38	0.35	
16						3.44	2.9	1.55	1.51	1.22	0.72	0.63	0.47	0.41	0.35	
20							3.32	2.6	1.96	1.6	0.85	0.65	0.53	0.32	0.26	
25							3.54	2.75	1.98	1.7	0.89	0.74	0.45	0.4	0.27	
30								2.89	1.99	1.75	1.11	0.85	0.72	0.62	0.53	

TABLA 2.5

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD KV = 200

EXPOSIC. m ² ,min	E S P E S O R mm															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1	2.82	2.8	1.75	1.55	1.33	1.04	0.8	0.73	0.6	0.55	0.5	0.45	0.39	0.3	0.29	
2	2.85	2.84	2.63	2.4	1.85	1.61	1.25	1	0.91	0.63	0.58	0.5	0.41	0.33	0.3	
3			3.04	2.75	2.44	1.89	1.54	1.16	0.95	0.73	0.63	0.54	0.44	0.33	0.31	
4			3.85	3.23	3	2.55	1.75	1.25	1.14	0.8	0.73	0.61	0.48	0.37	0.35	0.24
5				3.38	3.33	2.75	2.1	1.38	1.26	0.9	0.75	0.63	0.5	0.44	0.4	0.39
7						3.28	2.53	1.55	1.2	1.03	0.83	0.74	0.59	0.48	0.44	0.33
9						3.87	3.01	1.3	1.52	1.18	0.94	0.8	0.65	0.53	0.47	0.35
12							3.65	2.13	1.62	1.28	1.01	0.83	0.75	0.55	0.49	0.37
16								2.74	2	1.5	1.07	0.94	0.81	0.6	0.52	0.51
20								3.22	2.39	1.63	1.28	1.13	0.97	0.62	0.54	0.53
25									2.68	1.73	1.4	1.2	1	0.62	0.6	0.54
30									3.19	1.83	1.49	1.27	1.04	0.85	0.71	0.69

TABLA 2.6

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD KV = 230

EXPOSIC. mÁ,min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1	3.63	3.00	1.78	1.63	1.45	1.21	1	0.75	0.65	0.55	0.49	0.44	0.4	0.35	0.32	-
2		3.45	2.61	2.29	2.02	1.86	1.61	0.82	0.75	0.68	0.54	0.49	0.42	0.4	0.35	
3			3.4	3.25	3.03	2.63	2.01	1.7	1.36	1.01	0.79	0.67	0.56	0.5	0.45	
4				3.85	3.73	3.31	2.8	2.15	1.79	1.41	1.22	0.93	0.68	0.55	0.48	
5						3.68	2.98	2.52	2.14	1.75	1.3	1.04	0.89	0.73	0.61	0.51
7							2.62	2.27	2.06	1.65	1.52	1.21	1.01	0.82	0.73	
9								3.13	2.8	2.51	1.85	1.55	1.28	1.06	0.87	0.71
12								3.47	3.09	2.7	2.52	1.97	1.33	1.15	0.91	0.87
16										3.36	2.72	2.22	1.79	1.5	1.24	
20										3.44	3.06	2.45	1.94	1.6	1.33	
25											3.19	2.5	2.02	1.65	1.35	
30											3.54	2.9	2.39	1.92	1.56	

TABLA 2.7

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD $N_V = 240$

EXPOSIC. m ² /min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1	3.5	2.41	1.62	1.36	1.16	0.98	0.83	0.73	0.65	0.58	0.51	0.46	0.43	0.31	0.28	
2		2.83	2.6	1.76	1.47	1.29	1.1	1.03	0.9	0.76	0.67	0.58	0.41	0.38	0.24	
3		3.45	2.78	2.2	1.94	1.7	1.47	1.32	1.13	0.96	0.84	0.73	0.48	0.43	0.39	
4			3.2	2.75	2.2	1.97	1.7	1.62	1.22	1.06	0.92	0.8	0.68	0.57	0.51	
5				3.1	2.47	2.23	2.1	2	1.79	1.55	1.37	1.29	1.16	0.96	0.8	0.7
7					3.02	2.63	2.46	2.28	2.15	1.91	1.65	1.57	1.22	1.1	0.95	
9					3.5	3.14	3.05	2.92	2.72	2.46	2.13	1.89	1.53	1.44	0.93	0.75
12						3.6	3.12	2.96	2.86	2.7	2.3	2.01	1.96	1.35	1.21	
16							3.5	3.12	3.06	2.72	2.56	2.35	2.31	1.97	1.67	1.5
20									3.4	3.2	3.1	2.94	2.78	2.5	2.02	
25											3.45	3.27	3.02	2.92	2.41	
30													3.27	3.19	2.9	

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 120

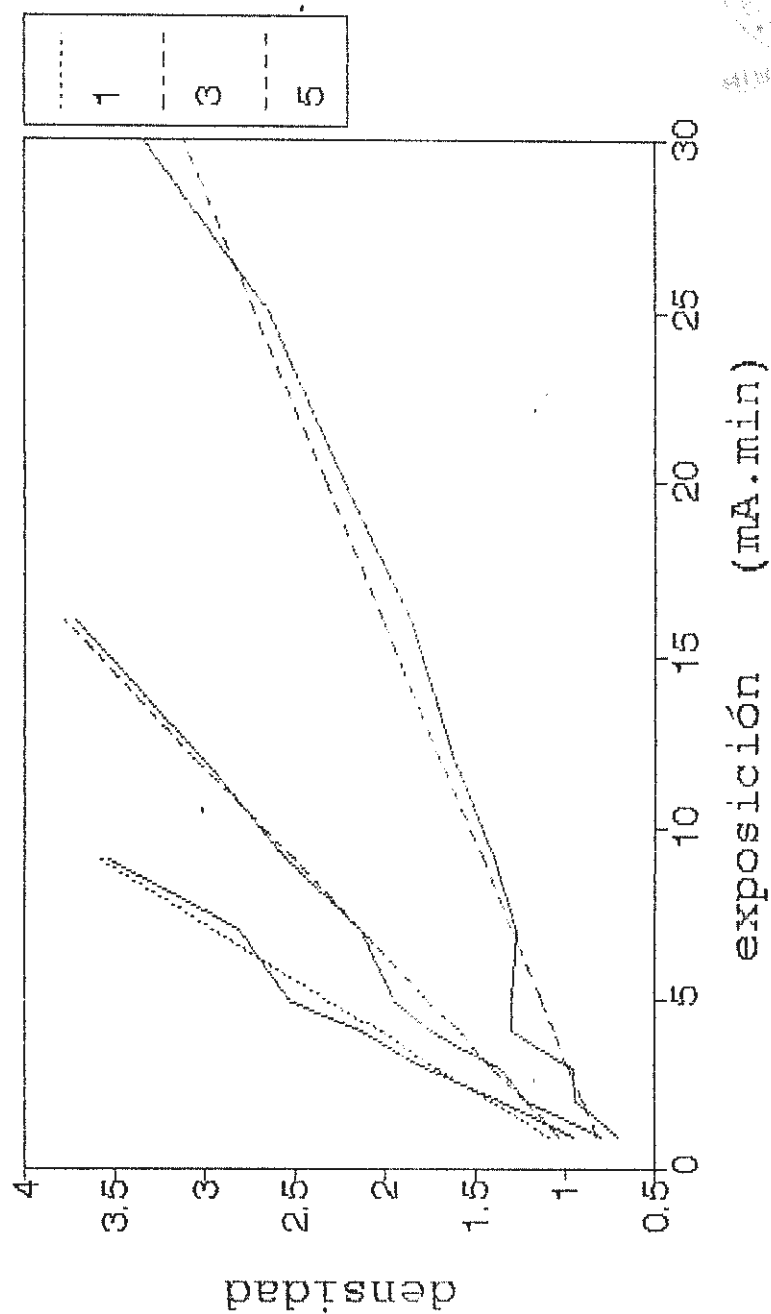
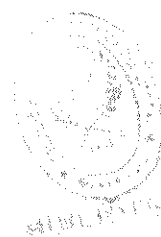


FIGURA 9



DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 120

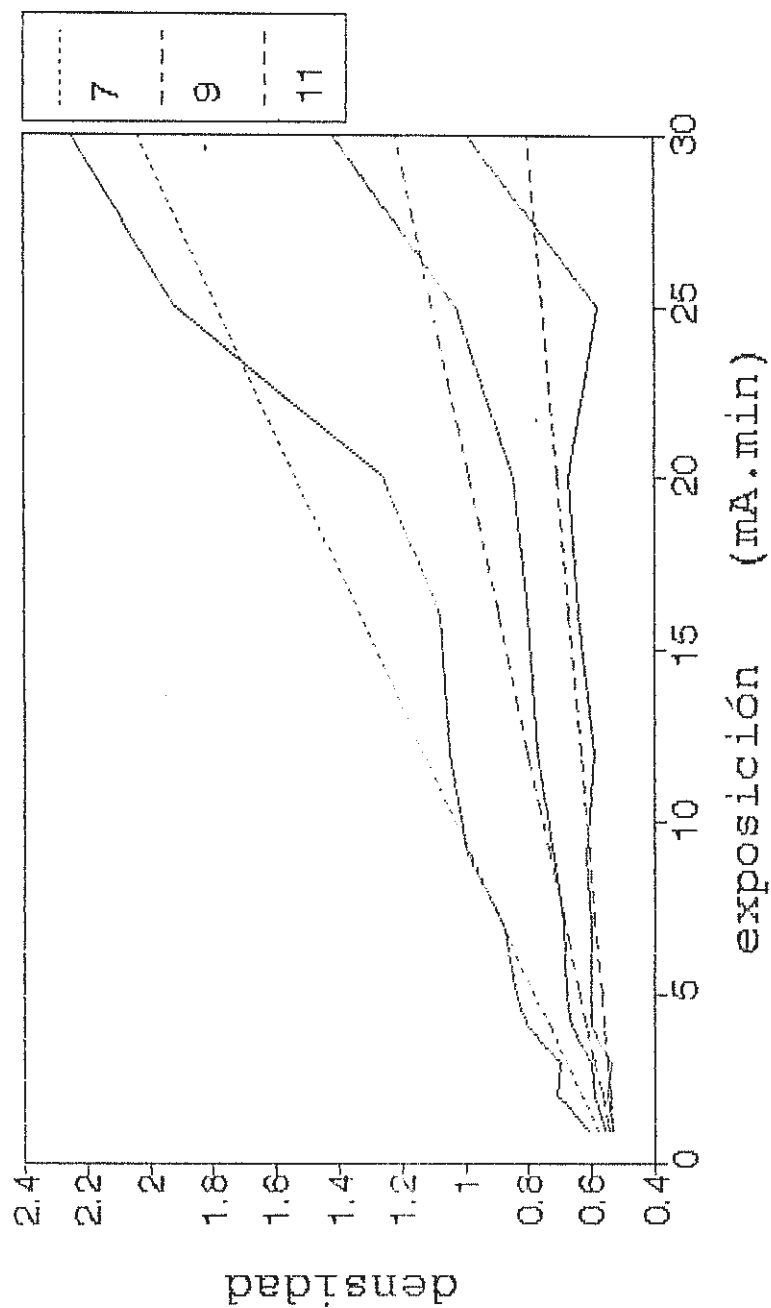


FIGURA 10

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 140

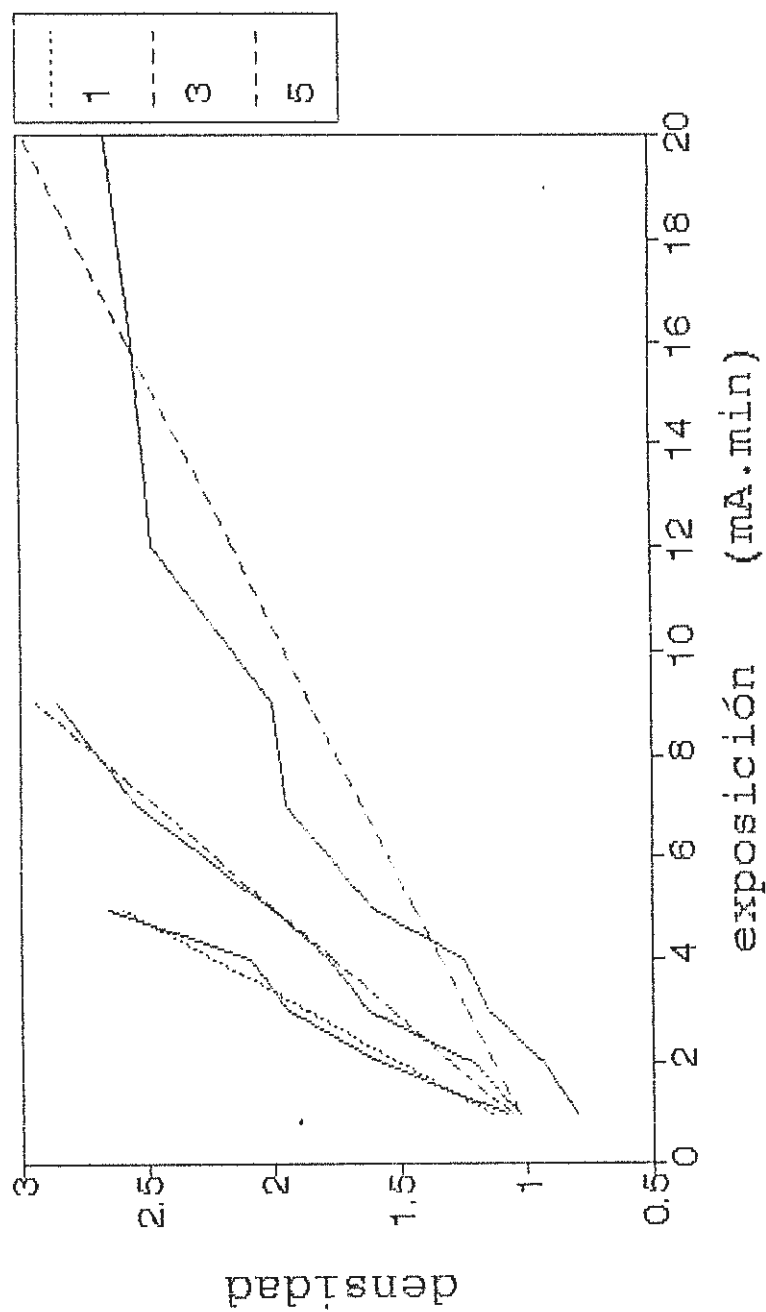


FIGURA 11

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 140

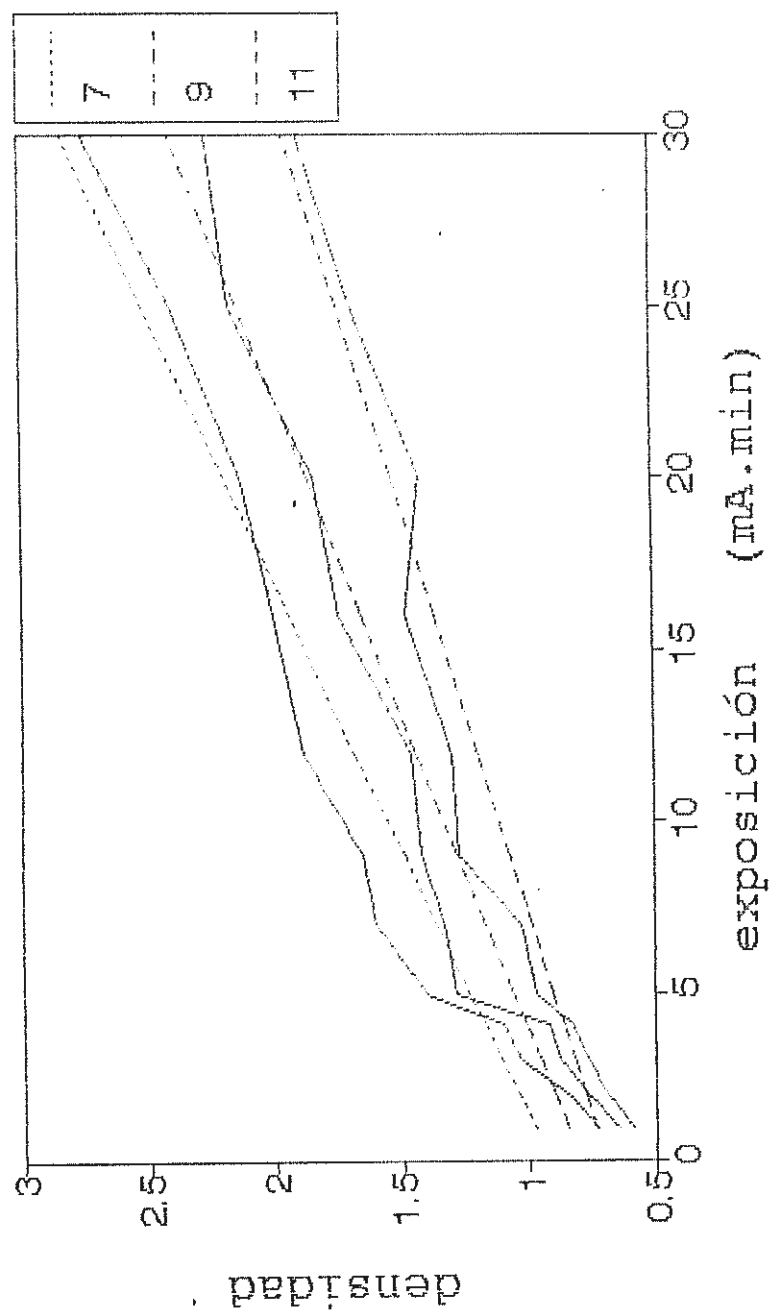


FIGURA 12

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 140

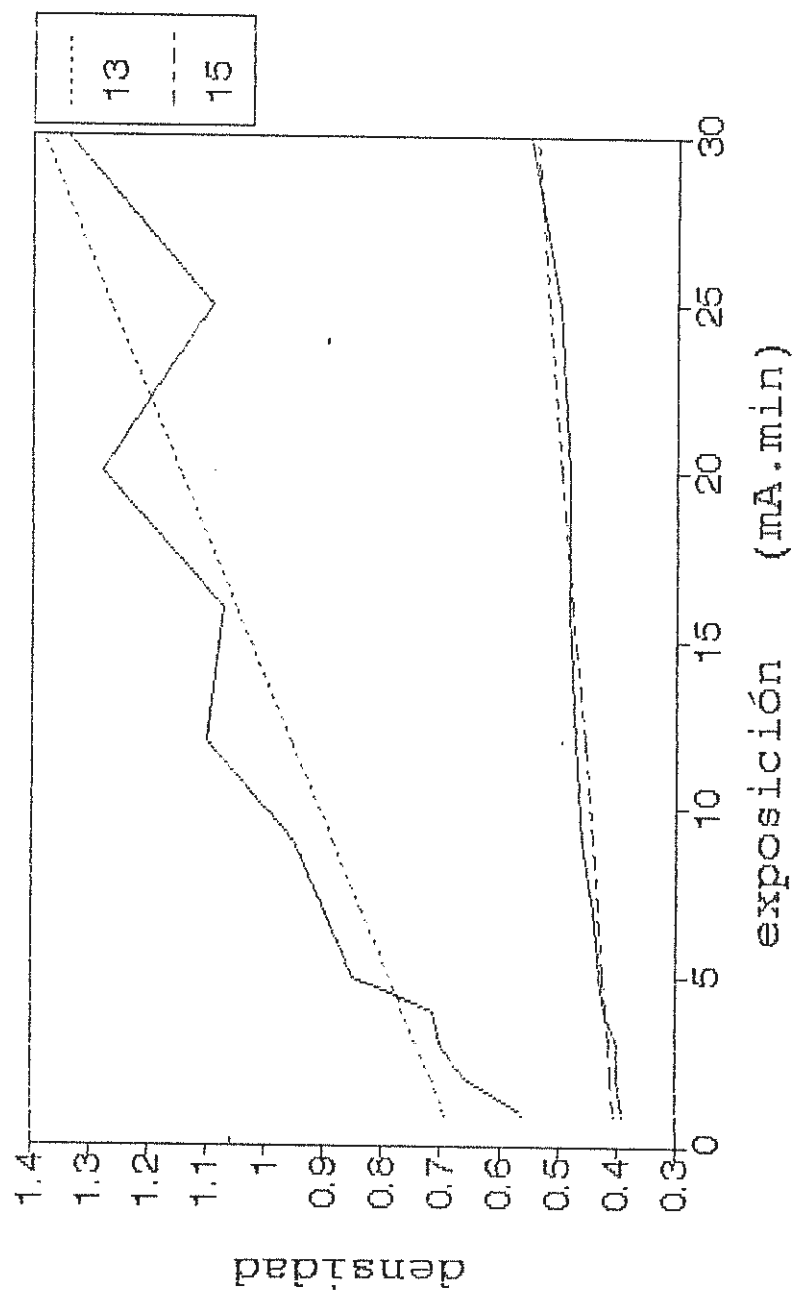


FIGURA 13

DENSIDAD VS EXPOSICION KV = 160

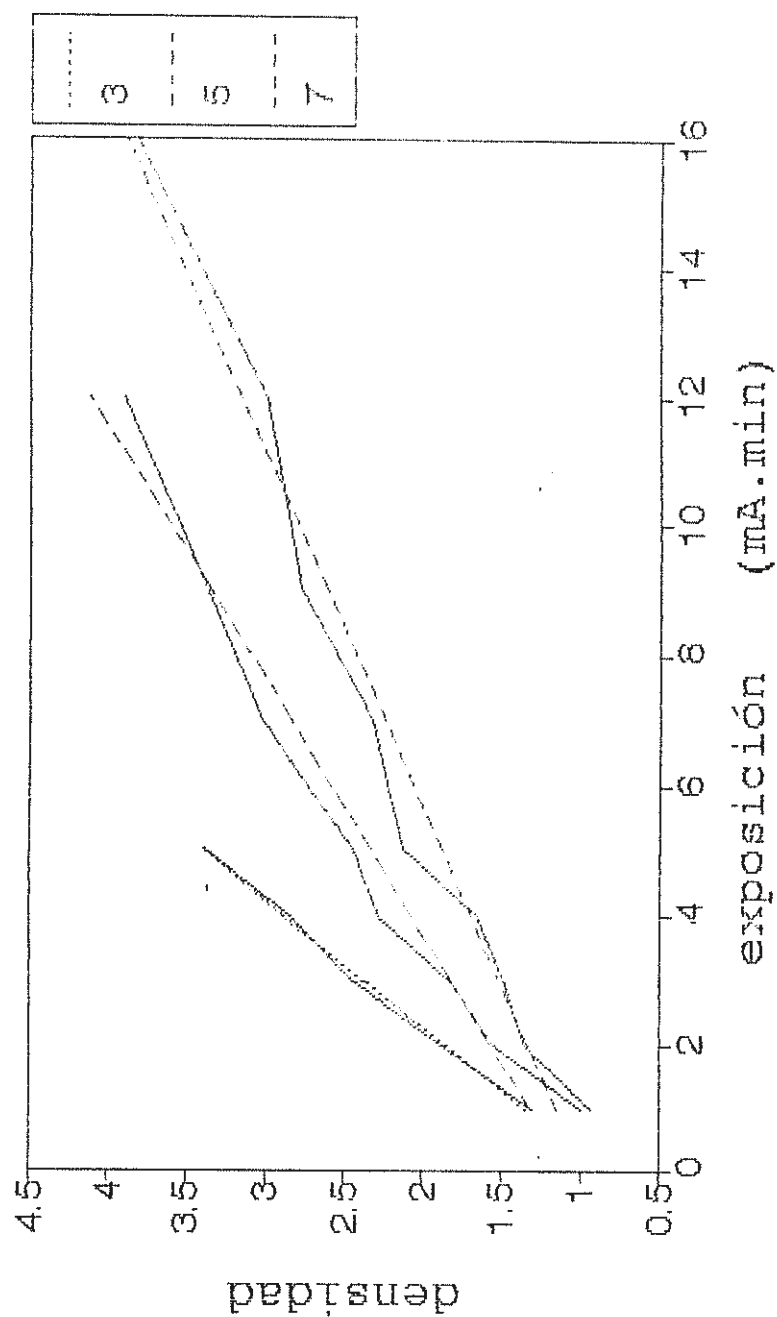


FIGURA 14

DENSIDAD VS EXPOSICION KV = 160

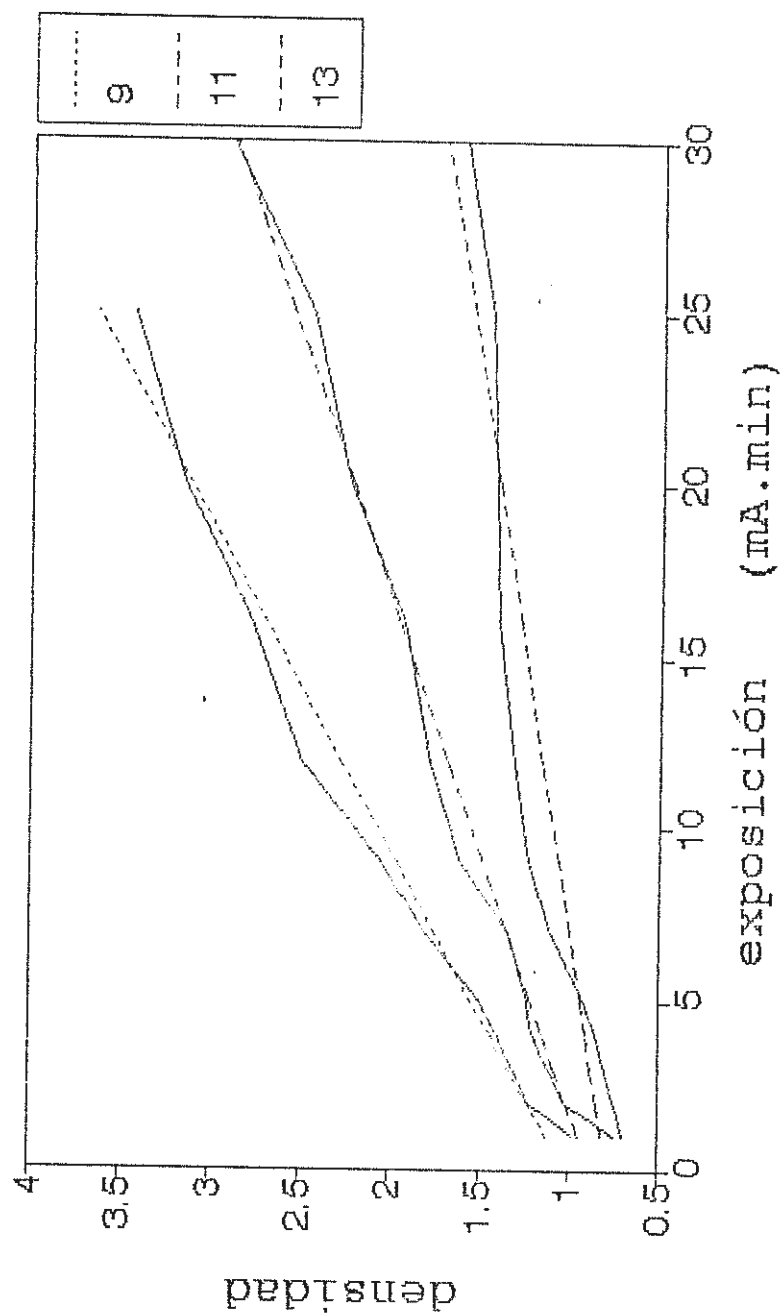


FIGURA 15

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 160

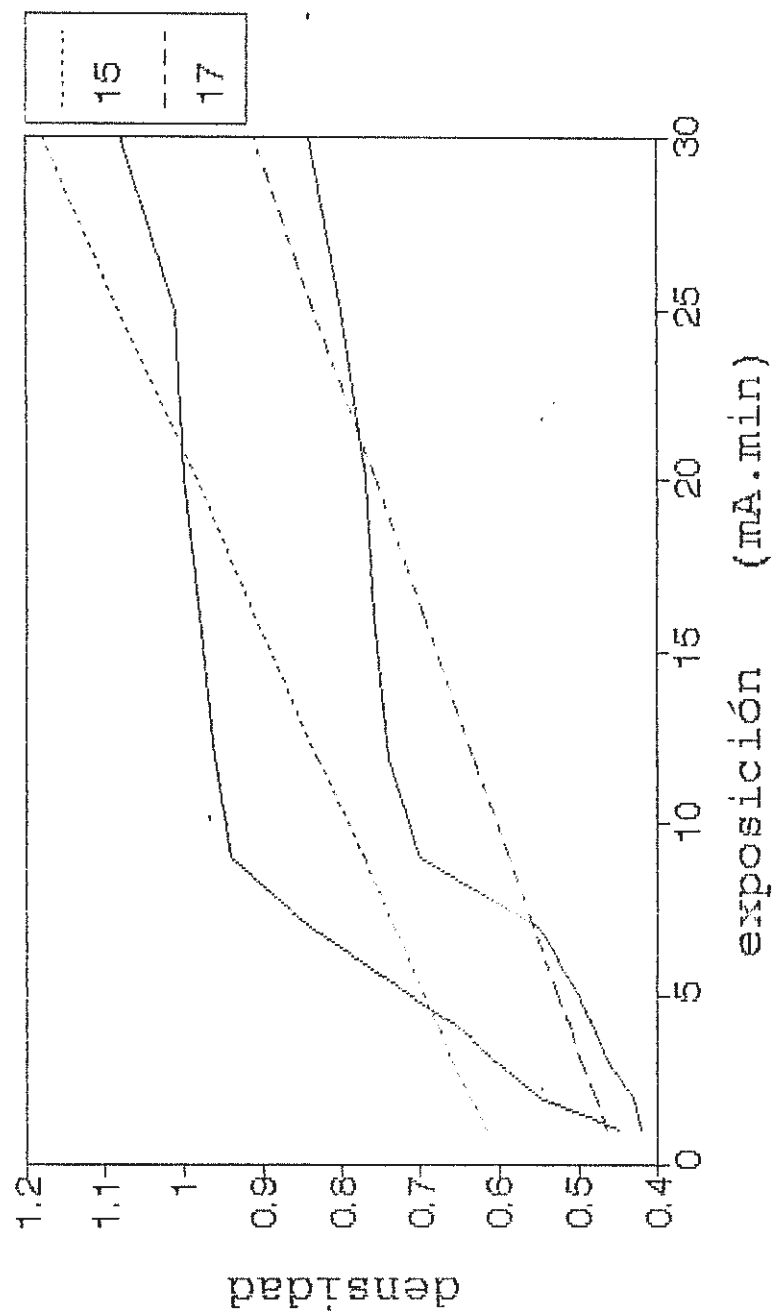


FIGURA 16

DENSIDAD VS EXPOSICION KV = 160

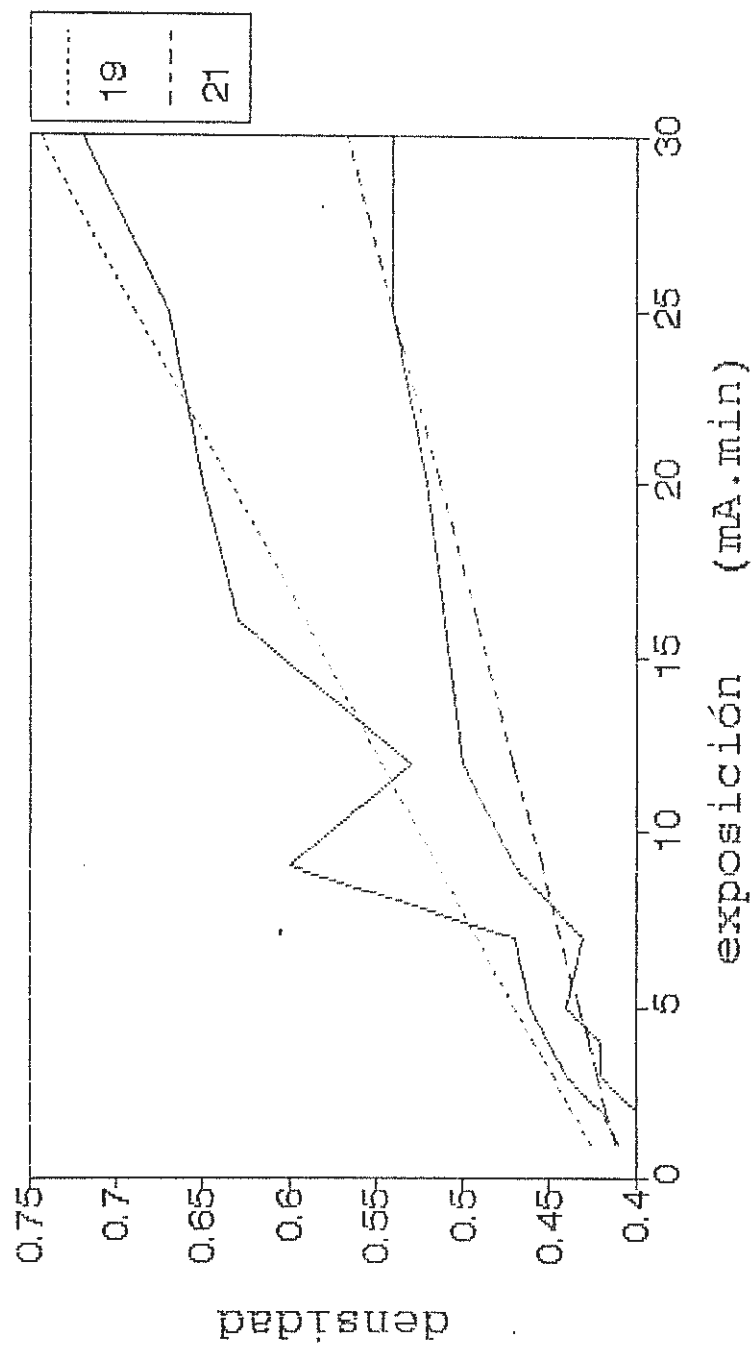


FIGURA 17

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 180

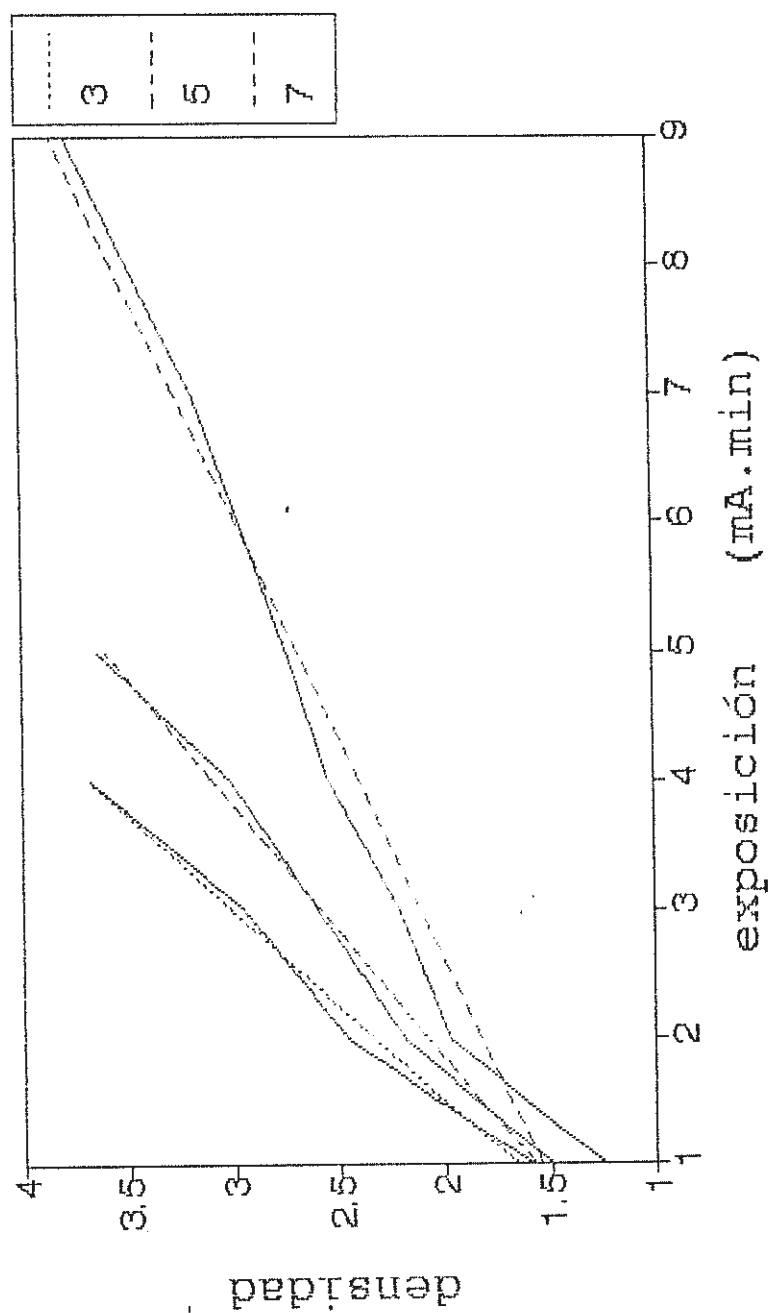


FIGURA 18

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 180

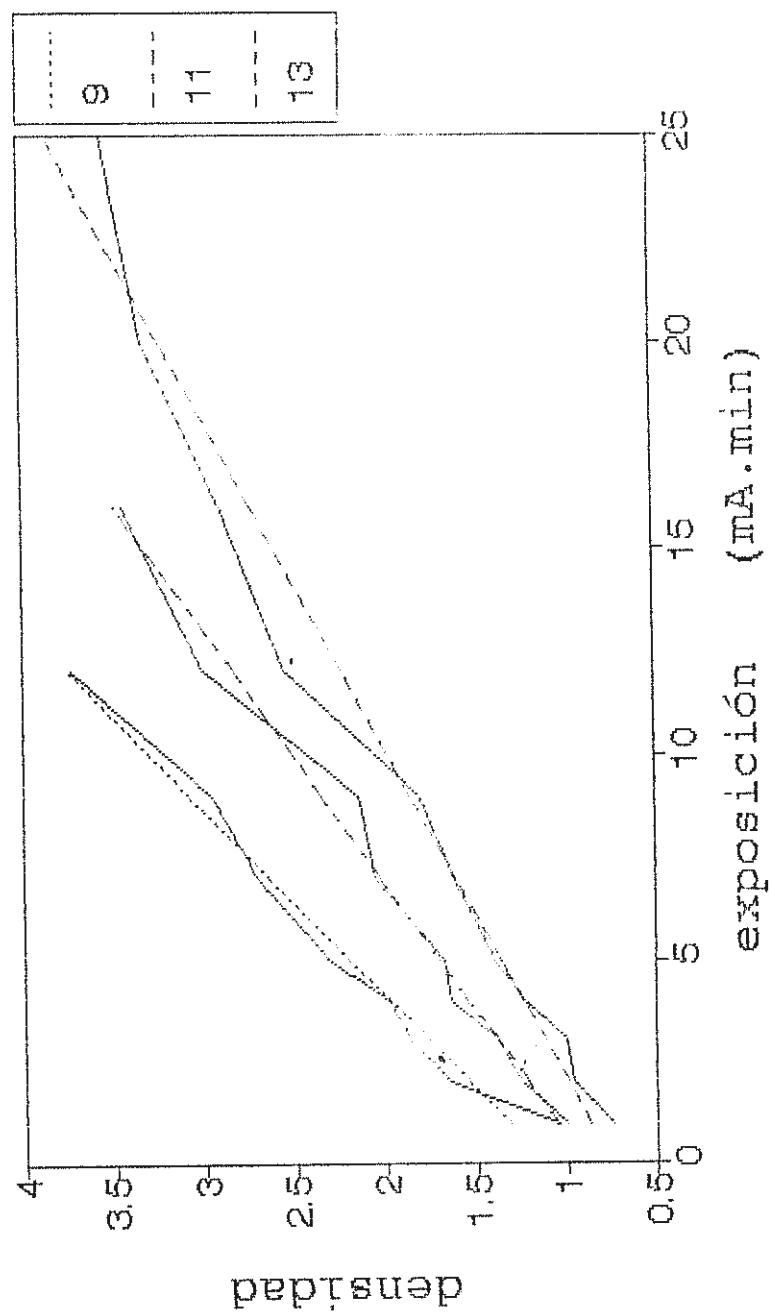


FIGURA 15

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 180

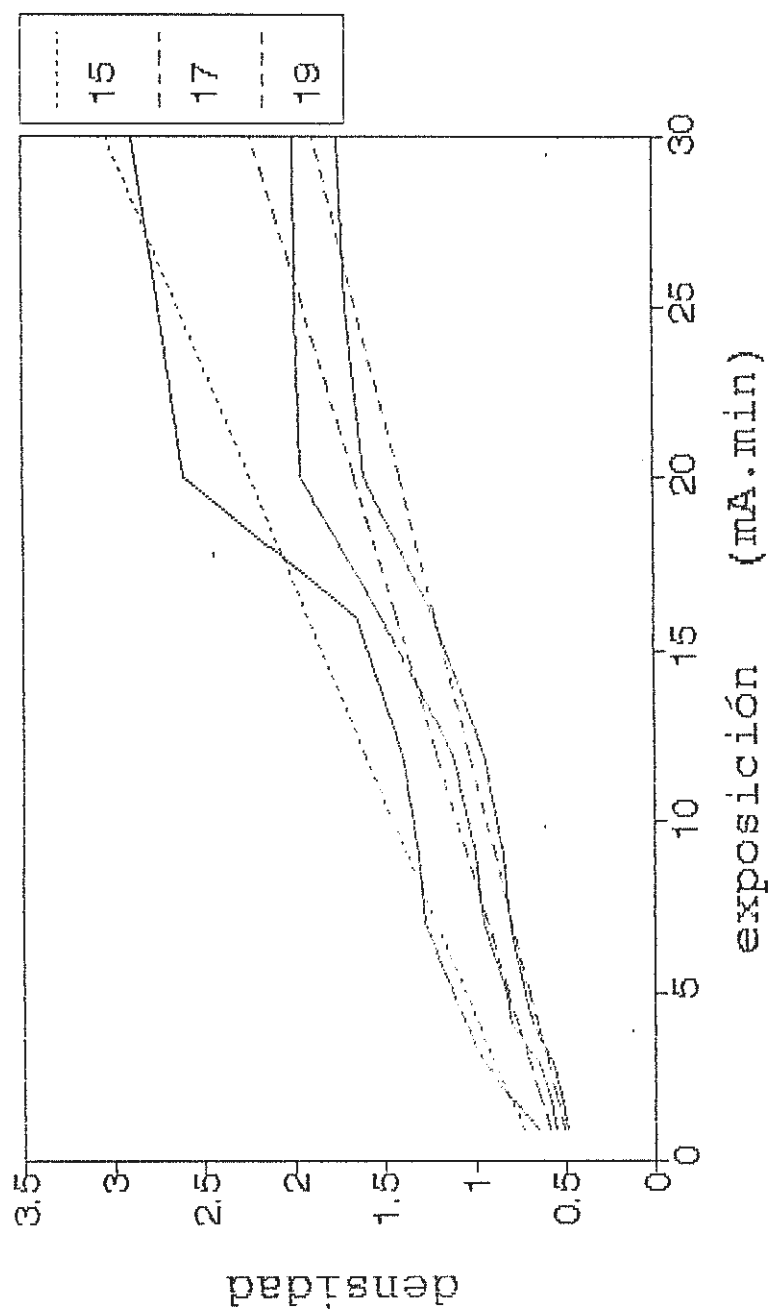


FIGURA 20

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 180

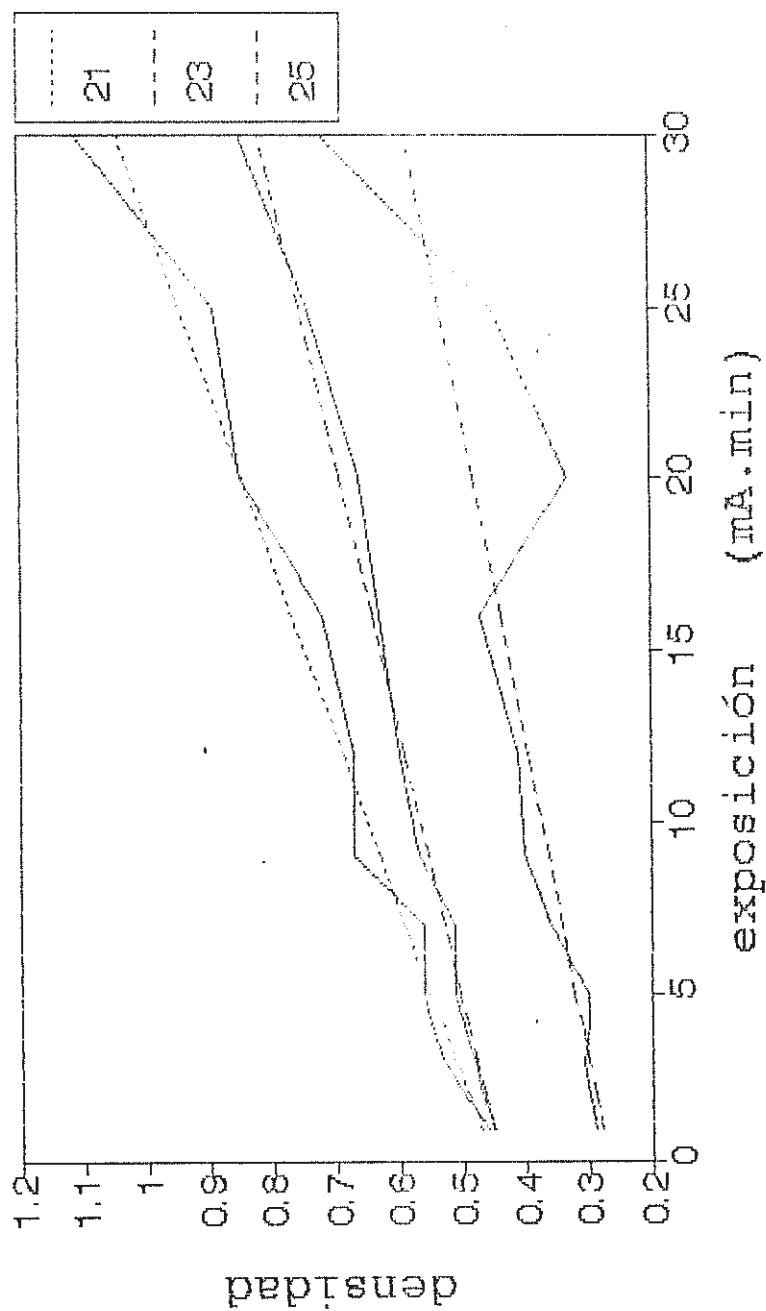


FIGURA 21



DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 200

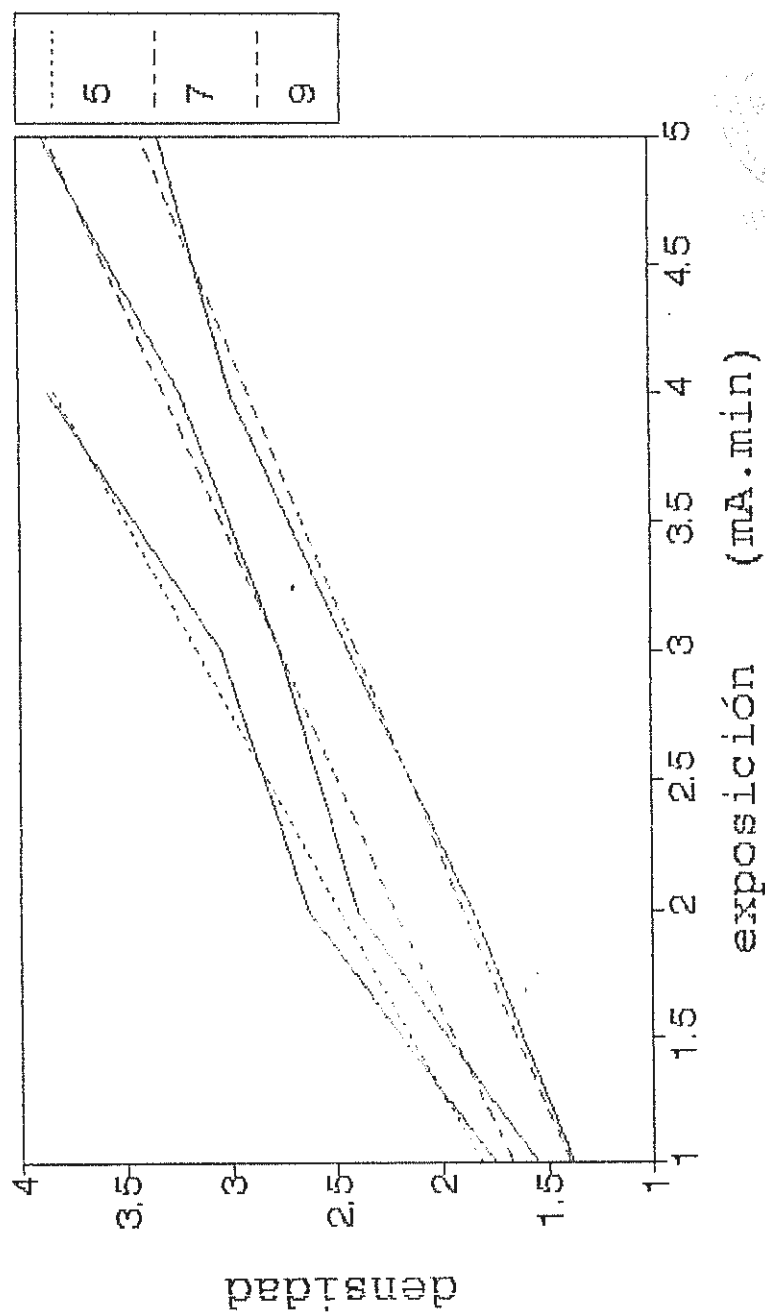


FIGURA 22

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 200

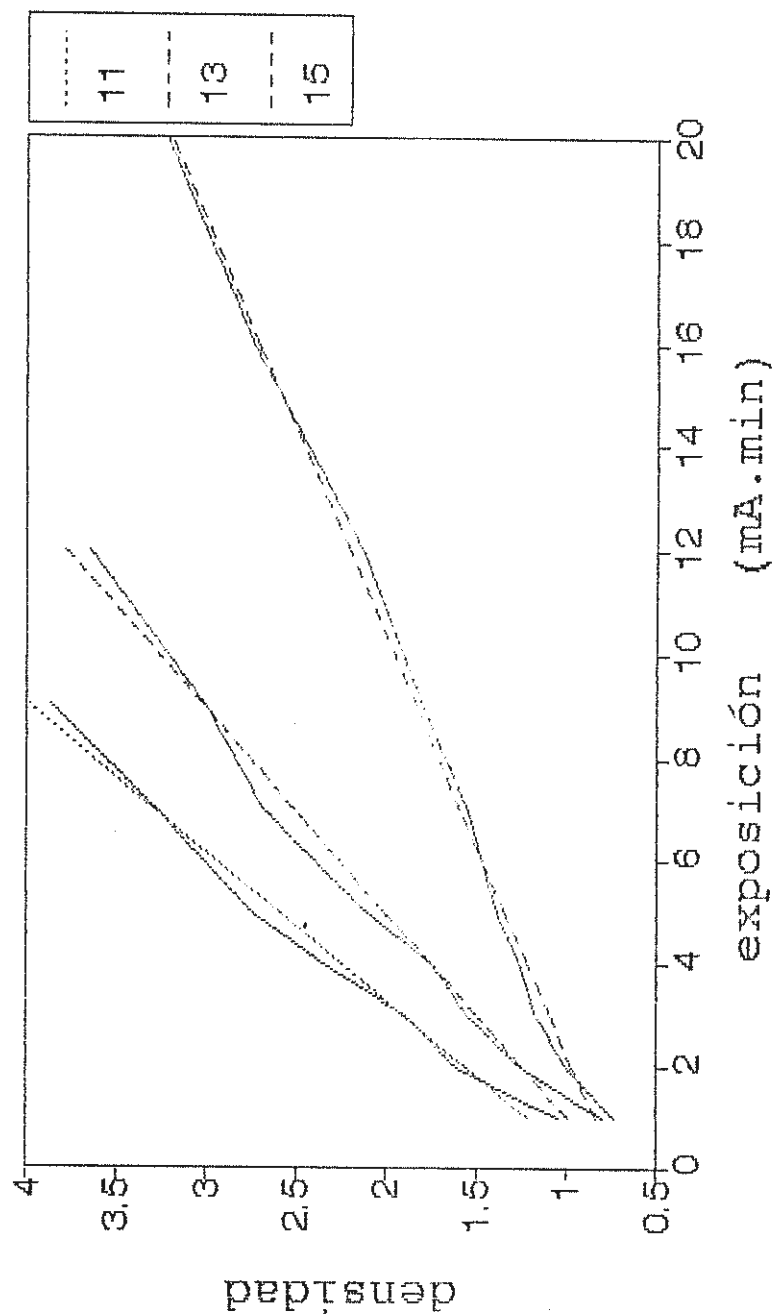


FIGURA 23

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 200

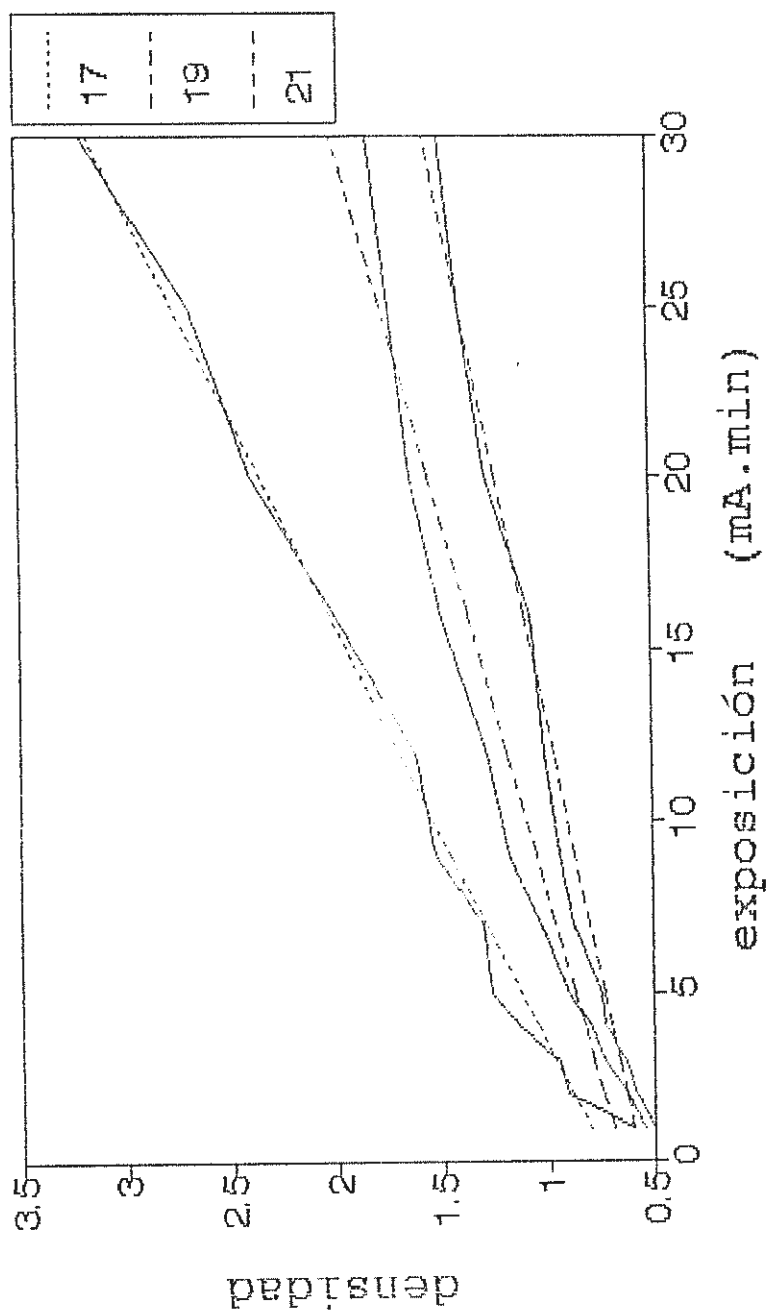


FIGURA 24

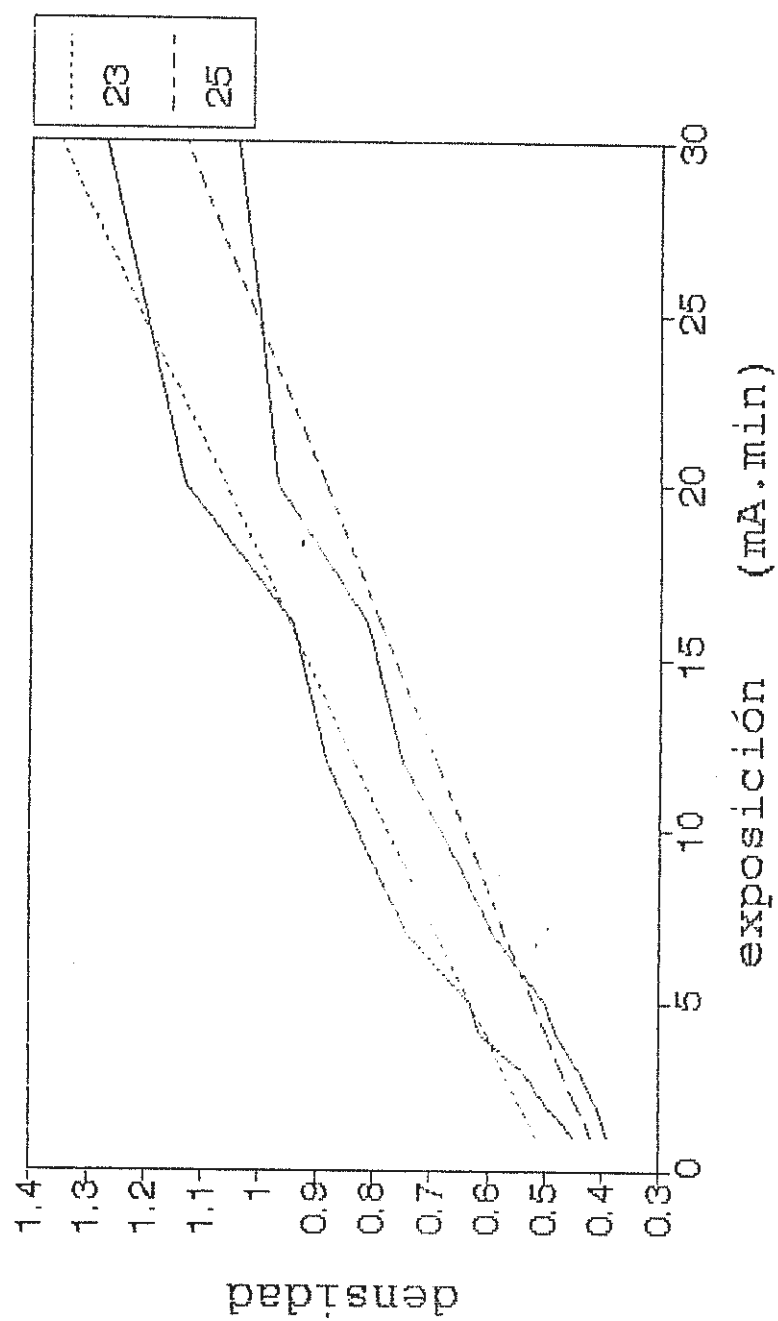


FIGURA 25

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 200

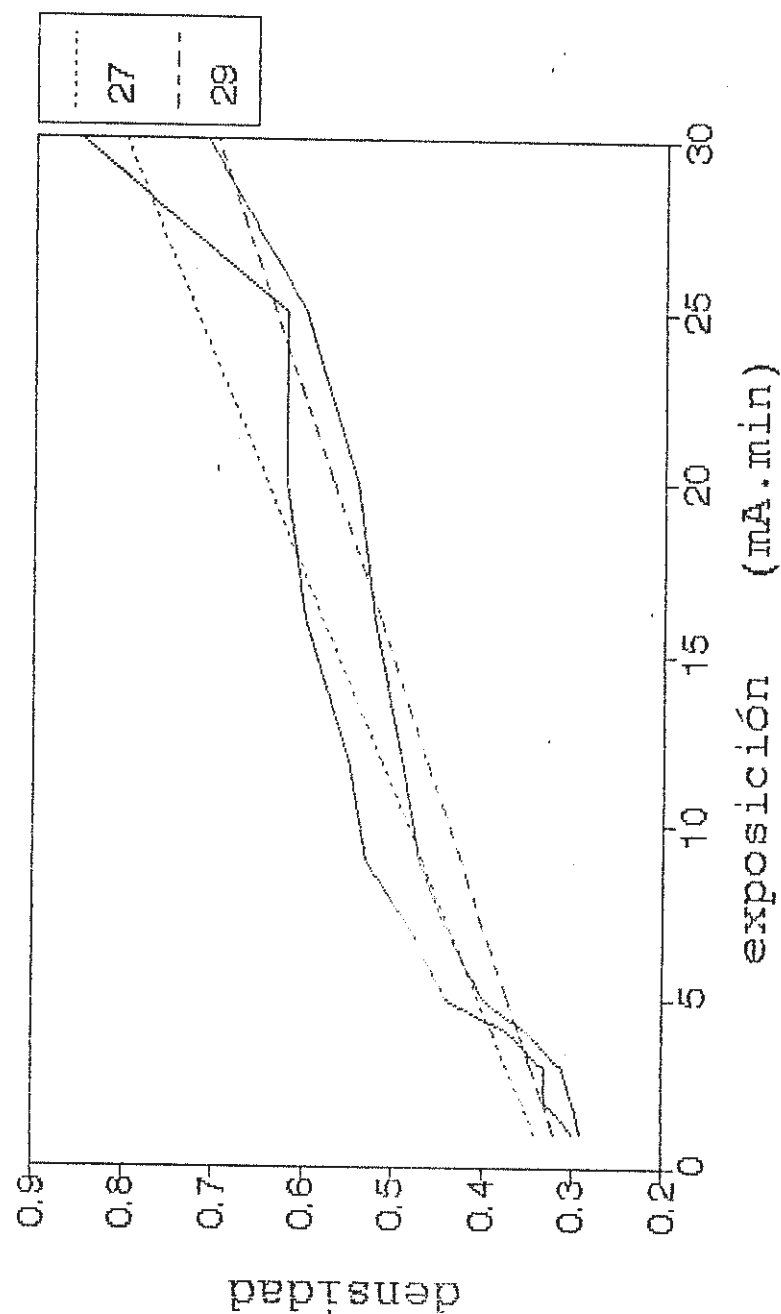


FIGURA 26

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 220

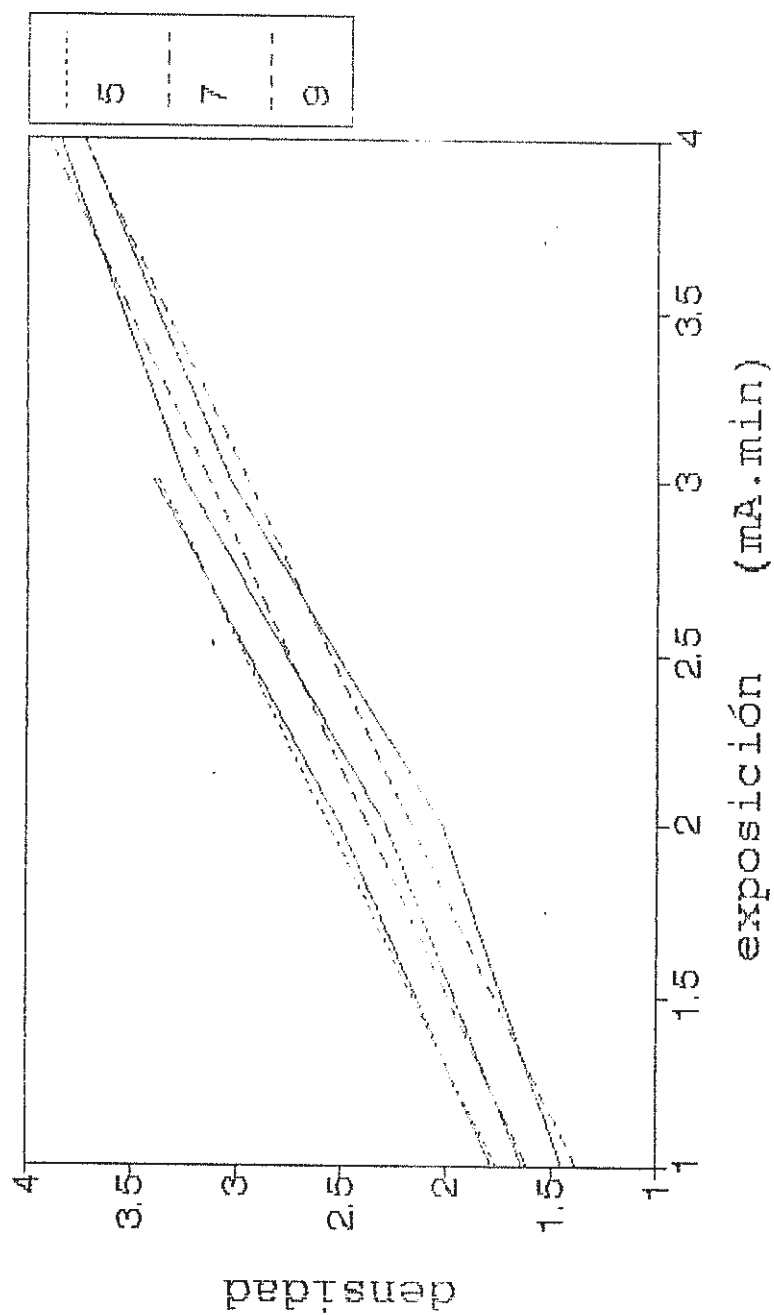


FIGURA 27

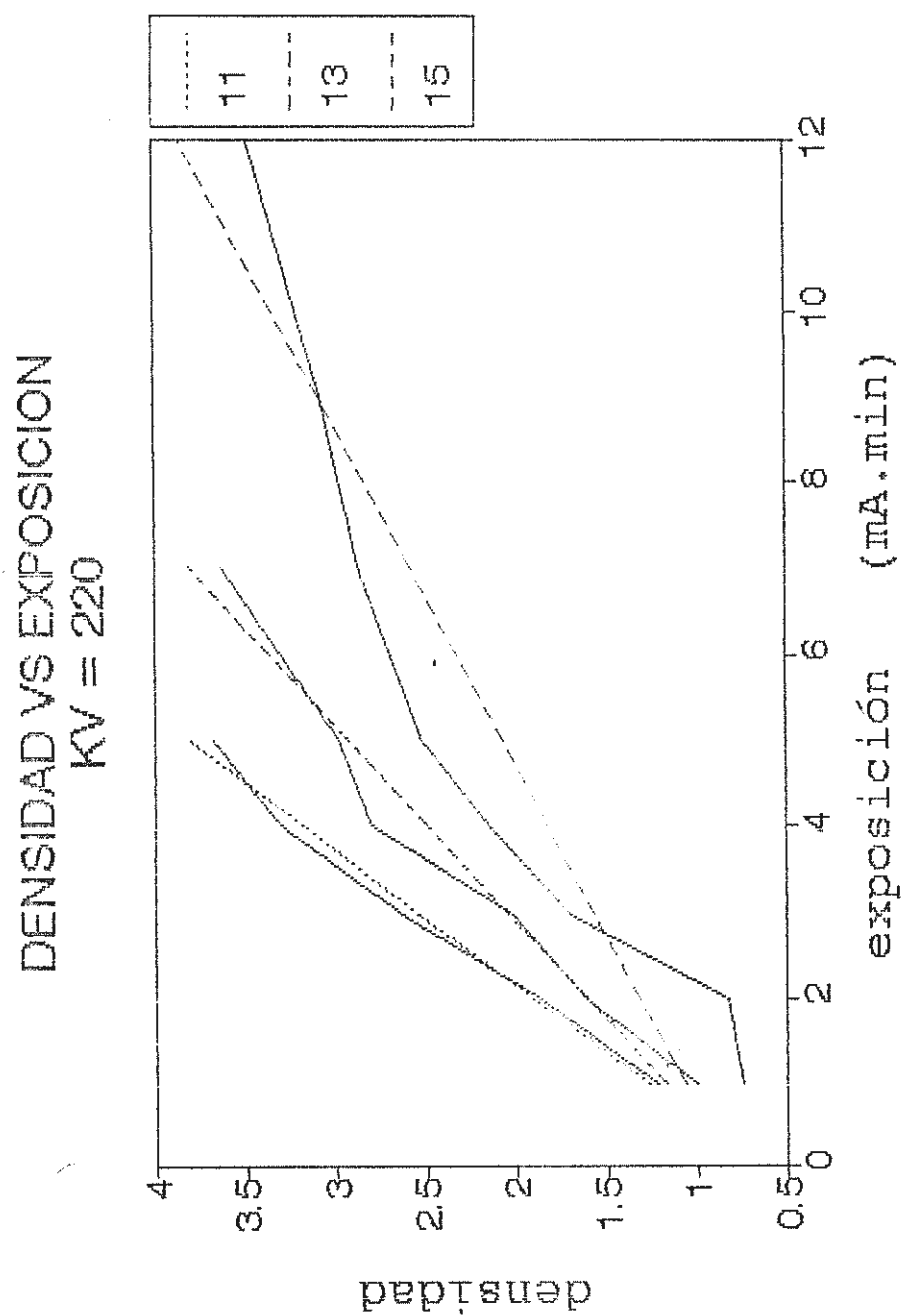


FIGURA 28

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 220

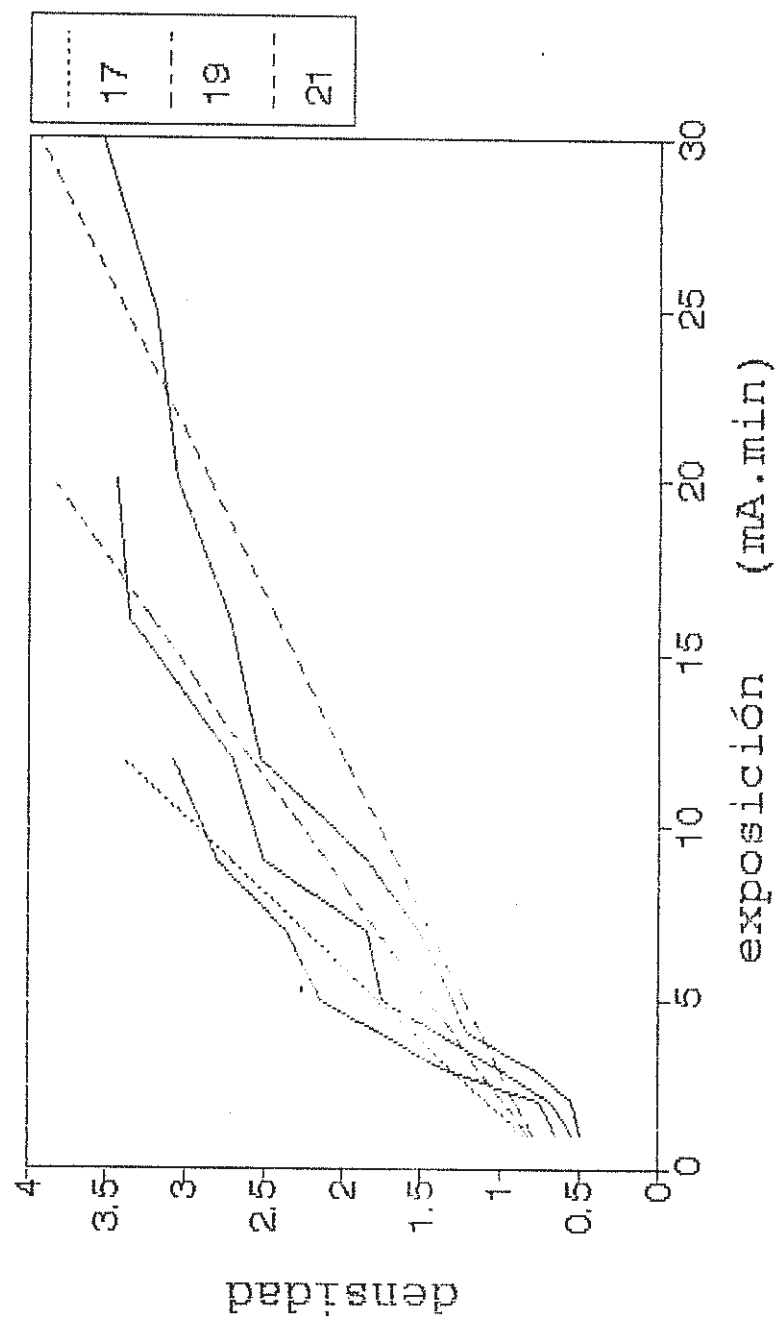


FIGURA 29

DENSIDAD VS EXPOSICION KV = 220

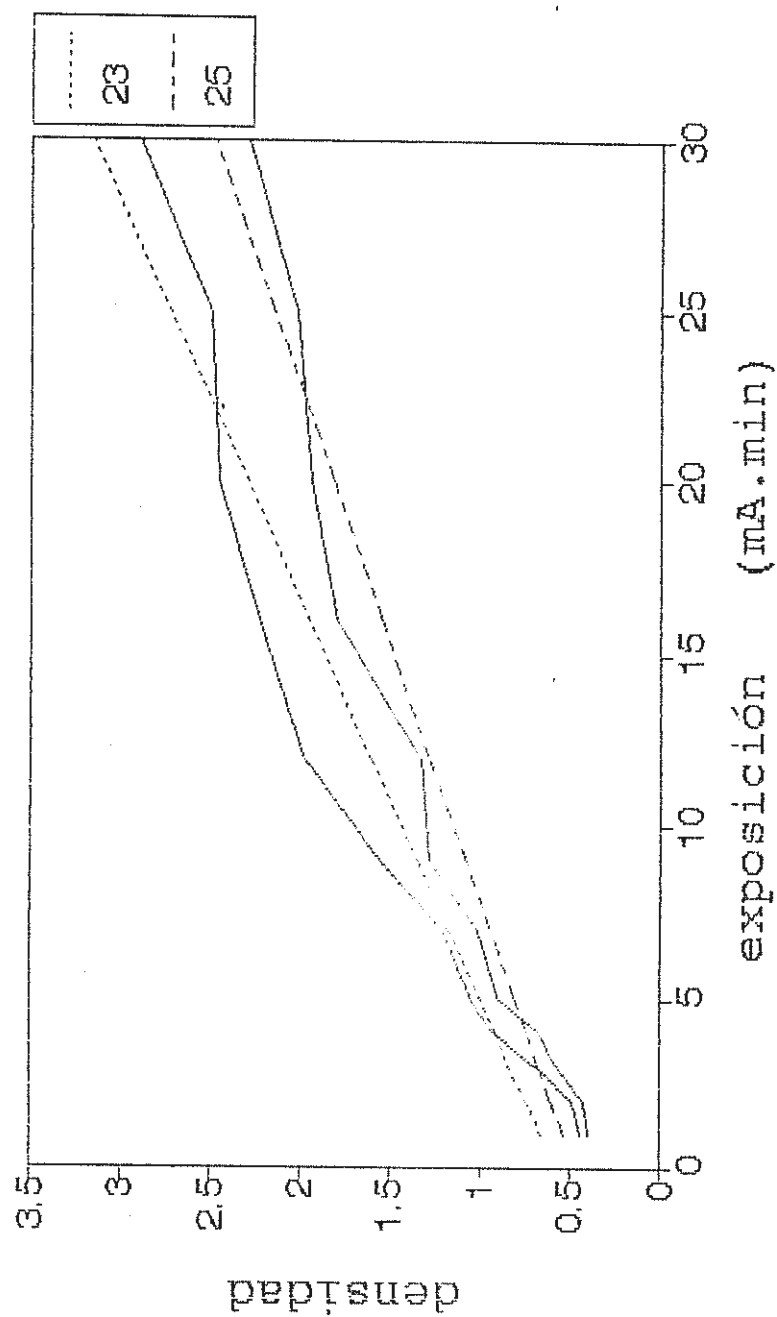


FIGURA 30

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 220

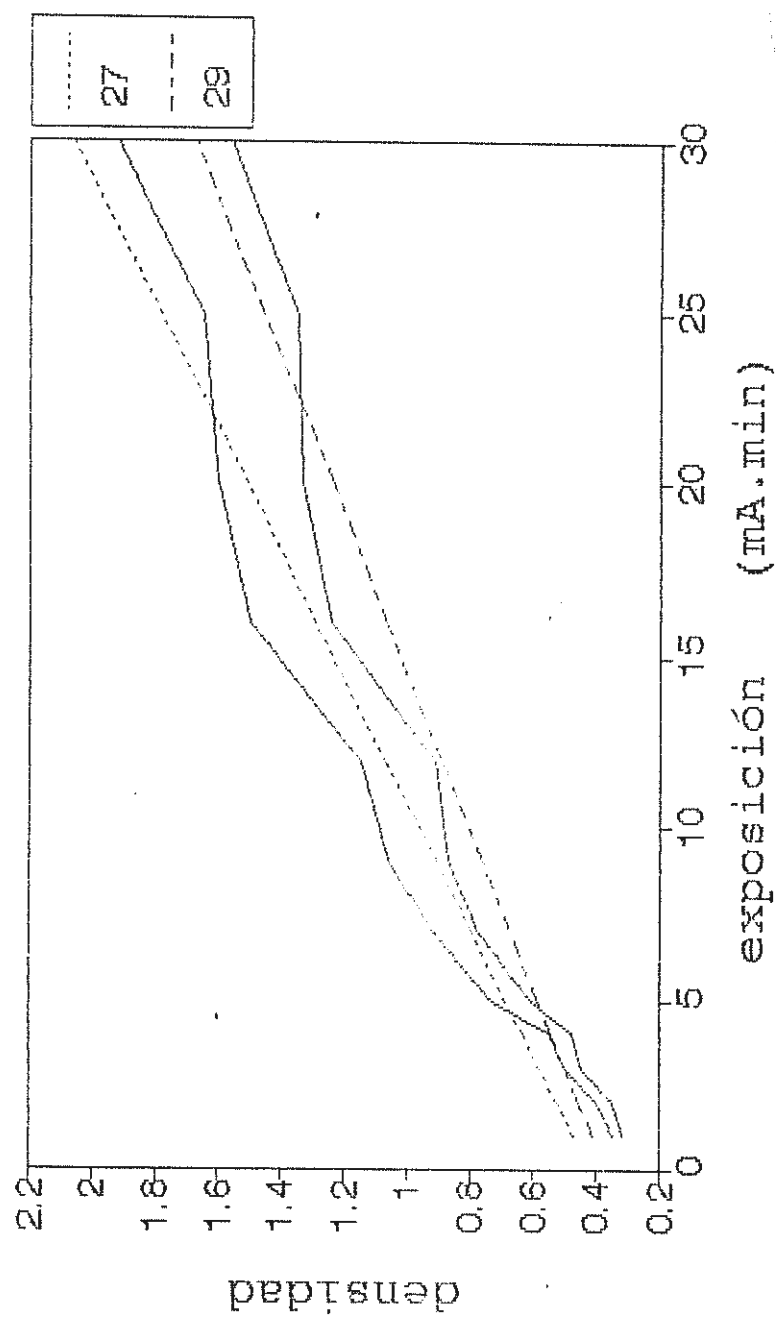


FIGURA 31



DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 240

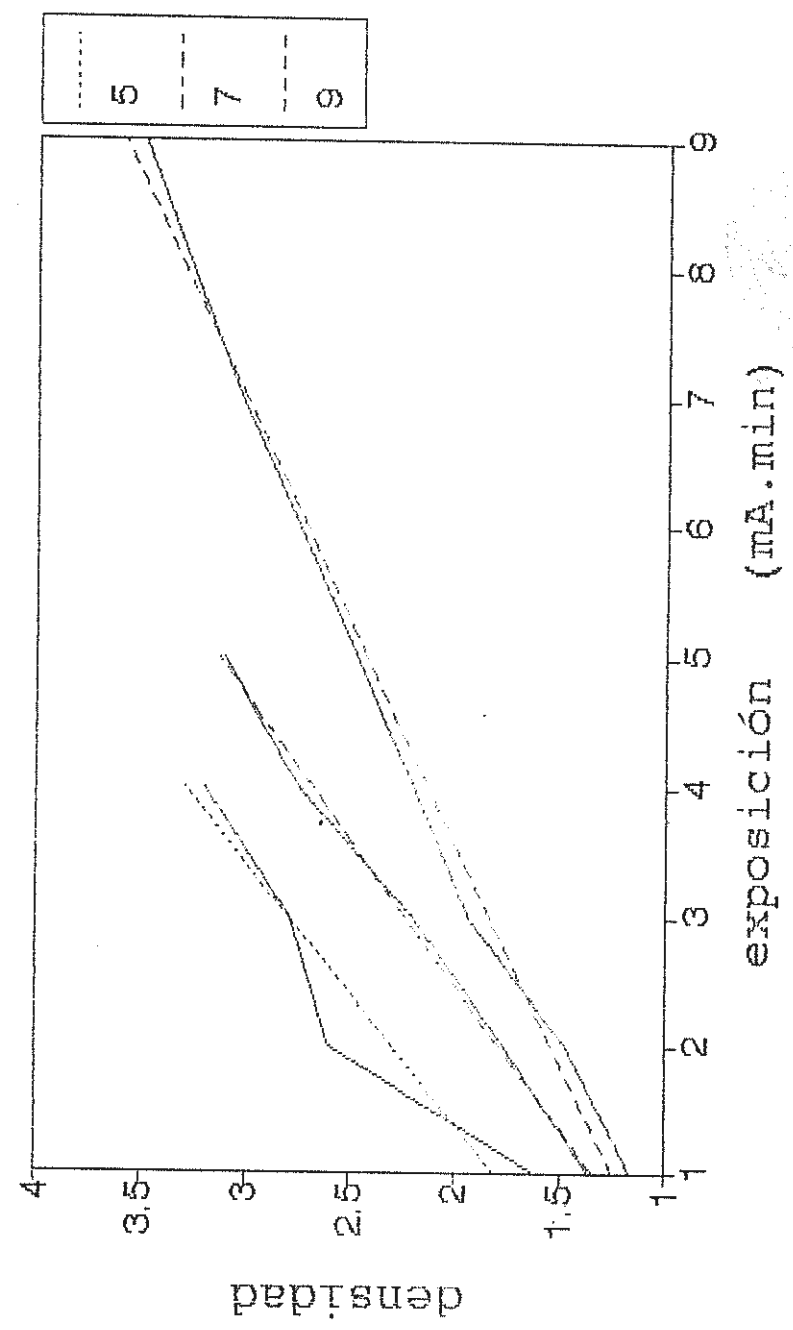


FIGURA 32

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 240

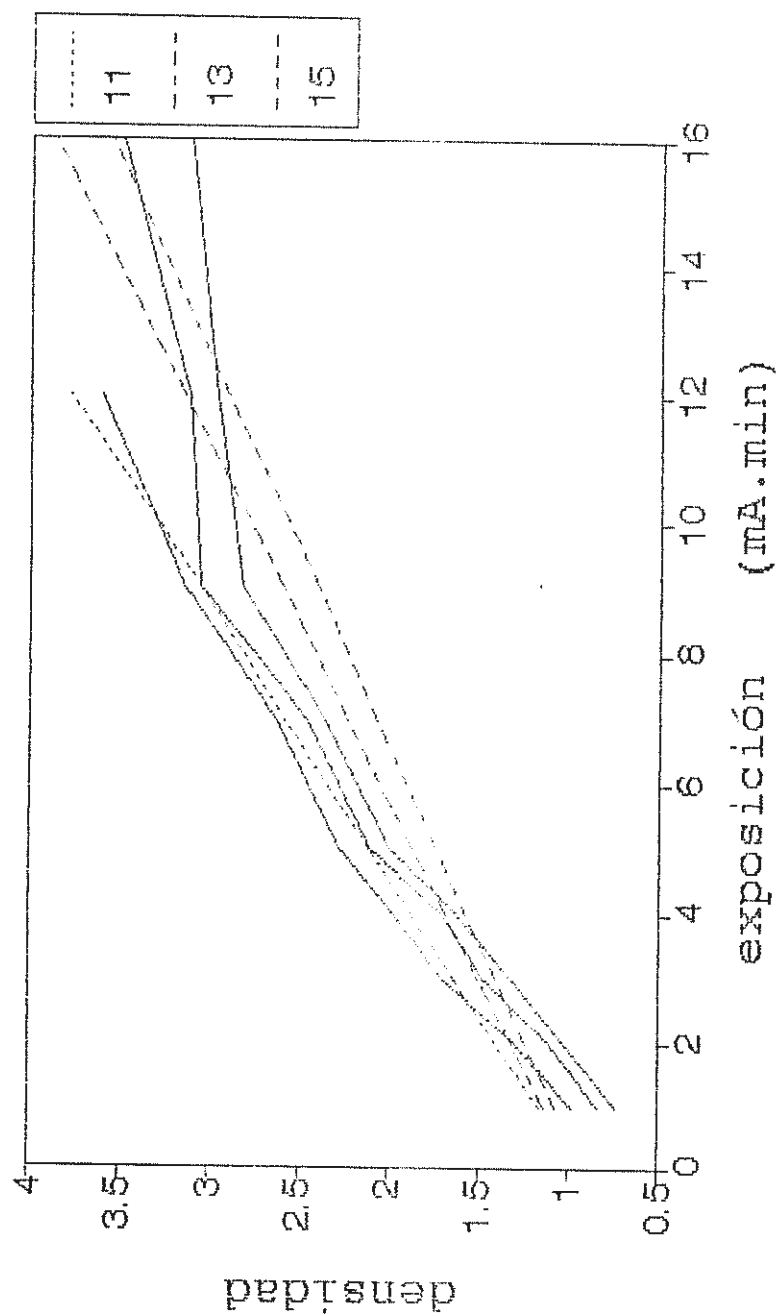


FIGURA 33

DENSIDAD VS EXPOSICION KV = 240

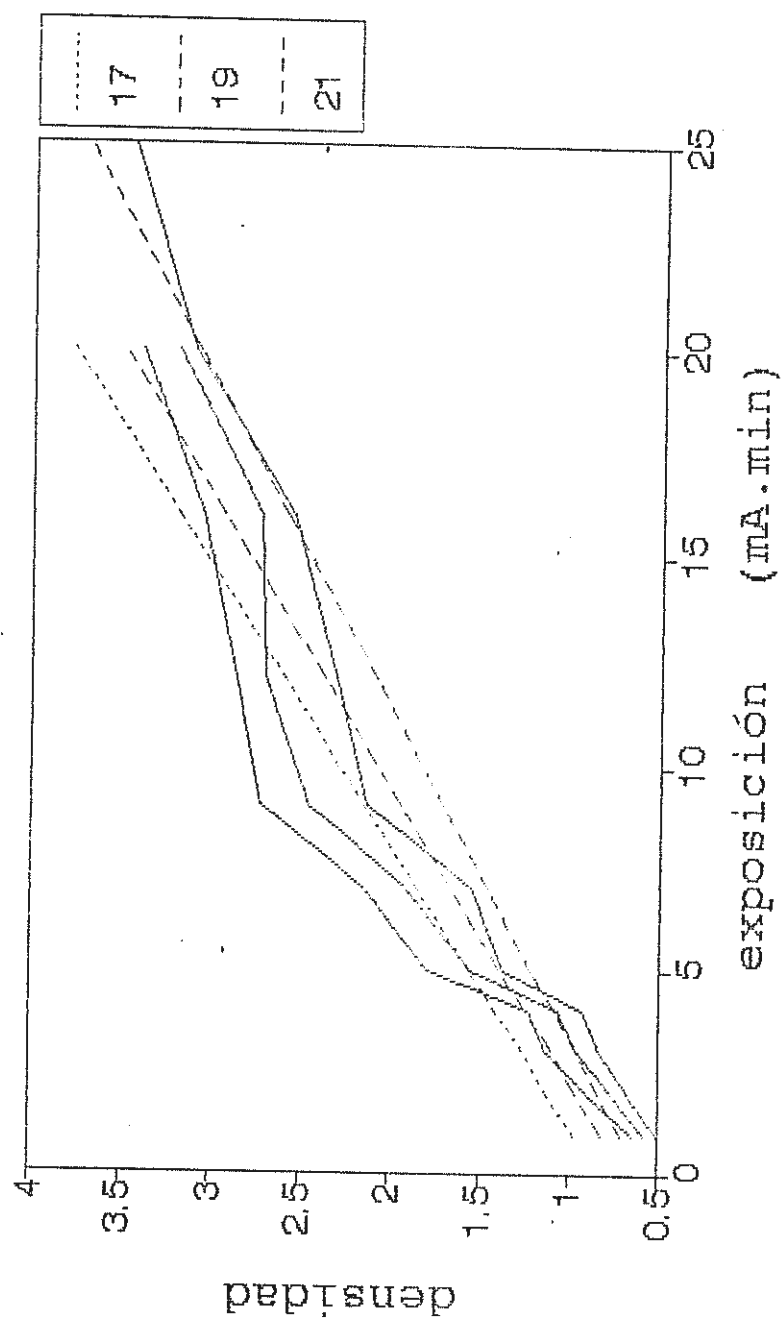


FIGURA 34

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 240

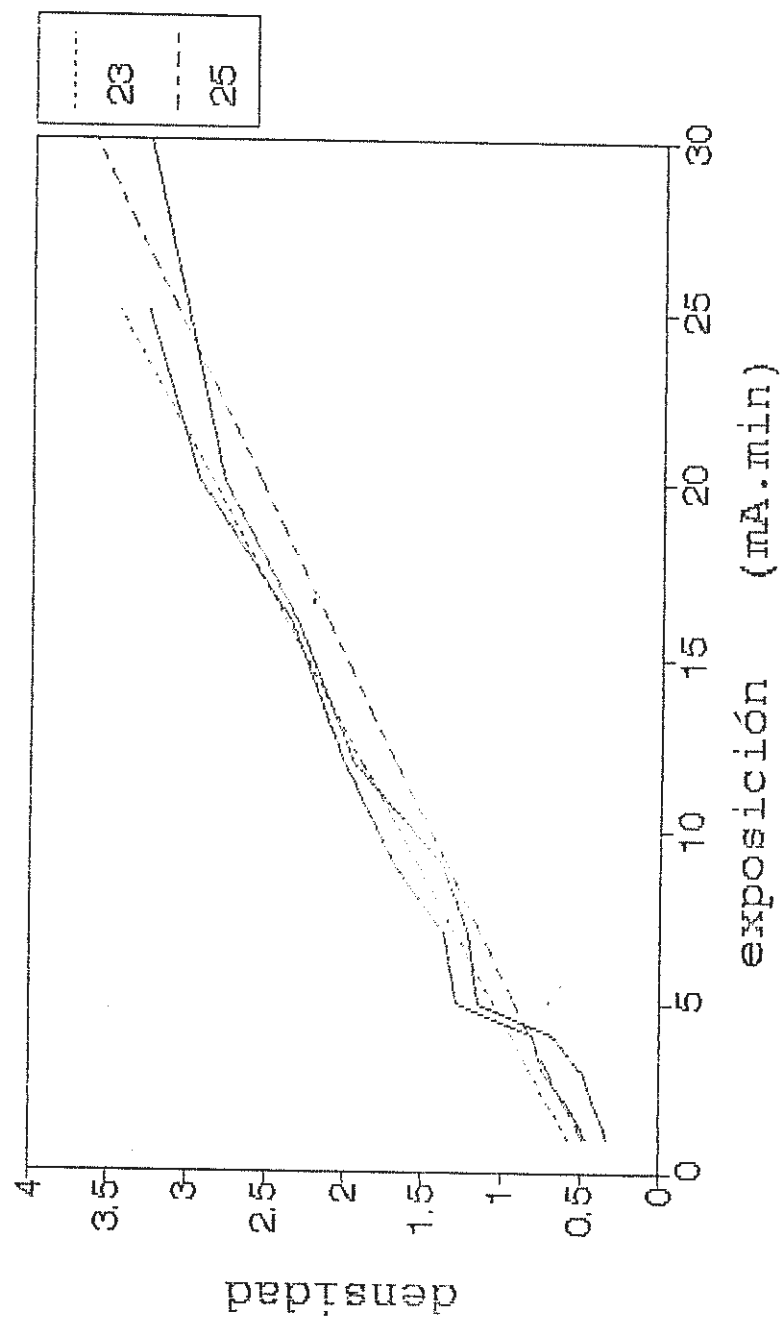


FIGURA 35

DENSIDAD VS EXPOSICION
KV = 240

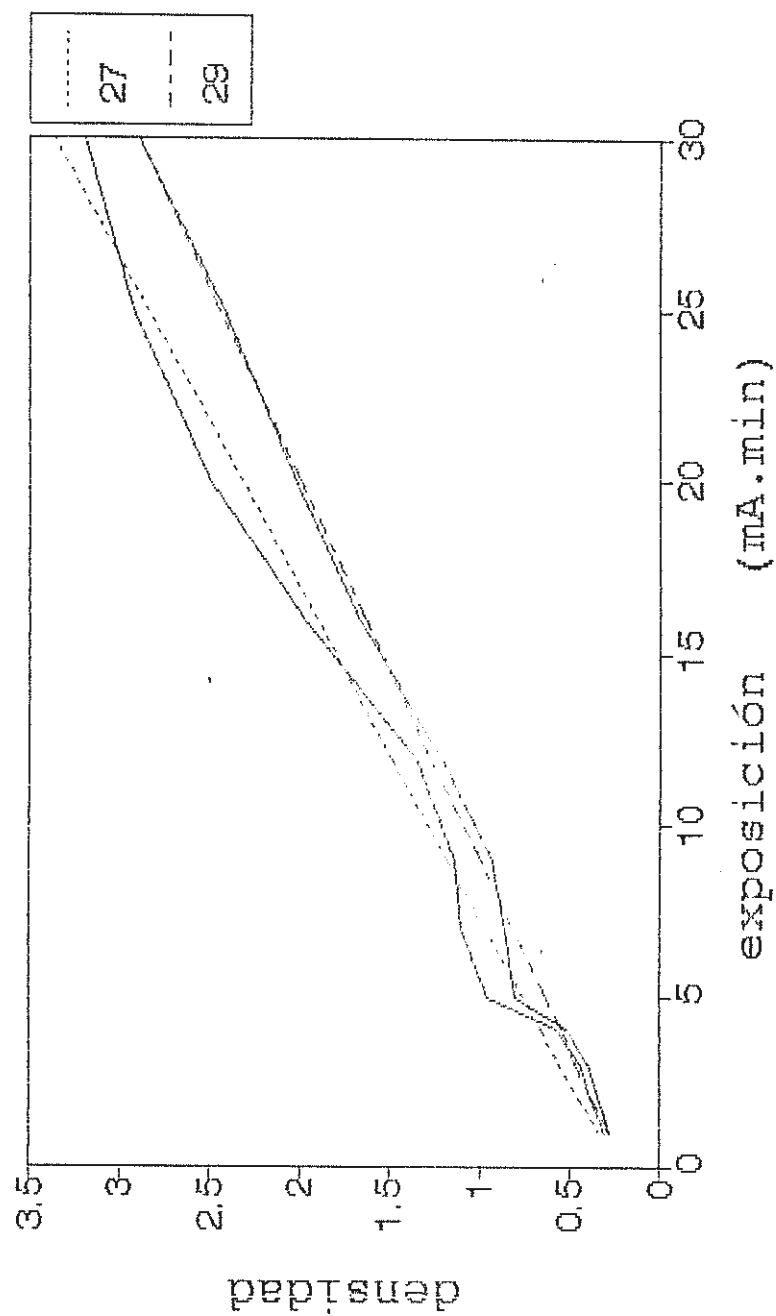


FIGURA 36

2.2 Determinación de la densidad radiográfica por algoritmos matemáticos.

De los gráficos obtenidos se puede observar que la relación lineal entre la densidad y la exposición puede ser fácilmente determinada, esta relación es expresada por la fórmula:

$$d = a + b \cdot E \quad (2.1)$$

donde:

- d es la densidad
- E es la exposición en mA.min
- a y b son dos coeficientes gobernados por el espesor del material y el voltaje del tubo.

Los coeficientes a y b son determinados sobre las bases de las líneas rectificadas. Esta determinación es realizada considerando dos ecuaciones que se obtienen a partir de dos puntos conocidos para cada uno de los espesores y voltajes de tubo conocidos.

Así por ejemplo, para el voltaje de tubo de 120 KV y 1 mm de espesor si la referencia es hecha a exposiciones de 1 y 9 mA.min, encontramos las siguientes densidades:

d = 1.08 para la exposición de 1 mA.min

$d = 3.58$ para la exposición de 9 mA.min

Los datos obtenidos los reemplazamos en la ecuación (2.1).

$$1.07 = a + 1b$$

$$3.58 = a + 9b$$

Resolviendo las ecuaciones encontramos los siguientes valores:

$$a = 0.73 \quad b = 0.316$$

Como ya se dijo anteriormente, este procedimiento tendrá que ser aplicado para cada uno de los espesores y voltajes conocidos.

En la tabla 2.8 se reportan los valores de los coeficientes a y b obtenidos a partir del procedimiento explicado, así mismo, en las tablas 2.9 a 2.15 se reportan los valores de la densidad resultante obtenidos a partir de la ecuación (2.1), basados en los coeficientes calculados a y b .

2.3 Determinación de la desviación entre la densidad experimental y algorítmica.

En las tablas 2.16 a 2.22 se reportan las desviaciones, de las densidades experimentales y algorítmica, sobre una base porcentual.

TABLA 2.10

DENSIDAD CALCULADA

KV = 140

EXPOSIC. m ² .min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1	1.13	1.06	1.03	0.93	0.85	0.73	0.7	0.41	-							
2	1.5	1.29	1.14	1.05	0.91	0.78	0.73	0.41								
3	1.98	1.53	1.24	1.11	0.96	0.82	0.75	0.42								
4	2.23	1.76	1.34	1.18	1.01	0.86	0.78	0.42								
5	2.6	2	1.45	1.24	1.07	0.91	0.8	0.43								
7		2.47	1.85	1.58	1.17	0.99	0.85	0.44								
9		2.94	1.85	1.49	1.28	1.08	0.9	0.45								
12	-		2.17	1.68	1.44	1.21	0.97	0.46								
16			2.58	1.93	1.65	1.38	1.05	0.48								
20			2.99	2.18	1.86	1.56	1.16	0.5								
25				2.5	2.13	1.77	1.28	0.53								
30				2.81	2.39	1.98	1.4	0.55								

TABLA 2.11

DENSIDAD CALCULADA

RV = 160

EXPOSIC. m ² /min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1		1.35	1.2	1.16	1.14	0.95	0.83	0.63	0.49	0.43	0.4					
2		1.87	1.66	1.34	1.24	1.01	0.86	0.66	0.5	0.44	0.4					
3		2.38	1.81	1.52	1.35	1.08	0.89	0.67	0.52	0.45	0.41					
4		2.89	2.07	1.7	1.45	1.16	0.92	0.69	0.53	0.46	0.41					
5		3.41	2.33	1.89	1.66	1.22	0.95	0.71	0.56	0.48	0.42					
7			2.94	2.25	1.77	1.35	1.01	0.74	0.59	0.5	0.43					
9			3.35	2.62	1.93	1.48	1.07	0.78	0.61	0.52	0.44					
12			4.12	3.17	2.29	1.68	1.16	0.84	0.66	0.55	0.46					
16				3.9	2.71	1.96	1.28	0.91	0.71	0.6	0.49					
20					3.13	2.22	1.4	0.99	0.77	0.64	0.51					
25					3.66	2.56	1.65	1.08	0.85	0.7	0.54					
30						2.89	1.7	1.18	0.92	0.75	0.57					

TABLA 2.12

KV = 180

DENSIDAD CALCULADA

EXPOSIC. má. min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1		1.65	1.29	1.56	1.3	1.05	0.88	0.73	0.68	0.5	0.48	0.45	0.28			
2		2.32	2.09	1.84	1.53	1.21	1.01	0.81	0.63	0.56	0.5	0.47	0.29			
3		3	2.6	2.13	1.75	1.38	1.13	0.89	0.69	0.59	0.52	0.48	0.3			
4		3.68	3.1	2.41	1.97	1.54	1.26	0.97	0.75	0.64	0.54	0.49	0.31			
5			3.61	2.7	2.2	1.7	1.38	1.05	0.81	0.69	0.56	0.51	0.32			
7				3.27	2.64	2.02	1.63	1.2	0.92	0.79	0.6	0.53	0.34			
9				3.84	3.09	2.35	1.88	1.36	1.03	0.88	0.64	0.56	0.36			
12					3.76	2.93	2.25	1.6	1.2	1.03	0.7	0.5	0.39			
16						3.48	2.74	1.91	1.43	1.22	0.78	0.65	0.43			
20							3.24	2.23	1.66	1.41	0.86	0.7	0.47			
25							3.96	2.63	1.95	1.55	0.96	0.77	0.52			
30								3.02	2.23	1.89	1.06	0.83	0.57			

TABLA 2.13

DENSIDAD CALCULADA

KV = 200

EXPOSIC. m ² .min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1			1.8	1.68	1.4	1.2	0.99	0.85	0.8	0.71	0.6	0.53	0.43	0.35	0.33	
2			2.47	2.23	1.9	1.66	1.24	0.98	0.88	0.75	0.64	0.56	0.46	0.36	0.35	
3			3.15	2.77	2.4	1.99	1.5	1.1	0.95	0.8	0.67	0.58	0.48	0.38	0.36	
4			3.83	3.31	2.9	2.24	1.75	1.23	1.04	0.84	0.7	0.61	0.51	0.39	0.37	
5				3.95	3.4	2.59	2.01	1.35	1.13	0.89	0.74	0.64	0.53	0.41	0.39	
7						3.23	2.52	1.6	1.29	0.98	0.8	0.7	0.58	0.44	0.41	
9						3.93	3.03	1.35	1.45	1.07	0.87	0.75	0.63	0.47	0.44	
12							3.79	2.22	1.59	1.2	0.97	0.84	0.7	0.52	0.48	
16								2.71	2.02	1.38	1.1	0.95	0.79	0.69	0.63	
20								3.21	2.34	1.56	1.23	1.06	0.89	0.65	0.68	
25									2.75	1.79	1.4	1.2	1.01	0.73	0.66	
30									3.15	2.01	1.56	1.34	1.13	0.81	0.71	

TABLA 2.14

DENSIDAD CALCULADA

KV = 220

EXPOSIC. mA,min	ESPESOR m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1			1.76	1.6	1.38	1.26	1.15	1.05	0.95	0.83	0.8	0.65	0.53	0.48	0.4	
2			2.63	2.36	2.17	1.9	1.59	1.21	1.08	0.99	0.91	0.73	0.6	0.54	0.45	
3			3.51	3.13	2.95	2.55	2.04	1.57	1.32	1.15	1.01	0.82	0.66	0.59	0.49	
4				3.9	3.73	3.19	2.48	1.82	1.55	1.21	1.12	0.91	0.73	0.65	0.54	
5						3.84	2.92	2.03	1.78	1.47	1.23	1	0.8	0.7	0.59	
7							3.0	2.59	2.24	1.73	1.45	1.17	0.94	0.81	0.67	
9								3.1	2.71	2.1	1.65	1.34	1.07	0.92	0.75	
12								3.65	3.4	2.53	1.99	1.6	1.28	1.08	0.89	
16										3.21	2.42	1.95	1.55	1.29	1.05	
20										3.85	2.85	2.3	1.82	1.51	1.24	
25											3.39	2.74	2.16	1.78	1.45	
30											3.93	3.17	2.5	2.05	1.63	

TABLA 2.15

KV = 240

DENSIDAD CALCULADA

EXPOSIC. m ² /min	E S P E S O R m m														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
1			1.8	1.26	1.25	1.15	1.13	1.09	0.98	0.83	0.71	0.59	0.48	0.35	0.23
2			2.3	1.8	1.54	1.39	1.32	1.25	1.12	0.97	0.83	0.7	0.59	0.46	0.37
3			2.8	2.25	1.83	1.63	1.5	1.42	1.27	1.11	0.95	0.82	0.69	0.55	0.46
4			3.3	2.69	2.12	1.87	1.69	1.58	1.42	1.25	1.08	0.94	0.8	0.67	0.55
5				3.14	2.42	2.11	1.87	1.75	1.57	1.4	1.21	1.05	0.91	0.77	0.64
7					3	2.53	2.23	2.03	1.85	1.68	1.45	1.3	1.13	0.99	0.82
9						3.63	3.06	2.6	2.41	2.15	1.71	1.54	1.34	1.19	1
12							3.78	3.15	2.9	2.59	2.08	1.9	1.67	1.5	1.27
16								3.89	3.18	2.95	2.58	2.38	2.1	1.91	1.63
20									3.77	3.51	3.08	2.85	2.53	2.33	1.99
25											3.71	3.46	3.07	2.85	2.44
30													3.61	3.37	2.89

TABLA 2.17
 DESVIACION ENTRE LA DENSIDAD EXPERIMENTAL Y ALGORITMICA KV = 140

EXPOSIC.		ESPESOR mm															
mm		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1	4	2	22	25	23	19	20	4									
2	4	6	18	19	15	11	9	2									
3	4	6	7	7	9	7	6	4									
4	6	1	6	6	8	3	8	0									
5	1	0	10	12	20	6	6	0									
7		2	18	17	10	4	5	0									
9		3	7	10	10	17	5	2									
12			14	11	1	7	13	2									
16			1	3	5	7	0.9	0									
20			11	2	1	8	10	4									
25				4	1	4	14	5									
30				2	5	4	4	0									

TABLA 2.19

DESVIACION ENTRE LA DENSIDAD EXPERIMENTAL Y ALGORITMICA $KV = 180$

EXPOSIC. m ² /min	ESPESOR mm															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1		3	6	19	20	4	14	10	5	2	4	0	3			
2		6	4	7	7	3	4	1	6	3	0	0	3			
3		1	0	3	6	0	11	5	5	3	1	0	3			
4		0	2	5	0.5	5	2	8	5	5	1	2	3			
5			0.5	1	5	1	0.7	6	1	4	0	0	6			
7				2	2	1	0.6	5	3	1	5	3	5			
9				1	4	3	3	3	3	4	1	1	11			
12					0.7	6	13	12	6	7	4	0	5			
16						1	5	13	5	0	7	3	9			
20							2	16	18	13	1	5	29			
25							8	4	1	3	7	3	13			
30								4	10	7	4	2	26			

TABLA 2.20

DESVIACION ENTRE LA DENSIDAD EXPERIMENTAL Y ALGORITMICA KV = 300

EXPOSIC. mA, min	E S P E S O R m m																		
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31			
1			2	7	1	13	19	14	25	22	16	15	9	14	12				
2			6	7	2	3	0.8	2	3	16	9	10	10	8	14				
3			3	0.3	1	0	2	5	1	8	5	6	8	13	13				
4			0.7	2	3	4	0	2	9	4	4	0	5	5	5				
5				0.5	2	6	4	2	11	1	1	1	6	7	2				
7						0.3	6	3	0.7	5	10	5	1	9	7				
9						2	0.6	2	5	10	8	5	3	12	6				
12							3	4	4	6	4	4	7	5	2				
16								1	0.9	8	2	1	2	1	1				
20								0.3	2	4	4	6	8	4	6				
25									2	3	0	0	0.9	15	7				
30									1	8	4	5	7	4	0				

TABLA 221

DESVIACION ENTRE LA DENSIDAD EXPERIMENTAL Y ALGORITMICA KV = 220

EXPOSIC. mÁ.min	ESPESOR m.m														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
1			1	1	5	3	13	29	33	38	32	24	27	20	31
2			4	2	6	2	1	37	30	31	40	32	30	25	22
3			3	3	2	3	1	8	3	12	21	18	15	16	8
4				1	0	3	12	18	14	7	8	2	6	15	11
5						4	2	21	20	19	5	4	11	4	5
7							4	10	5	3	4	3	7	13	15
9								06	3	19	11	15	13	15	14
12								10	9	4	25	23	3	5	2
15										4	12	13	15	16	15
20										10	7	6	6	5	7
25											5	8	6	7	7
30											9	8	8	6	7

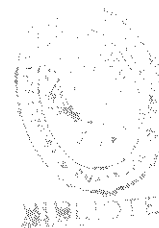


TABLA 2.22

DESVIACION ENTRE LA DENSIDAD EXPERIMENTAL Y ALGORITMICA $KV = 240$

Exposic. m ² /min	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
1		-	10	0	7	14	26	33	33	30	28	20	31	11	0	
2			13	2	4	7	16	17	19	21	19	17	30	17	8	
3			0.7	2	6	4	2	7	11	13	12	10	30	23	15	
4			3	2	3	5	1	2	14	15	14	14	15	14	7	
5				1	2	8	12	14	14	10	13	21	27	24	25	
7					0.6	1	10	13	15	13	5	5	7	12	3	
9					2	2	17	17	26	25	24	9	2	4	7	
12						4	0.9	2	10	13	10	5	16	10	4	
16							9	12	9	7	1	1	10	3	2	
20									9	8	0.6	2	9	7	1	
25											7	5	1	2	1	
30													9	5	0.3	

Las desviaciones resultantes son aceptadas para una aplicación práctica, una vez que se realiza el Δ absoluto, a causa del rango admitido en la densidad de la película.

2.4 Determinación matemática del coeficiente de corrección de la densidad radiográfica.

De los datos mostrados en la tabla 2.8 observamos que el valor para el coeficiente a puede ser asumido, sin ser afectado el espesor, entre 0.75 y 0.80.

Dentro de este rango para a , los resultados de los cálculos no son significativamente afectados con respecto a los valores de la densidad resultante de los ensayos experimentales.

El coeficiente b , por el contrario, parece marcadamente afectado por el espesor del material y el voltaje del tubo.

Los cálculos de la densidad pueden ser ayudados por una relación matemática que se lo obtiene a partir del coeficiente b , como una función continua del voltaje del tubo.

Una vez que se obtiene esta función, se pueden calcular densidades aun con referencia a otros voltajes de tubo que los considerados en esta experiencia.

En las figuras 37 y 38 se muestra la función $b = f(KV)$ para todos los espesores conocidos. La figura 38 es un detalle de la figura 37. Observando los gráficos, la función $b = f(KV)$, es expresada a través de una relación exponencial como la siguiente:

$$b = A (KV/1000)^B \quad (2.2)$$

donde, A y B son coeficientes gobernados por:

- El voltaje del tubo (KV);
- El espesor del material (mm).

Los valores de estos coeficientes son obtenidos a través de las curvas trazadas en las figuras 37 y 38, considerando para cada uno de ellos un sistema de dos ecuaciones obtenidos a partir de dos puntos conocidos.

Así por ejemplo, para el espesor de 3 mm, si la referencia es hecha a voltajes de 120 y 180 KV, obtendremos respectivamente los siguientes valores de b: 0.16 y 0.70.

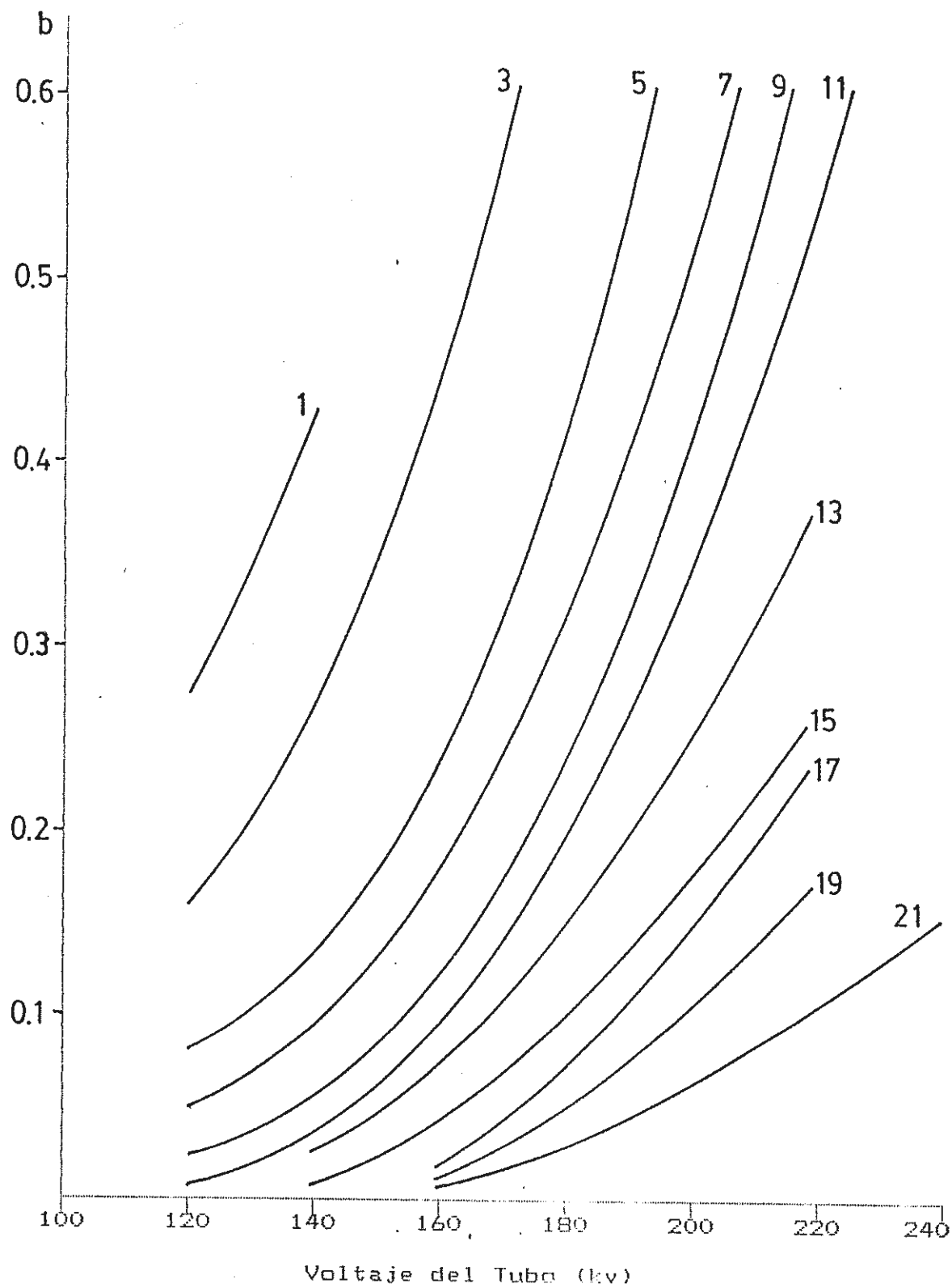
COEFICIENTE b VS VOLTAJE DEL TUBO

FIGURA 37

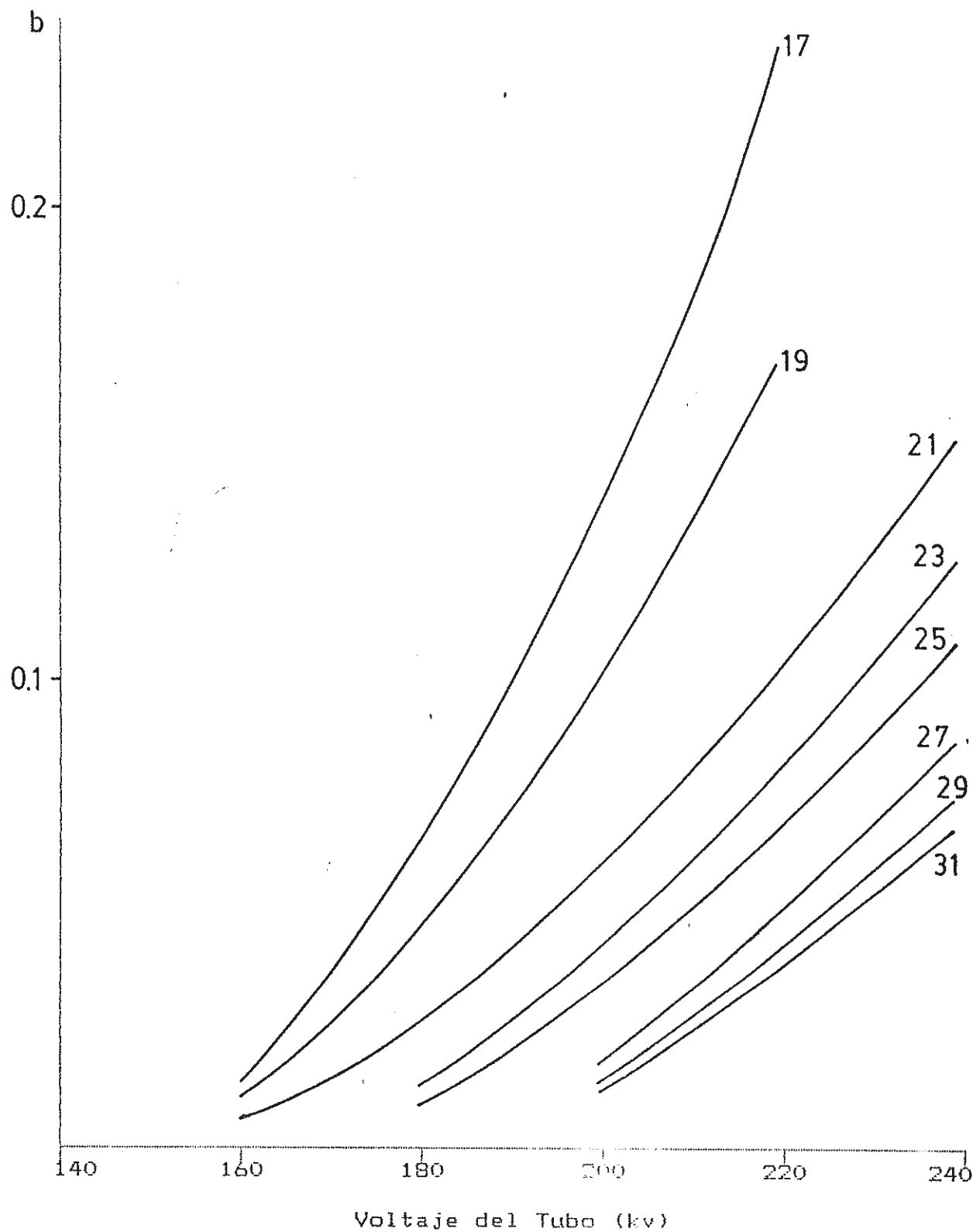
COEFICIENTE b VS VOLTAJE DEL TUBO

FIGURA 38

Reemplazando los valores en la ecuación (2.2), tenemos:

$$0.16 = A (0.12)^B$$

$$0.70 = A (0.18)^B$$

Dividiendo miembro por miembro y aplicando logaritmos, tenemos:

$$\log (0.16/0.70) = B \log (0.12/0.18)$$

por lo tanto

$$B = 3.64$$

$$A = 0.16 / (0.12)^{3.64} = 360$$

De aquí la ecuación (2.2) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$b = 360 (KV/1000)^{3.64}$$

cuando la referencia es hecha a espesores de 3 mm.

Con el fin de confirmar la fiabilidad de este procedimiento, en la tabla 2.23 se muestra una comparación entre los valores de b evaluados y calculados, con referencia a un espesor de 9 mm.

En la tabla 2.24 se muestran todos los valores del coeficiente b para todos los espesores y voltajes de tubo conocidos.

Como se ha dicho previamente, la disponibilidad de la relación matemática para el coeficiente b, como una

TABLA 2.23

VALORES EVALUADOS Y CALCULADOS DEL COEFICIENTE b
CON REFERENCIA A UN ESPESOR DE 9 mm

VOLTAJE DEL TUBO KV	120	140	160	180	200	220
EVALUADO	0.023	0.053	0.105	0.223	0.5	0.783
CALCULADO	0.023	0.054	0.111	0.212	0.378	0.637
DESVIACION %	0	1	5	4	24	19

TABLA 224
VALORES DEL COEFICIENTE b

VOLTAGE	E S P E S O R m m														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
KV															
120		0.16	0.079	0.045	0.023	0.013									
140		0.28	0.151	0.080	0.054	0.033	0.024	0.016							
160		0.455	0.258	0.136	0.111	0.075	0.057	0.038	0.016	0.011	0.006				
180		0.7	0.43	0.239	0.212	0.153	0.123	0.085	0.041	0.03	0.015	0.014	0.01		
210		1.027	0.677	0.512	0.373	0.291	0.243	0.171	0.102	0.074	0.036	0.031	0.024	0.019	0.015
220		1.453	1.011	0.817	0.637	0.52	0.451	0.335	0.232	0.166	0.075	0.064	0.053	0.042	0.035
240		1.935	1.457	1.223	1.025	0.834	0.733	0.544	0.43	0.348	0.15	0.135	0.108	0.083	0.075

función continua del voltaje del tubo, permite obtener otros valores que los involucrados en esta experiencia.

Además, valores adicionales del coeficiente b para voltajes de tubo mayores que 240 KV se muestran en la tabla 2.25 con incrementos de 20 KV.

En la tabla 2.26 se reportan valores de b para rangos entre 130 a 190 KV con incrementos de 20 KV.

2.5 Determinación matemática de la exposición radiográfica.

Como se sabe, algunas relaciones matemáticas fueron hechas previamente, derivadas de los datos procesados de los resultados experimentales.

Sobre la base de la ecuación lineal:

$$d = a + b \cdot E \quad (2.1)$$

que expresa la variación de la densidad de la película con la exposición radiográfica, el coeficiente b fue determinado como una función del voltaje del tubo y del espesor del material:

TABLA 225
VALORES DEL COEFICIENTE b PARA VOLTAJES DE TUBO MAYORES DE 240 KV

VOLTAJE	E S P E S O R m m														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
240		2.609	2.041	1.794	1.591	1.441	1.304	1.091	0.976	0.689	0.280	0.23	0.209	0.172	0.152
280		3.495	2.787	2.556	2.330	2.264	2.159	2.078	1.946	1.256	0.51	0.404	0.357	0.322	0.292
300		4.404	3.725	3.456	3.435	3.449	3.377	3.757	3.341	2.104	0.82	0.633	0.634	0.574	0.526

TABLA 2.26
VALORES DEL COEFICIENTE b PARA VOLTAJES DE TUBO DESDE 130 HASTA 250 KV

VOLTAGE	E S P E S O R m m															
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
130		0.214	0.111	0.056	0.026	0.021										
150		0.26	0.202	0.129	0.078	0.05	0.033	0.0291	0.0026	0.0063						
170		0.338	0.242	0.235	0.155	0.103	0.065	0.027	0.025	0.018	0.0037					
190		0.382	0.546	0.4	0.235	0.213	0.174	0.071	0.056	0.048	0.023	0.021	0.016	0.012	0.0065	
210		1.227	0.821	0.646	0.494	0.332	0.324	0.17	0.156	0.112	0.062	0.045	0.036	0.029	0.023	
230		1.703	1.219	0.948	0.812	0.632	0.612	0.325	0.34	0.242	0.167	0.09	0.076	0.062	0.052	
250		2.314	1.72	1.437	1.232	1.124	1.024	0.725	0.637	0.483	0.207	0.171	0.151	0.124	0.103	
270		3.053	2.332	2.148	1.937	1.814	1.704	1.514	1.35	0.951	0.332	0.306	0.235	0.237	0.212	
290		3.972	3.23	3.023	2.834	2.626	2.71	2.32	2.406	1.748	0.674	0.628	0.517	0.432	0.339	

$$b = A (KV/1000)^B \quad (2.2)$$

Con referencia a la expresión matemática del coeficiente b , una relación, de gran practicidad, podrá ser determinada en función de la exposición.

Esta relación implica el valor de la exposición para un espesor dado, con referencia a un valor de densidad estándar.

$$E = f(S) \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) podrá ser determinada para un voltaje de tubo dado, o al menos para valores discretos, suficientemente cercanos y consistentes con el rango perteneciente al equipo disponible.

Esta ecuación es asumida como la ley general de la exposición radiográfica, ya que permite calcular rápidamente la exposición. El procedimiento para su determinación es discutido en el párrafo siguiente.

2.5.1 Representación gráfica.

Para hallar la representación gráfica de la función exposición se parte de la ecuación

(2.1), que se resuelve con respecto a E como:

$$E = (d - a)/b \quad (2.4)$$

En ésta fórmula:

- d es el nivel de densidad que es asumido como un valor fijo para todas las exposiciones de interés.
- a y b son los coeficientes considerados en los párrafos anteriores.

En cuanto al presente estudio, el valor de la densidad es asumido como 2, que se encuentra dentro del rango admitido por el código ASME (Ref.2).

El coeficiente a es expresado para valores confinados dentro de la banda límite y es asumido como:

a = 0.75 para voltajes de tubo de hasta 200 KV (incluido).

a = 0.80 para voltajes de tubo mayores que 200 KV.

De las asunciones arribas mencionadas, el valor de la exposición E deberá ser

calculado a través de la fórmula (2.4), con referencia a una densidad de 2.

Los resultados de los cálculos son reportados en las tablas 2.27 y 2.28, posteriormente se realizan las gráficas de la exposición contra el espesor para cada uno de los voltajes, obteniéndose una familia de curvas logarítmicas.

Estas curvas se muestran en las figuras 39 y 40.

Un punto importante a ser observado, con respecto a la validez de los resultados, es que todos los valores obtenidos son limitados a las condiciones de exposición igual a los adoptados en los ensayos experimentales, estas condiciones fueron las siguientes:

- Equipo: Seifert
- Tipo de película: Structurix D7
- Distancia fuente-película: 70 cm

2.5.2 Representación algorítmica.

La determinación de la expresión matemática de la función E es el paso final del

TABLA 227

VALORES DE LA FUNCION EXPOSICION PARA UNA DENSIDAD IGUAL A 2 (DESDE 120 HASTA 300 KV CON INCREMENTOS DE 20 KV)

VOLTAJE KV	ESPESOR m.m														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
120		7.81	15.82	27.78	54.35	96.15									
140		4.46	8.28	13.44	23.15	37.98	52.08	260							
160		2.74	4.72	7.1	11.26	16.67	21.93	78.13	83.33	113.64	308.33				
180		1.79	2.87	4.15	5.9	8.17	10.16	27.78	30.49	41.67	80.33	89.29	136		
200		1.22	1.85	2.44	3.31	4.3	5.14	11.26	12.25	16.89	35.71	40.32	52.08	65.79	80.33
220		0.83	1.19	1.43	1.88	2.31	2.66	4.71	5.17	7.33	16	18.75	22.64	28.57	34.38
240		0.6	0.82	0.93	1.17	1.26	1.51	2.21	2.45	3.45	8	9.6	11.11	13.64	16
260		0.46	0.59	0.67	0.75	0.83	0.9	1.1	1.23	1.74	4.24	5.22	5.74	6.98	7.89
280		0.34	0.43	0.47	0.5	0.53	0.56	0.63	0.65	0.93	2.35	2.97	3.1	3.73	4.11
300		0.27	0.32	0.34	0.34	0.36	0.36	0.32	0.35	0.51	1.36	1.76	1.75	2.09	2.23

TABLA 2.23

VALORES DE LA FUNCION EXPOSICION PARA UNA DENSIDAD IGUAL A 2 (DESDE 130 HASTA 230 KV CON INCREMENTOS DE 20 KV)

VOLTAJE		E S P E S O R m m														
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
120		5.94	11.26	19.23	34.72	59.52										
140		3.47	6.19	9.69	16.02	25	32.93	43.26	145.25	198.41						
160		2.2	3.65	5.32	8.06	11.57	14.71	46.3	60	69.44	138.67					
180		1.47	2.29	3.43	4.39	5.97	7.19	17.61	18.94	26.04	54.35	69.52	78.10	104.17	131.53	
200		0.98	1.44	1.95	2.43	3.06	3.59	7.06	7.69	10.71	23.03	26.67	30.33	41.33	52.17	
220		0.7	0.93	1.2	1.48	1.76	1.94	3.2	3.53	4.96	11.21	13.43	15.79	19.25	23.08	
240		0.52	0.69	0.91	0.94	1.06	1.16	1.95	1.72	2.43	5.8	7.02	7.95	9.69	11.11	
260		0.39	0.5	0.56	0.61	0.66	0.7	0.79	0.89	1.26	3.14	3.92	4.2	5.06	5.66	
280		0.3	0.37	0.4	0.41	0.43	0.44	0.43	0.48	0.69	1.78	2.27	2.32	2.78	3.01	

EXPOSICION VS ESPESOR

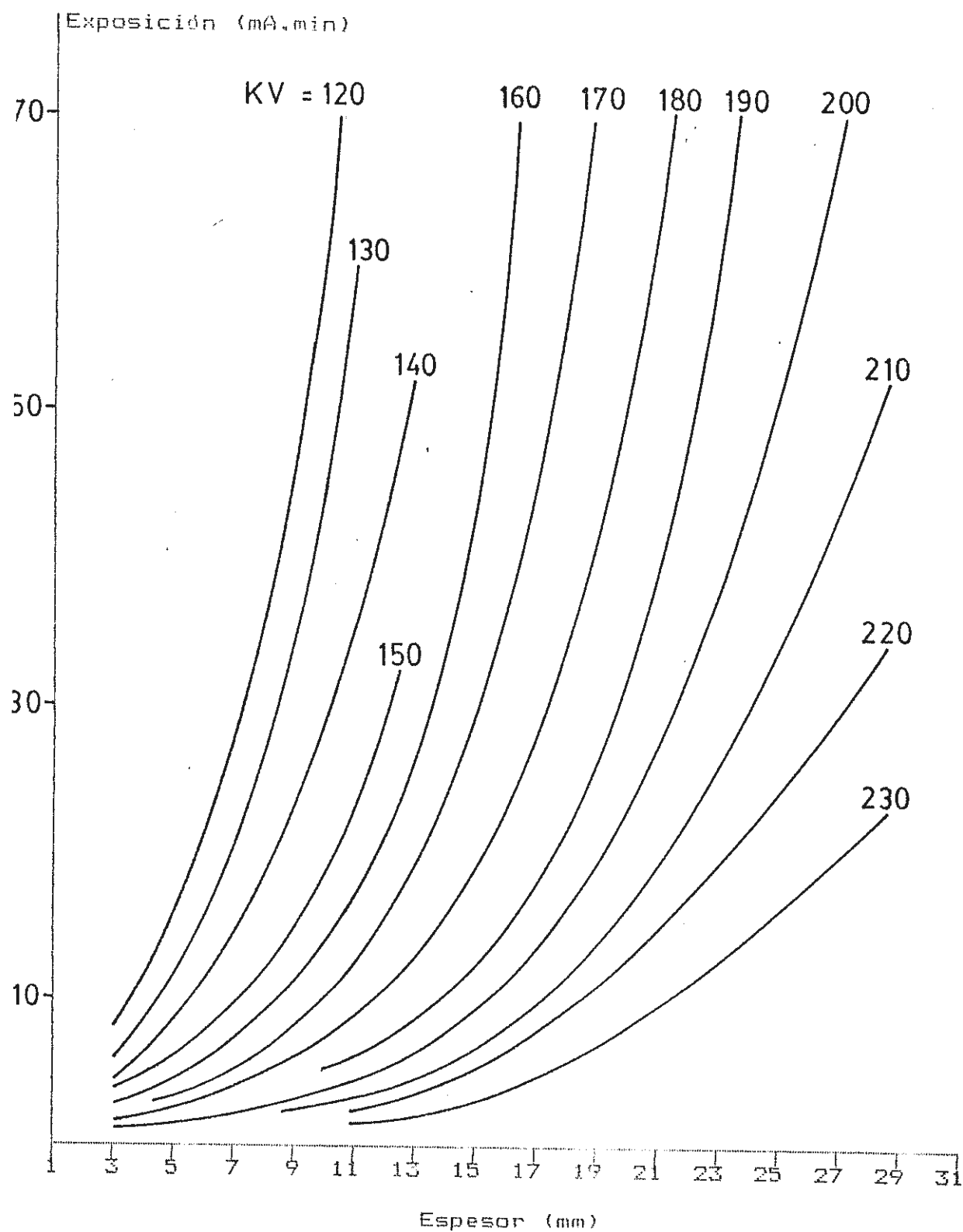


FIGURA 39

EXPOSICION VS ESPESOR

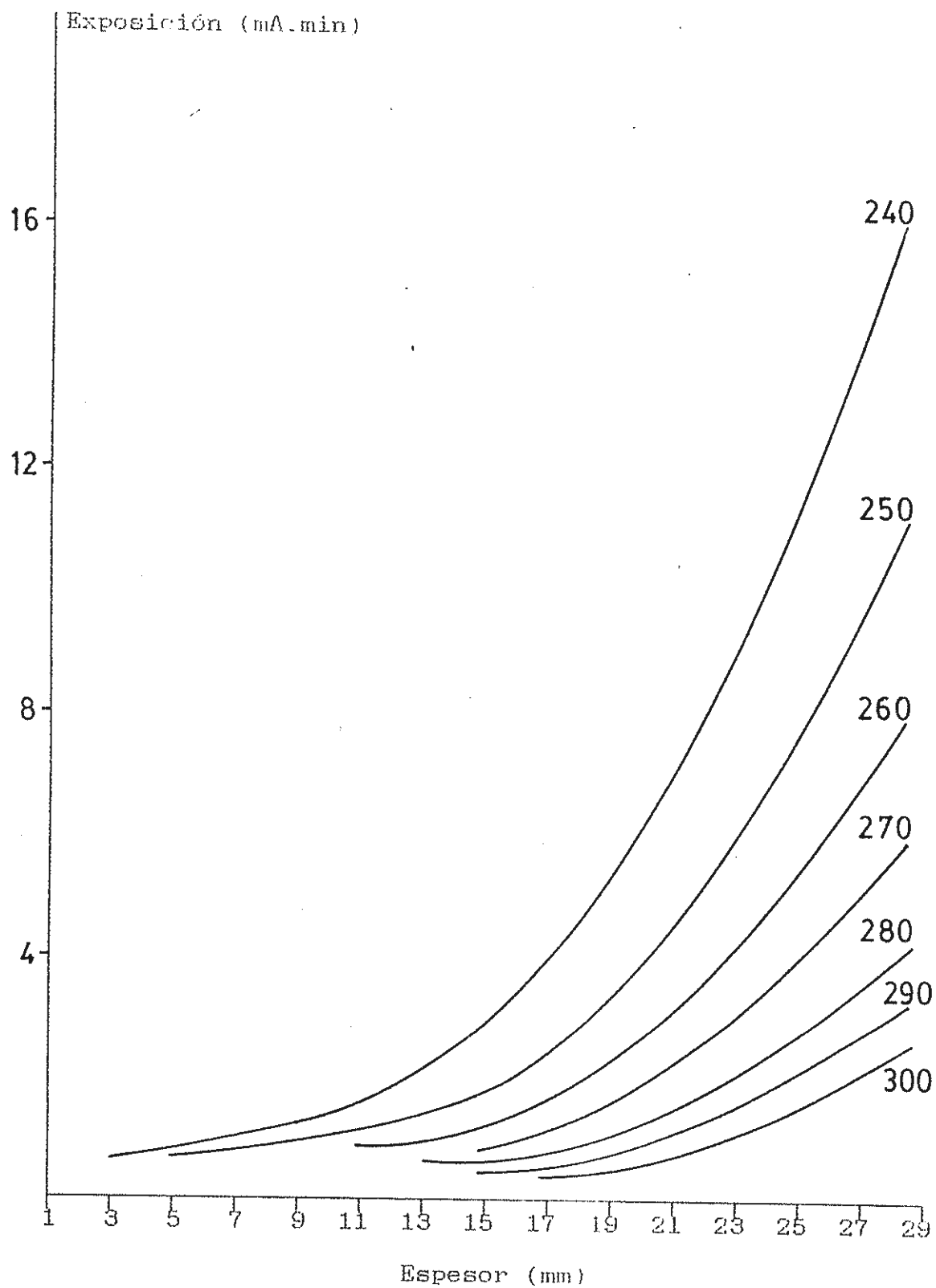


FIGURA 40

procesamiento de datos, relacionados con los resultados experimentales.

La familia de curvas mostradas en las figuras 39 y 40 exhiben una figura exponencial y por lo tanto pueden ser expresadas por la siguiente relación:

$$E = M e^{NT} \quad (2.5)$$

donde:

- T es el espesor del material
- M y N son dos coeficientes gobernados por el voltaje del tubo.

Los valores de los coeficientes M y N se determinan resolviendo la ecuación (2.5) con referencia a dos puntos conocidos.

Así por ejemplo, para el voltaje de tubo de 120 KV los siguientes dos puntos son considerados:

espesor: 3 mm;	exposición: 7.81 mA·min
espesor: 11 mm;	exposición: 96.15 mA·min

Estos valores fueron obtenidos de la tabla 2.27.

Reemplazamos los valores obtenidos en la ecuación (2.5)

$$7.81 = Me^{3N}$$

$$96.15 = Me^{11N}$$

Dividiendo estas ecuaciones miembro por miembro y resolviendo tenemos:

$$\ln (7.81/96.15) = \ln e^{(3-11)N}$$

$$\ln (7.81/96.15) = -8N \ln e$$

$$N = 0.314$$

Introduciendo el valor de N en cualquiera de las dos ecuaciones anteriores, se obtiene el valor de M

$$M = 7.81/e^{3(0.314)} = 3.04$$

Repitiendo este procedimiento para todos los voltajes de tubo entre 120 y 300 KV con incrementos de 10 KV, se obtienen los valores para M y N y sus resultados se reportan en la tabla 2.29.

La validez de la ecuación (2.5) es persistente aun cuando otras distancias diferentes de 70 cm son consideradas, una vez que la ecuación misma es modificada de la siguiente manera:

TABLA 228

COEFICIENTES M Y N PARA LA FUNCION EXPOSICION

KV	M	N	KV	M	N
120	3.046	0.314	220	0.585	0.128
130	2.445	0.29	230	0.495	0.115
140	2	0.267	240	0.441	0.102
150	1.655	0.247	250	0.398	0.089
160	1.392	0.226	260	0.359	0.077
170	1.181	0.207	270	0.32	0.066
180	1.013	0.19	280	0.288	0.055
190	0.875	0.173	290	0.262	0.045
200	0.761	0.157	300	0.245	0.032
210	0.639	0.142			

$$E = M \cdot e^{NT} \cdot (D/70)^2 \quad (2.6)$$

Por la introducción de un factor correctivo representado por la ley del inverso al cuadrado (Ref. 1). Además, para diferentes equipos, que el utilizado en el ensayo experimental, su aplicabilidad sigue en vigencia.

2.5.3 Aplicación del algoritmo matemático para simulación de la exposición.

La exposición radiográfica puede ser simulada en cursos de entrenamiento a través de la relación:

$$d = a + A (KV/1000)^B \cdot E \quad (2.7)$$

Todos los factores involucrados en esta fórmula pueden ser usados en un programa para computadora, con el fin de entrenar a futuros radiografistas.

Los coeficientes A y B han sido determinados de acuerdo al procedimiento seguido en el párrafo 2.4 y sus resultados,

con referencia al espesor, se muestran en la tabla 2.30.

De ésta manera queda determinado el coeficiente b de la función densidad, para valores continuos, lo cual permite la simulación de la exposición con referencia a cualquier condición.

Una simulación de exposición puede ser llevada a cabo siguiendo la siguiente secuencia.

Parámetros de exposición que pueden ser asumidos:

KV - mA - min

con referencia al espesor de lo radiografiado, se determinan los coeficientes A y B y posteriormente se calcula b , con referencia al valor adoptado por el voltaje del tubo:

$$b = A (KV/1000)^B$$

TABLA 230

COEFICIENTES A Y B PARA LA FUNCION DENSIDAD

ESPESOR m m	A	B	ESPESOR m m	A	B
3	360	3.64	19	66751	8.52
5	589	4.21	21	12486	7.94
7	1123	4.78	23	6509	7.61
9	2554	5.48	25	14454	8.27
11	5340	6.1	27	14304	8.41
13	8362	6.49	29	22194	8.83
15	133911	8.7	31	32596	9.16
17	104863	8.6			

La densidad de la película se determina de la exposición resultante de acuerdo a las condiciones previamente asumidas:

$$d = a + b \cdot E$$

donde, como se dijo anteriormente, el coeficiente a vale 0.75 hasta voltajes de 200 KV y 0.80 para KV mayores.

El valor obtenido de densidad se refiere al tipo de película Structurix D7 y a una distancia de fuente película de 70 cm.

Para obtener densidades a diferentes distancias se introduce el siguiente factor correctivo:

$$d = a + b \cdot E (70/D)^2 \quad (2.8)$$

Para obtener densidades con diferentes tipos de película, que la D7, también se introduce un factor de corrección pero su desarrollo se verá en el siguiente capítulo.

CAPITULO III

DETERMINACION DE FACTORES DE CORRECCION PARA EL USO DE PROGRAMAS DE EXPOSICION RADIOGRAFICA.

3.1 Determinación de curvas sensitométricas.

Hasta ahora las películas radiográficas, Structurix D7, han sido consideradas como un factor constante, sin embargo, con el objeto de ensanchar el rango de aplicabilidad de la exposición matemática nos vamos a ayudar de sus propiedades sensitométricas.

Como es bien conocido, las curvas sensitométricas de las películas radiográficas son una herramienta útil en la determinación de la exposición, tanto para hallar factores de corrección así como para comparar diferentes tipos de películas.

Con el objeto de encontrar la expresión matemática de las curvas sensitométricas se han seleccionado las películas Structurix D7 y D4, para realizar nuevas exposiciones experimentales, afin de encontrar sus propiedades radiográficas.

3.1.1 Condiciones para la exposición radiográfica.

Con referencia al tipo de película D7, se deben llevar a cabo 15 exposiciones experimentales bajo las siguientes condiciones:

- Espesor del acero: 15 mm
- Voltaje del tubo: 200 KV
- Distancia fuente-película: 50 cm
- Valores de exposición: de 0.5 a 10 mA·min con incrementos de acuerdo a las series mostradas en la tabla 3.1.

La densidad resultante se la evalúa en un densitómetro digital y la exposición mínima, es decir 0.5 mA·min, se la asume como de referencia para todas las otras exposiciones.

Una segunda serie de exposiciones tienen que ser llevadas a cabo, pero esta vez con la película D4, bajo las mismas condiciones que para la D7 con excepción de los valores de exposición, a causa de la menor velocidad de la película D4 en comparación con la D7.

Estas series involucran 12 exposiciones de 2 a 40 mA·min, a diferentes incrementos, tal como se muestra en la tabla 3.2.

La exposición relativa se la determina con referencia al valor de 0.5 mA·min que es la misma exposición de la serie anterior.

3.1.2 Resultados experimentales.

En la tabla 3.1 se reportan los valores de la densidad, para la película D7, obtenidos tanto experimental y algorítmicamente de acuerdo a la fórmula:

$$d = 0.75 + A (200/1000)^m - E (70/50)^n \quad (3.1)$$

comparando las densidades experimental y algorítmica podemos darnos cuenta que las desviaciones resultantes son aceptables.

En la tabla 3.2 se reportan los resultados para la película D4, finalmente en la figura 41 se muestran las curvas sensitométricas para ambos tipos de película.

3.2 Representación algorítmica de las curvas sensitométricas

Las curvas trazadas en la figura 41, muestran una forma exponencial por lo tanto la relación matemática para éste tipo de curvas es la siguiente:

$$d = c e^{\beta D} \quad (3.2)$$

Donde:

- β es el logaritmo de la exposición relativa.
- C y D son coeficientes de caracterización de la película.

Los valores de coeficientes C y D se los obtiene tomando dos puntos para cada tipo de película de la figura 41 y adoptando el mismo procedimiento que el usado para las funciones de exposición, discutido en el capítulo anterior.

Por ejemplo, para la película D7:

$$1) d = 1.16 \quad \beta = \log (E/E_0) = 0.70$$

$$2) d = 2.82 \quad \beta = \log (E/E_0) = 1.25$$

reemplazando los valores obtenidos en la fórmula (3.2), tenemos:

$$1.16 = C e^{0.70 \beta}$$

TABLA 3.1

EXPOSICIONES RADIOGRAFICAS CON PELICULA D7
(PLANCHA DE ACERO DE 15 mm)

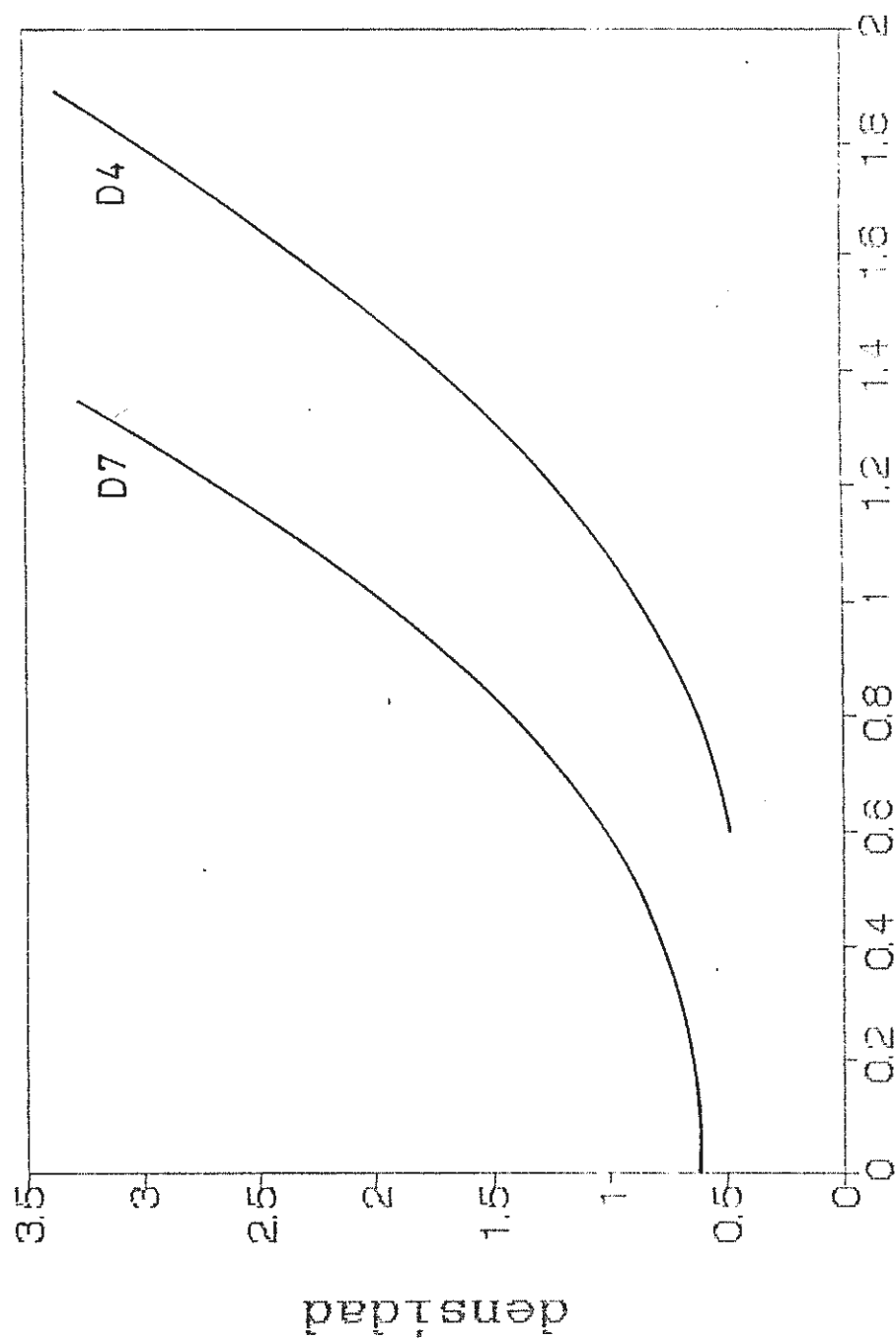
EXPOSICION Nº	EXPOSICION mA min	E/E.	log E/E.	DENSIDAD	
				EXPERIM.	ALGORIT.
1	0.5	1	0	0.7	0.86
2	1	2	0.3	0.81	0.97
3	1.5	3	0.48	0.95	1.09
4	2	4	0.6	1.1	1.19
5	2.5	5	0.7	1.16	1.29
6	3	6	0.78	1.25	1.4
7	3.5	7	0.84	1.49	1.51
8	4	8	0.9	1.63	1.62
9	4.5	9	0.95	1.78	1.73
10	5	10	1	1.99	1.84
11	6	12	1.09	2.01	2.05
12	7	14	1.14	2.27	2.27
13	8	16	1.2	2.5	2.49
14	9	18	1.25	2.82	2.71
15	10	20	1.3	3.03	2.93

TABLA 3.2

EXPOSICIONES RADIOGRAFICAS CON PELICULA D4
(PLANCHA DE ACERO DE 15 mm)

EXPOSICION Nº	EXPOSICION mA min	E/E.	log E/E.	DENSIDAD	
				EXFERIM.	-----
1	2	4	0.6	0.48	
2	3	6	0.78	0.61	
3	4	8	0.9	0.75	
4	6	12	1.08	0.98	
5	8	16	1.2	1.19	
6	10	20	1.3	1.4	
7	12	24	1.29	1.62	
8	16	32	1.5	1.97	
9	20	40	1.6	2.29	
10	25	50	1.7	2.6	
11	30	60	1.78	2.97	
12	40	80	1.9	3.34	

DENSIDAD VS LOG. DE EXPOSICION RELATIVA



B

FIGURA 41

$$2.82 = C e^{1.25 D}$$

$$1.16/2.82 = e^{(0.7 - 1.25) D} = e^{-0.55 D}$$

$$D = 1.62$$

$$1.16 = C e^{(0.70) 1.62}$$

$$C = 0.37$$

Por lo tanto, la expresión matemática de la curva sensitométrica para la película D7 será:

$$d = 0.37 e^{1.62 D}$$

Repitiendo el mismo procedimiento para la película D4, se obtienen los siguientes coeficientes:

$$C = 0.19$$

$$D = 1.50$$

En la tabla 3.3 se muestran los valores de la densidad calculada a través de la fórmula (3.2), así como también los valores de la densidad obtenidos experimentalmente.

3.3 Aplicación del algoritmo matemático para programas de exposición radiográfica.

La disponibilidad de la expresión matemática, para las curvas sensitométricas, permite un uso más

TABLA 3.3

COMPARACION ENTRE LAS DENSIDADES EXPERIMENTAL Y ALGORITMICA

EXPOSICION RELATIVA	TIPO DE PELICULA			
	D7		D4	
	EXPERIMENTAL	ALGORITMICA	EXPERIMENTAL	ALGORITMICA
1	0.7	0.37		
2	0.81	0.61		
3	0.95	0.81		
4	1.1	0.99	0.48	0.48
5	1.16	1.16		
6	1.35	1.32	0.61	0.63
7	1.49	1.45		
8	1.63	1.6	0.75	0.75
9	1.78	1.74		
10	1.89	1.88		
12	2.01	2.14	0.98	0.98
14	2.27	2.36		
16	2.5	2.6	1.19	1.17
18	2.82	2.82		
20	3.03	3.06	1.4	1.36
24			1.62	1.53
32			1.97	1.84
40			2.28	2.13
50			2.6	2.48
60			2.87	2.79
80			3.34	3.34

extendido de los valores de la exposición radiográfica, considerados en el capítulo anterior.

Estos valores fueron limitados por las condiciones usadas en la exposición experimental, es decir, por el tipo de película y equipo utilizado.

La extensión del cálculo para otros tipos de película y equipos serán considerados en los siguientes párrafos.

3.3.1 Determinación del factor de corrección para cambios en el equipo radiográfico.

Cuando en la determinación de la densidad, a través de la ecuación (2.1), se utiliza un equipo radiográfico diferente al usado en el ensayo experimental, se obtendrán algunos valores diferentes a los obtenidos en la experimentación, utilizando los mismos parámetros (KV, mA·min).

La razón de ésta desviación consiste en la eficiencia del tubo entre un equipo y otro. Se ha observado que en tubos más eficientes se obtienen densidades más grandes.

La corrección puede ser inmediatamente encontrada con referencia a la curva sensitométrica para la película D7. De la figura 42, vamos a suponer que d_1 es el valor calculado de la densidad mientras que d_2 es el valor real de la densidad, ambas exposiciones hechas sobre el mismo espesor de material.

El log de exposición relativa relacionado con las exposiciones real y calculada son β y β_c respectivamente.

Como ya se dijo anteriormente dependiendo del equipo que se esté utilizando, va a existir una diferencia entre los valores de las exposiciones calculada y real, esta diferencia es expresada como $\beta_c - \beta$, por lo tanto, se aplica el siguiente cálculo:

$$\begin{aligned} d_1 &= C e^{D\beta_c} & d_2 &= C e^{D\beta} \\ \beta_c &= 1/D \ln (d_1/C) & \beta &= 1/D \ln (d_2/C) \\ \beta_c - \beta &= 1/D [\ln d_1/C - \ln d_2/C] \\ &= 1/D \ln (d_1/C \cdot C/d_2) \\ \beta_c - \beta &= 1/D \ln d_1/d_2 \end{aligned}$$

Posteriormente:

DENSIDAD VS LOG. DE EXPOSICION RELATIVA

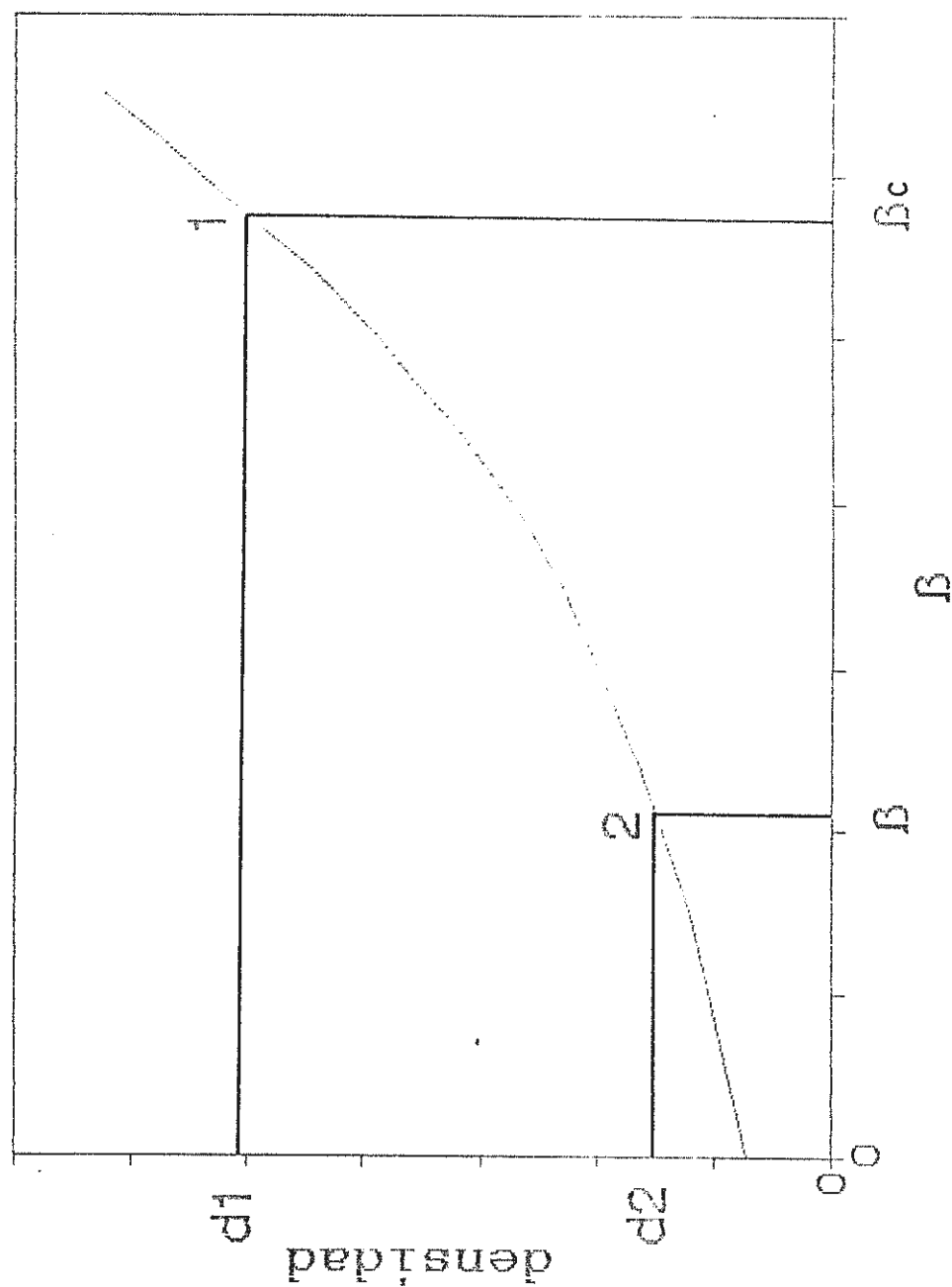


FIGURA 42

$$K_2 = \text{antilog} [1/D \ln d_1/d_2] \quad (3.3)$$

la relación entre la exposición E_1 , asumida en los cálculos, con referencia a la densidad d_1 y la exposición real E_2 que produce la densidad d_2 , será la siguiente:

$$E_1 / E_2 = K_2 \quad (3.4)$$

por lo tanto K_2 será considerado como un factor de corrección.

Si el factor K_2 es ingresado en la función densidad, la ecuación quedará expresada de la siguiente manera:

$$d = a + A (KV/1000)^B \cdot E/K_2 (70/D)^2 \quad (3.5)$$

Si $K_2 < 1$ se obtienen densidades grandes, por lo tanto, el tubo de rayos X de interés es más eficiente que el usado en el ensayo experimental.

Si $K_2 > 1$ se obtienen densidades pequeñas, por lo tanto, el tubo de rayos X de interés

es menos eficiente que el usado en el ensayo experimental.

Ahora bien, si el factor K_2 es ingresado en la función exposición, los efectos de este factor serán opuestos a los señalados en la función densidad y su ecuación quedará expresada de la siguiente manera:

$$E_c = K_2 \cdot M \cdot e^{NT} \cdot (D/70)^2 \quad (3.6)$$

Del análisis hecho en este párrafo podemos concluir que el factor K_2 puede ser asumido como el factor de calibración para el equipo disponible.

3.3.2 Determinación del factor de corrección para cambios en el tipo de película.

Utilizando la ecuación (2.1) se puede determinar la densidad radiográfica aún cuando se utiliza otro tipo de película diferente de la Structurix D7.

Desde un punto de vista general, el problema es resuelto considerando las dos curvas, es decir la de la película D7 y la

de la otra película, sobre un mismo diagrama, como se muestra en la figura 43.

Aquí la curva 1 se refiere a la película D7.

Aplicando los siguientes cálculos tenemos:

$$\begin{aligned} d_1 &= C_1 e^{D_1} & d_2 &= C_2 e^{D_2} \\ d_2/d_1 &= C_2/C_1 (e^{D_2} / e^{D_1}) \\ &= (C_2/C_1) e^{(D_2 - D_1)} \end{aligned}$$

De aquí:

$$d_2 = d_1 (C_2 / C_1) e^{(D_2 - D_1)} \quad (3.7)$$

La ecuación resultante muestra como la densidad d_2 para la película de interés es derivada del valor de d_1 , calculado con referencia a la película ensayada. El logaritmo de exposición relativa y los coeficientes de caracterización ya fueron calculados anteriormente.

Ahora bien, cuando la función exposición es lo que nos interesa, la ecuación (2.5) tiene que ser corregida por un factor que lo vamos a llamar K_1 .

DENSIDAD VS LOG. DE EXPOSICION RELATIVA

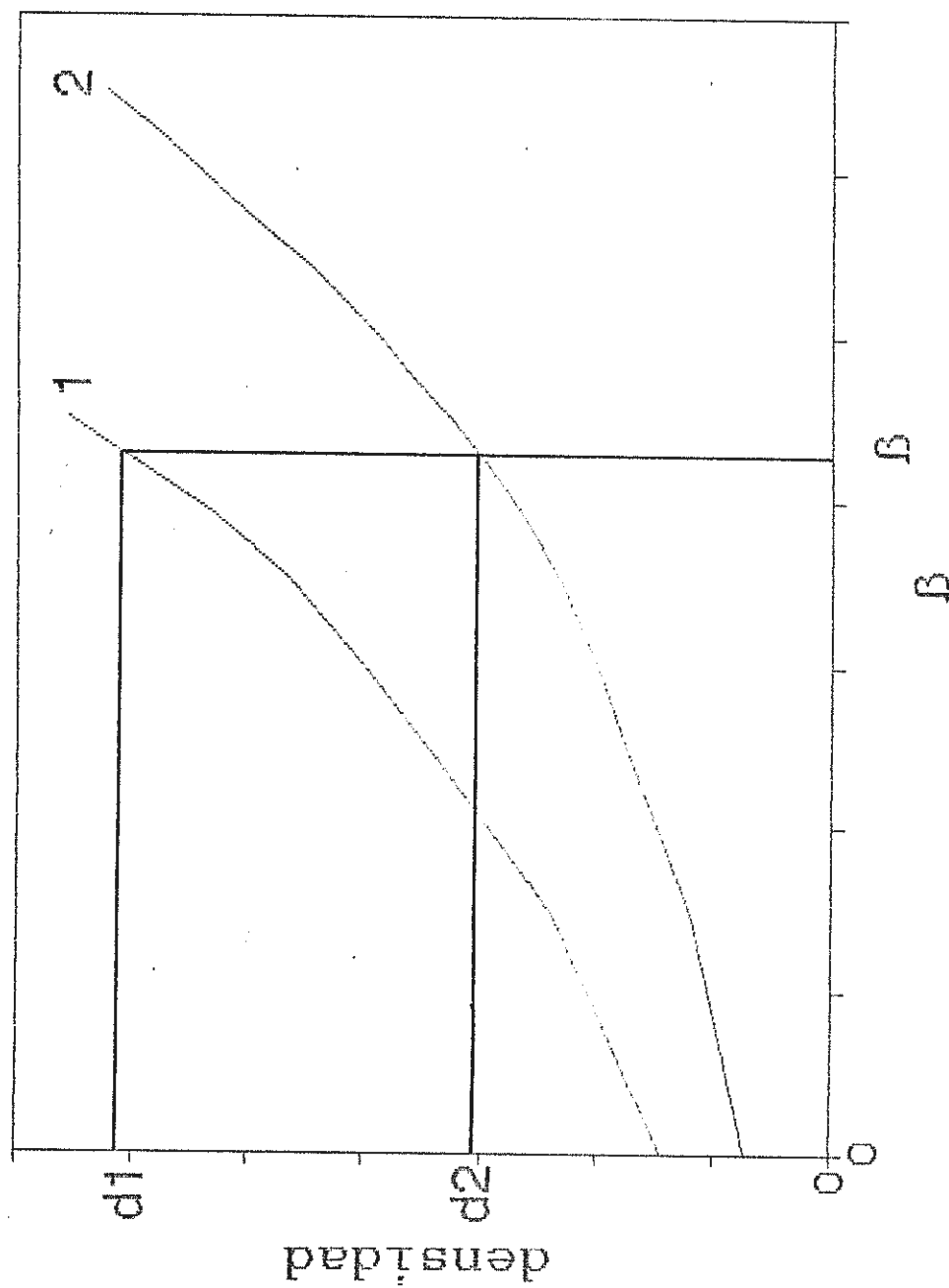


FIGURA 43

Este factor puede ser determinado de la siguiente manera, con referencia a la figura 44.

Asumimos que se requiere en la película tipo 2 una densidad d .

El logaritmo de exposición relativa para esta película es β_2 , mientras que para la película D7 el logaritmo de exposición relativa será β_1 , para un mismo nivel de sensibilidad.

La exposición necesitada para la película 2 es determinada a través de la relación con la película D7 basado en la diferencia de $\beta_2 - \beta_1$. Se aplican los siguientes cálculos:

$$d = C_1 e^{\beta_1 D_1}$$

$$d = C_2 e^{\beta_2 D_2}$$

de aquí:

$$\beta_1 = 1/D_1 \ln d/C_1 \quad \beta_2 = 1/D_2 \ln d/C_2$$

$$\begin{aligned} \beta_2 - \beta_1 &= 1/D_2 \ln d/C_2 - 1/D_1 \ln d/C_1 \\ &= \ln (d/C_2)^{1/D_2} - \ln (d/C_1)^{1/D_1} \end{aligned}$$

$$\beta_2 - \beta_1 = \ln [(d/C_2)^{1/D_2} / (d/C_1)^{1/D_1}] = K$$

DENSIDAD VS LOG. DE EXPOSICION RELATIVA

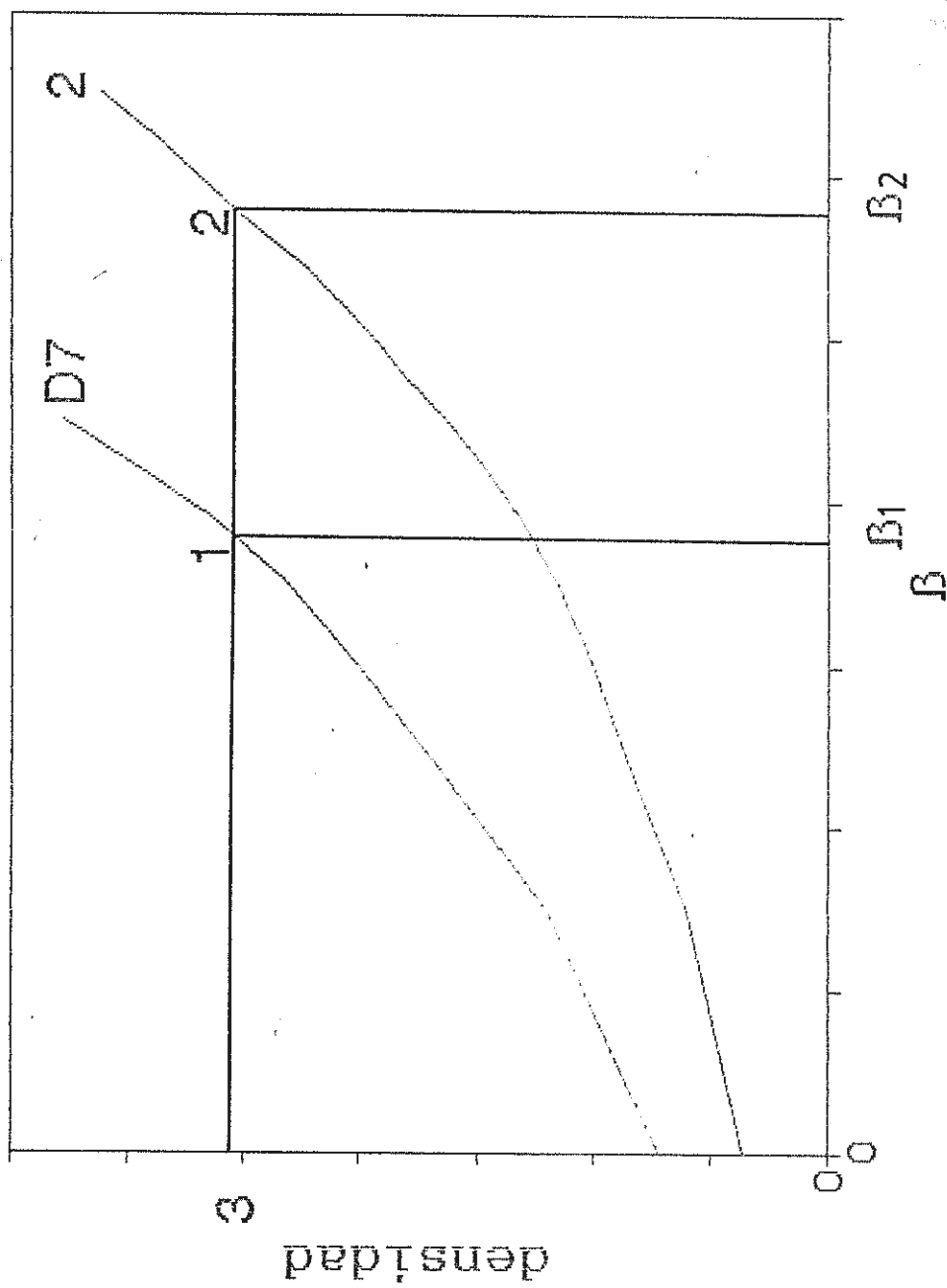


FIGURA 44

Por lo tanto la relación entre las exposiciones será:

$$E_2/E_1 = \text{antilog } K = K_1 \quad (3.8)$$

como K_1 está en función de los coeficientes de caracterización de la película y el nivel requerido de densidad, el uso de la ecuación (2.5) aun para otras películas diferentes de la Structurix D7 queda plenamente confirmada.

Con referencia al tipo de película Structurix D4 y un nivel de densidad de 2, el factor de corrección K_1 para éste tipo de película será:

$$K_1 = \text{antilog} \{ \ln[(2/0.19)^{1/1.50} / (2/0.37)^{1/1.42}] \} = 3.37 \quad (3.9)$$

Consecuentemente podemos conocer la densidad para el tipo de película D4, calculando el valor para la película D7 y multiplicando el resultado por el factor K_1 .

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

De la experiencia realizada se puede decir que los objetivos previamente trazados han sido cumplidos a cabalidad con la mayor precisión posible, admitiendo posibles errores debido a factores externos, que en todo caso su influencia incide muy poco en la experimentación.

Las radiografías tomadas a la escalera a diferentes niveles de kilovoltaje, una vez que fueron reveladas y posteriormente medido su nivel de densidad (tablas 2.1 a 2.7) se puede observar que, para cada exposición, a medida que aumenta el espesor de la escalera disminuye el nivel de densidad. Posteriormente con los valores obtenidos en las tablas 2.1 a 2.7 se realizan las gráficas de densidad versus exposición (figuras 9 a 36) para cada uno de los espesores en el cual cada curva obtenida debe ser rectificada por el método de los mínimos cuadrados.

En las curvas rectificadas se observa que, a medida que aumenta el nivel de exposición aumenta el nivel de densidad. Debemos añadir que las películas que fueron

sometidas a elevado kilovoltaje, sobre todo a 240 KV, disminuyó considerablemente la calidad radiográfica.

De las curvas rectificadas, por ser líneas rectas, se deduce el siguiente algoritmo:

$$d = a + b.E \quad (4.1)$$

donde a y b son dos coeficientes gobernados por el espesor del material y el voltaje del tubo. Con la ayuda de la ecuación (4.1) se determinó la densidad radiográfica algorítmica (tablas 2.9 a 2.15).

Comparando las densidades radiográficas, obtenidas experimental y algorítmicamente, se obtienen desviaciones que nos indican si la diferencia entre las dos densidades es grande o pequeña (tablas 2.16 a 2.22). Los valores de los coeficientes a y b se muestran en la tabla 2.8.

Debemos señalar que el coeficiente a fue asumido, sin ser afectado el espesor, entre 0.75 y 0.80 en vista de que la mayor parte de las curvas rectificadas tienen aproximadamente esta tendencia además, dentro de este rango, los valores de las densidades algorítmicas no son significativamente afectadas con respecto a los valores de las densidades obtenidas experimentalmente.

El coeficiente b en cambio es notablemente afectado por el espesor del material y el voltaje del tubo.

Posteriormente se realizó la gráfica b versus voltaje del tubo (figuras 37 y 38) donde se puede observar que las curvas obtenidas tienen una tendencia exponencial geométrica, por lo tanto la ecuación algorítmica para curvas geométricas es la siguiente:

$$b = A (KV/1000)^B \quad (4.2)$$

donde A y B son dos coeficientes gobernados por el espesor del material y el voltaje del tubo. Con la ayuda de la ecuación (4.2) se determinaron los valores algorítmicos del coeficiente b para diversos niveles de voltaje (tablas 2.24 a 2.26). Los valores de A y B se muestran en la tabla 2.30.

Debemos señalar que en las curvas exponencial geométrica, a medida que aumenta el voltaje del tubo también aumenta el coeficiente b , lo cual confirma, como ya se dijo previamente, que éste coeficiente es notablemente afectado por el voltaje del tubo.

Una vez que se han realizado los pasos anteriores se encuentran los valores de la exposición radiográfica (E),

esto se lo realiza partiendo de la ecuación (4.1), de donde se despeja el valor de E.

$$E = (d-a)/b \quad (4.3)$$

En esta parte del proyecto el valor de la densidad (d) se asumió con el valor de 2, que se encuentra dentro del rango admitido por el código ASME (Ref. 2), los valores de b ya fueron evaluados en las tablas 2.24 a 2.26 y los valores de a se los asume como 0.75 para voltajes de hasta 200 KV incluido y 0.80 para voltajes mayores de 200 KV, en vista de la tendencia de las curvas rectificadas (figuras 9 a 36). Los resultados de la ecuación (4.3) se lo muestra en las tablas 2.27 a 2.28.

Con los valores de E ya conocidos se realizó la gráfica exposición versus espesor del material (figuras 39 y 40). En estas gráficas se observa que a medida que aumenta el espesor del material también aumenta la exposición radiográfica.

Las curvas de estas gráficas exhiben una tendencia exponencial, por lo tanto la ecuación algoritmica para curvas exponenciales es la siguiente:

$$E = Me^{NT} \quad (4.4)$$

donde T es el espesor radiografiado y M y N son dos coeficientes gobernados por el voltaje del tubo.

La ecuación anterior continúa en vigencia aún para diferentes distancias de fuente - película, que la considerada en esta experiencia, siempre y cuando se multiplique por un factor correctivo, como:

$$E = Me^{NT} (D/70)^2 \quad (4.5)$$

Los valores de M y N se muestran en las tablas 2.29.

Ahora bien, si la densidad es el parámetro que nos interesa, la ecuación (4.1) quedará modificada de la siguiente manera:

$$d = a + b.E(70/D)^2 \quad (4.6)$$

esta ecuación es aplicable sólo para películas structurix D7.

Hasta esta parte del proyecto las películas radiográficas han sido consideradas como un factor constante, por lo tanto, si se quiere extender la aplicabilidad de la exposición matemática se deberá hacer uso de las curvas sensitométricas.

Para encontrar las curvas sensitométricas fue necesario realizar nuevas exposiciones experimentales, con películas stucturix D7 y D4, a diferentes niveles de exposición para cada tipo de película a causa de la menor velocidad de la película D4 en comparación con la D7 (tablas 3.1 y 3.2).

Con las nuevas exposiciones se realizó la gráfica densidad versus logaritmo de exposición relativa (figura 41).

Observando éstas gráficas se nota claramente que las curvas tienen una forma exponencial por lo tanto se obtiene el siguiente algoritmo matemático:

$$d_r = Ce^{\beta D} \quad (4.7)$$

donde β es el logaritmo de exposición relativa y C y D son coeficientes de caracterización de la película.

En estas mismas gráficas se observa también que a medida que aumenta el logaritmo de exposición relativa también aumenta la densidad radiográfica y además, como ya dijo previamente, en éstas gráficas queda demostrado que las películas D4 son de menor velocidad que las películas D7.

A continuación se evalúan nuevamente las densidades, para ambos tipos de películas, pero esta vez utilizando la ecuación (4.7) para posteriormente hacer una comparación

entre las densidades experimental y algoritmica (tabla 3.3), cuyos resultados muestran una semejanza entre sus valores.

Por último con la ayuda de las curvas sensitométricas y de la ecuación (4.7) se determinaron factores de corrección para cuando se esté utilizando equipos y películas radiográficas diferentes a los utilizados en la experiencia.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Con los algoritmos y resultados experimentales obtenidos, se pueden crear programas computacionales de exposición radiográfica que van a permitir una rápida obtención de los diferentes parámetros que involucra la exposición. Además estos programas podrán ser utilizados para entrenamiento de personal.
- 2.- El porcentaje de error de la exposición entre los valores dados por el fabricante de películas y los obtenidos experimentalmente son aceptables. Por ejemplo para una plancha de acero de 5 mm de espesor, 120 KV, DFP = 70 cm con película structurix D7, el fabricante de películas recomienda una exposición de 15 mA.min. Con los valores obtenidos experimentalmente se obtiene una exposición de 15.8 mA.min, con lo cual el porcentaje de error entre los dos valores es del 5.3%.
- 3.- La aplicación de los resultados experimentales son de mucha utilidad para valores de densidad que se

encuentren entre 1.8 y 4 que son valores recomendados por el código ASME.

Entre las recomendaciones podemos citar las siguientes:

- 1.- Como en este trabajo se han desarrollado algoritmos matemáticos y factores de corrección para dos tipos de película (structurix D7 y D4) se recomienda deducir factores adicionales de corrección para otros tipos de películas (structurix D2, D5, Kodak, etc.) para darle mayor versatilidad al programa.
- 2.- En vista de que en el presente trabajo se a usado un solo tipo de material (acero), se recomienda realizar una investigación para determinar si los algoritmos matemáticos deducidos en esta experiencia son válidos para otro tipo de material, usando los factores correctivos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- RUIZ, A. Radiografía, Curso interregional de capacitación en la garantía de calidad, Folleto ESPOL, 1986.
- 2.- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME), Sección V Nondestructive Examination, New York, Edición 1977.
- 3.- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM), E 94 - 68, 1968.
- 4.- BETTINI, V. Regional non destructive testing project for Latin America and the Caribbean, April 1986.
- 5.- SPIEGEL, M. Estadística, Mc Graw-Hill de México, S.A. de C.V., 1987, 220 p.