

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
ESCUELA DE POSGRADO



**DETERMINACION DE LA CONFIGURACION Y LOS PARAMETROS OPTIMOS PARA LA RADIOGRAFIA  
DE ELEMENTOS DE ACERO DELGADOS UTILIZANDO LA TECNICA DE RADIOGRAFIA EN  
MOVIMIENTO**

Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería de Soldadura

**AUTOR**

Ing. Ernesto Saldaña Bobadilla

**ASESOR**

Ms. Ing. Aníbal Freddy Rozas Gallegos

**JURADO**

Ms. Ing. Julio Roberto Martín Jesús Lazarte Gamero

Dr. Paul Pedro Lean Sifuentes

Lima, 2014

## Resumen

---

Una de las técnicas más ampliamente utilizadas dentro del ámbito del control de calidad de componentes y soldaduras es la radiografía industrial, sin embargo una de las desventajas de esta técnica es cuando se tienen que radiografiar grandes tramos de soldadura en la cual es complicado realizar una sola exposición y se ve forzado entonces a realizar múltiples exposiciones lo que requiere mayor demanda de tiempo y mayor exposición del personal a las radiaciones. Por tanto se requiere el estudio, implementación y utilización de nuevas técnicas de inspección que nos permitan disminuir los tiempos de exposición sin afectar la calidad de las radiografías obtenidas y la salud del personal.

La radiografía en movimiento es una técnica especial de la inspección radiográfica en la que ya sea la fuente de radiación, el objeto de prueba o la película se encuentran en movimiento. Mediante el uso de esta técnica se pueden disminuir en gran medida los tiempos de exposición durante las inspecciones. Sin embargo se requiere de un estudio minucioso y sistemático de los conceptos básicos para poder utilizar y así aplicarla durante la inspección de componentes o soldaduras.

El presente trabajo de investigación utiliza la técnica de radiografía en movimiento para lograr radiografiar planchas de acero de espesores variables consiguiendo una radiografía que cumpla con los criterios de calidad establecidos. Previo a ello se realiza un estudio de los parámetros más importantes involucrados con esta técnica de radiografía, en este caso la penumbra geométrica en movimiento, la velocidad relativa entre la fuente y el objeto de prueba, la energía de la fuente y el ancho del haz de radiación incidente. La calibración y el manejo de estos parámetros se realizó de acuerdo a los alcances y requerimientos generales estipulados en el Artículo 2, Apéndice I “In Motion Radiography” del Código ASME sección V Edición 2013.

Después de realizar varias pruebas de laboratorio, en las que se incluyeron la variación de la distancia fuente película, la colimación del haz de radiación y la velocidad relativa entre fuente y objeto de prueba, fue posible radiografiar planchas de acero de hasta 16mm de espesor considerando una densidad de película de 2.0 y una velocidad de 2.45mm/s. La distancia fuente película fue de 450mm y la energía del tubo de rayos X para radiografiar dicho espesor fue de 300 KV.

Al final del presente trabajo de investigación se incluyen las curvas de exposición elaboradas para el equipo de rayos utilizado y para el uso de la técnica de radiografía en movimiento.

## INDICE

<b>CAPITULO I:</b>	<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1.	Antecedentes	1
1.2.	Justificación	2
1.3.	Objetivos	2
<b>CAPITULO II:</b>	<b>FUNDAMENTO TEORICO</b>	<b>4</b>
2.1.	La inspección Radiográfica	4
2.1.1.	Ventajas	4
2.1.2.	Limitaciones	4
2.2.	El Equipo	5
2.2.1.	Tubo de Rayos X	5
2.2.1.1.	Tubo Protector	8
2.2.1.2.	Panel de Control	8
2.2.2.	Curvas de Exposición de Rayos X	9
2.2.3.	Equipo accesorio: Colimadores y Diafragmas	10
2.3.	Principios de la Radiografía de Película	11
2.3.1.	Penumbra Geométrica	11
2.3.2.	Ley de los Cuadrados Inversos	12
2.4.	La Película Radiográfica	14
2.4.1.	Densidad Fotográfica	15
2.4.2.	Contraste de Película	16

2.4.3.	Curvas Sentisométricas	17
2.4.3.1.	Uso de las Curvas Características	18
2.4.4.	Densitómetros	20
2.5.	Técnicas Especiales de Radiación: La Radiografía en Movimiento	20
2.5.1.	Introducción	20
2.5.2.	Ventajas de la Radiografía en Movimiento	21
2.5.3.	Aplicaciones	21
a.	Radiografía Rotativa de Objetos Circulares	21
b.	Radiografía en Movimiento de Objetos Alargados	22
2.5.4.	Penumbra Geométrica en Movimiento	23
a.	Limitaciones de Penumbra en Movimiento	24
2.5.5.	Consideraciones Especiales para la Aplicación de la Radiografía en Movimiento	25
a.	Calibración del Ancho del Haz	25
2.6.	Consideraciones de Seguridad Radiológica	26
<b>CAPITULO III: MATERIAL Y METODO</b>		<b>27</b>
3.1.	Introducción	27
3.2.	Equipo	28
3.2.1.	Equipo de Rayos X y Sistema de Colimación del Haz	28
3.2.1.1.	Sistema de Colimación del Haz	28
3.2.1.2.	Colimadores y Características	29
3.2.2.	Sistema de Traslado del Espécimen a ser Radiografiado	29
3.2.3.	Película Radiográfica y Modulo de Revelado	30
3.2.4.	Instrumentos de Medición	30

3.3.	Método:	Técnicas y Procedimiento	31
3.3.1.	Técnicas		31
3.3.1.1.	Calibración Para la Toma de Placa Radiográfica en movimiento		31
3.3.2.	Procedimiento Experimental para el Estudio de las Placas Radiográficas Obtenidas Mediante la Aplicación de La Radiografía en Movimiento		33
3.3.2.1.	Magnitudes y Parámetros Seteados durante los Ensayos		34
3.3.2.2.	Fórmulas Empleadas		34
a.	Penumbra Geométrica		34
b.	Penumbra en Movimiento		34
c.	Factor de Corrección de Densidad		35
d.	Velocidad del Carrito		35
e.	Velocidad Corregida		35
f.	Ancho del Haz		35
g.	Distancia Fuente Objeto		36
3.3.2.3.	Pruebas Iniciales		36
3.3.2.4.	Pruebas Definitivas		37
3.3.2.5.	Procedimiento de Medición de Densidad de Película		37
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSION</b>			<b>38</b>
4.1.	Resultados		38
4.1.1.	Introducción		38
4.1.2.	Relación de Tablas		38

4.1.3. Relación de Gráficos	54
4.2. Discusión de Resultados	61
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>67</b>
5.1. Conclusiones	67
5.2. Recomendaciones	72
<b>CAPITULO VI: BIBLIOGRAFIA</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>75</b>





## DEDICATORIA

*Dedico el presente trabajo a mi padre José Flavio, por sus incansables consejos en mi formación profesional y humana.*



## AGRADECIMIENTOS

*Gracias a todas las personas que hicieron posible el desarrollo y la elaboración del presente trabajo de tesis, a todas las personas pertenecientes al Laboratorio de Materiales de la PUCP y en especial a mi asesor Ms. Ing. Aníbal Rozas Gallegos por los valiosos aportes y sugerencias durante todo este tiempo.*



## CAPITULO I: Introducción

### 1.1. Antecedentes

El presente proyecto de investigación está planteado dentro del ámbito del uso de las técnicas END como herramientas para inspeccionar la sanidad de componentes y de uniones soldadas, específicamente en la utilización de nuevas técnicas que permitan disminuir el tiempo de exposición y la obtención de radiografías de calidad cumpliendo los estándares y códigos aplicables. Una de las técnicas más utilizadas en la inspección de componentes y uniones soldadas es la técnica de Radiografía.

La mayoría de empresas involucradas con esta técnica utilizan los rayos Gamma por la facilidad de transporte de las fuentes hacia los puntos de inspección y por no requerir fuentes de energía externa (corriente eléctrica), sin embargo la calidad de imagen en las placas obtenidas se ve mermada cuando se radiografían bajos espesores y por la falta de conocimiento al utilizar este tipo de fuentes y energías.

Actualmente en nuestro país la utilización de los rayos X como método de inspección de soldaduras y componentes es escaso, (1) por la falta de conocimiento en el manejo de estos equipos y (2) por que los equipos utilizados son más robustos y pesados, sin embargo hoy en día los fabricantes están desarrollando nuevas tecnologías con equipos de mayor portabilidad por lo que se pueden utilizar en diversas aplicaciones y en diferente condiciones [17].

Una de las desventajas de la inspección radiográfica es que es un método con mayor demanda de tiempo con respecto a las demás técnicas debido a que después de realizar la toma radiográfica, la película debe ser revelada, secada e interpretada[7]. Por ejemplo al realizar la radiografía de soldaduras longitudinales grandes, es necesario radiografiarlas en una serie de exposiciones individuales. Esto por tanto requiere tiempo al colocar y retirar las películas, colocación de penetrámetros y diferentes cambios de posición del equipo para cada exposición individual. La optimización se puede alcanzar logrando radiografiar la longitud entera de la soldadura en una sola exposición ya sea en una tira de película o en una serie de películas superpuestas[8]. Sin embargo la aplicación de esta técnica puede introducir distorsiones en la imagen de la película debido al movimiento relativo. Se requiere entonces, obtener el conocimiento y habilidad para poder aplicarla y conseguir una radiografía que cumpla los requerimientos de calidad establecidos.

Por ello la necesidad de utilizar la técnica de radiografía en movimiento y realizar su estudio para la obtención de una radiografía de calidad es decir que tenga menos distorsión, con alta definición, alto contraste y una densidad adecuada. También es necesario el manejo de la información para obtener un control adecuado de la exposición para su aplicación en diferentes condiciones.

## 1.2. Justificación

En el Perú las inspecciones volumétricas de componentes y uniones soldadas se realizan, según aplique la norma por la técnica de Radiografía o Ultrasonido, en caso de aplicarse radiografía, se utilizan rayos Gamma en vez de rayos X, sin embargo la calidad de imágenes obtenidas es pobre, existe pues en el medio un escaso conocimiento de la técnica, a pesar de ello se la usa en la mayoría de las inspecciones por Radiografía. El presente trabajo de investigación busca utilizar una técnica de radiografía en movimiento utilizando rayos X, que permita disminuir los tiempos de exposición agregando la variable velocidad y relacionarla con el espesor de la plancha. En el caso de la radiografía de soldaduras longitudinales grandes, por ejemplo durante la inspección de tanques se puede utilizar una fuente móvil y disminuir en gran medida los tiempos de inspección lo que se traduce en un ahorro de tiempo y por ende un aumento de la productividad.

## 1.3. Objetivos y metas

### 1.3.1. Objetivo General.

- Realizar la radiografía en movimiento de planchas de acero del máximo espesor posible cumpliendo todos los requerimientos de calidad en cuanto a densidad de película y penumbra en movimiento, de acuerdo a la norma ASME Sección V Edición 2013.

### 1.3.2 Objetivos Específicos.

- Habilitar un equipo y/o mecanismo que permita aplicar la técnica de Radiografía en Movimiento.
- Establecer la geometría y material del colimador para esta prueba.
- Establecer la configuración óptima del equipo y colimador para la obtención de una radiografía de calidad.
- Determinación del espesor máximo a radiografiar teniendo en cuenta nuestras limitaciones en cuanto a la capacidad del equipo de rayos X y las velocidades relativas entre la fuente y el objeto a radiografiar.

- Construir las curvas de exposición para la radiografía en movimiento a diferentes condiciones considerando una densidad de película de 2.0.
- Obtener y establecer criterios que relacionen, a partir de los resultados obtenidos, las principales variables involucradas en nuestro estudio de investigación.



## CAPITULO II: Fundamento Teórico

### 2.1. La Inspección Radiográfica.

La radiografía es usada para examinar una serie de productos, tales como fundiciones, forjados y soldaduras. También es usado en gran medida en la industria aeroespacial para la detección de fisuras en estructuras de fuselajes, y en la detección de objetos extraños. Los objetos de pruebas son expuestos a rayos X o Gamma, y una imagen es procesada en la película o mostrada digitalmente.

#### 2.1.1. Ventajas.

Las ventajas de la prueba radiográfica incluyen las siguientes:

- La radiografía puede ser utilizado en muchos materiales.
- La radiografía puede ser utilizado para proporcionar un registro visual permanente del objeto de prueba en la película o registro digital para mostrarse posteriormente en una computadora o monitor.
- La radiografía puede revelar algunas discontinuidades en un material.
- La radiografía da a conocer errores de fabricación y con frecuencia indica la necesidad de la acción correctiva.

#### 2.1.2. Limitaciones.

Las limitaciones de la radiografía incluyen consideraciones físicas y económicas.

- Se deben seguir siempre procedimientos de seguridad en radiación.
- La accesibilidad puede ser limitada. El radiólogo debe tener acceso a ambas caras del objeto de prueba.
- Las discontinuidades que no son paralelas con el haz de radiación son difíciles de localizar.
- La radiografía es un método de prueba caro.
- La radiografía de película es un método de prueba que demanda mucho tiempo. Después de tomar la radiografía, la película debe ser procesada, secada e interpretada.
- Algunas discontinuidades superficiales pueden ser difíciles, o imposibles de detectar [10].

## 2.2 El Equipo.

Un generador de rayos X convencional consiste de tres principales componentes: (1) Tubo de rayos X, (2) Fuente de alto Voltaje y (3) equipo de Control. Aunque cada una de las partes principales pueden ser en detalle diferentes. Es necesario recordar que todas las unidades convencionales tienen similitud en su construcción.

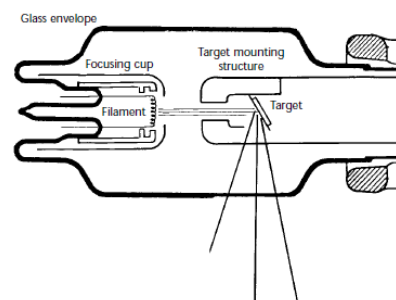
### 2.2.1. Tubo de Rayos X.

Los primeros equipos de rayos X usaron tubos llenados con gas y un cátodo frío desde el cual los electrones fueron libremente bombardeados por un ion positivo. Los tubos modernos usados en radiografía son de la variedad de alto vacío, que permiten la reducción de tamaño y extienden la vida del tubo y operaciones más estables.

Los electrones son suministrados por emisiones termoiónicas desde el filamento. El potencial de aceleración y la corriente del tubo pueden ser variados independientemente, con la excepción de que a bajos voltajes de aceleración, la corriente del tubo es afectada por la carga del espacio que se acumula alrededor del cátodo.

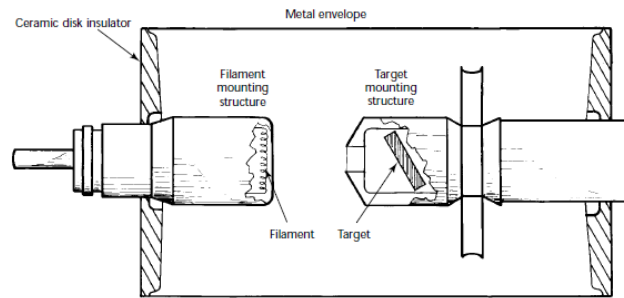
#### a. Cubierta.

La cubierta para los tubos de rayos X son usualmente hechos de vidrio o una combinación de cerámico y metal (Ver **Figs. No. 2.1. y 2.2.**). Las cubiertas de tubo hechas de vidrio son más susceptibles a los choques térmicos y mecánicos que las cubiertas hechas de materiales metal-cerámicos y han sido reemplazadas en muchas aplicaciones industriales con los tubos más duraderos de metal-cerámicos.



**Fig. No.2.1.:** Tubo de rayos X de vidrio

*Fuente:* HANDBOOK Radiographic Testing p.59 Fig.3



**Fig. No.2.2.:** Tubo de rayos X de metal cerámico.

*Fuente:* HANDBOOK Radiographic Testing p.59 Fig.4

### b. Cátodo.

El cátodo incluye el filamento de tungsteno a través del cual se emiten los electrones acelerados. El filamento es usualmente energizado con corriente alterna (50 hasta 60 Hz) desde un transformador controlado separadamente, aunque en algunas unidades la corriente en el filamento es fijado o automáticamente controlado para mantener una corriente del tubo constante. Normalmente, el rango de corriente en el filamento es de 1 hasta 10A. La corriente del tubo, que pasa entre el cátodo y el ánodo por medio de electrones a alta velocidad está por debajo de los  $300\mu\text{A}$  para unidades pequeñas hasta 20mA para unidades radiografía industrial convencionales.

### c. Filamento de Calentamiento.

Debido a las características eléctricas del tungsteno, un pequeño flujo de corriente a través del filamento basta para calentarlo hasta temperaturas que causan la emisión de electrones. Cualquier cambio en el amperaje aplicado al filamento varía la corriente en el filamento y el número de electrones emitidos. Un cambio en el número de electrones emitidos varía con el flujo de electrones (corriente) a través del tubo. En la mayoría de equipos de rayos X, el control de la corriente del tubo se obtiene regulando el amperaje aplicado a través del filamento. Cuando la corriente del tubo, medida en miliamperios (mA) se incrementa, la intensidad de los rayos X también incrementa pero la longitud de onda sigue siendo la misma.



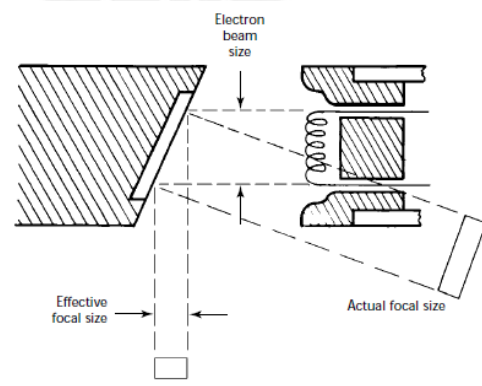
#### d. Ánodo.

El ánodo de un tubo de rayos X es un electrodo metálico de alta conductividad eléctrica y térmica. Usualmente está hecha de cobre con una porción de tungsteno, oro o plata que va directamente al cátodo. Son estos últimos materiales los que funcionan como blanco.

El cobre y el tungsteno son los materiales más comunes para ánodos, debido a que el cobre tiene las características eléctricas y térmicas necesarias, y el tungsteno es un material económicamente factible con un punto de fusión alto. Se requiere como blanco un material denso para asegurar un número máximo de colisiones cuando el haz de electrones choque con el blanco. Es necesario un material con alto punto de fusión para soportar la generación el calor debido a la generación de rayos X.

#### e. Punto Focal.

La distorsión de una imagen radiográfica se determina parcialmente por el tamaño de la fuente de radiación (punto focal). El haz de electrones en la mayoría de tubos de rayos X está enfocado de manera que un área rectangular del blanco es bombardeado por el haz, llamado “*target*”, por lo general el blanco o ánodo se establece en un ángulo (Ver **Fig. No.2.3.**), y el tamaño proyectado del área bombardeada así como se ve desde el objeto de prueba, aparece más pequeño que el punto focal actual. Esta área proyectada del haz de electrones es el punto focal efectivo.



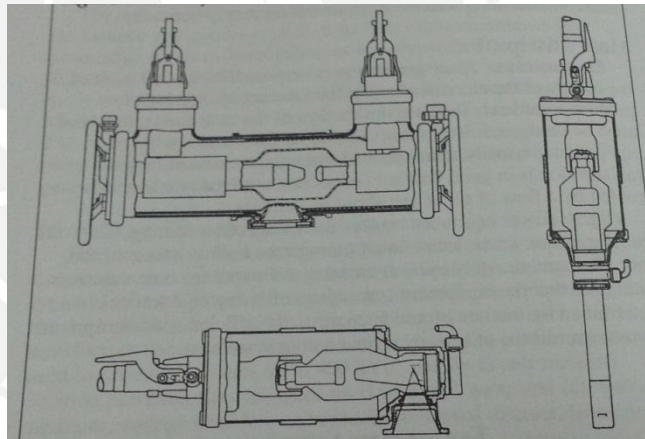
**Fig. No.2.3.:** Diagrama de la configuración del punto focal

*Fuente:* HANDBOOK Radiographic Testing p.60 Fig.6

En teoría, el tubo óptimo debería contener un punto focal mínimo. En la práctica el tamaño al cual el punto focal puede ser reducido es limitado por el calor generado en el blanco de bombardeo. Si el punto focal es reducido mas allá de ciertos límites, el calor en el punto de impacto destruye el blanco [10].

### 2.2.1.1 Tubo Protector

Los tubos protectores, mostrados en la **Fig. No.2.4.**, usados como equipos de rayos X portátiles, consisten de una carcasa metálica exterior con una puerta para los rayos X y usualmente contiene el tubo de rayos X, transformadores de alto voltaje y filamento, aceite o gas de aislamiento y una protección de plomo. Los tubos protectores utilizados con equipos de rayos X instalados permanentemente contienen todos los elementos antes mencionados, excepto los transformadores, que están alojados en una unidad separada.



**Fig.No.2.4.:** Tubos protectores de rayos X

*Fuente:* CLASSROOM TRAINING BOOK Radiographic Testing p.36 Fig.3.6

### 2.2.1.2 Panel de control.

El panel de control de un equipo de rayos X está diseñado para permitir al técnico controlar la generación de rayos X para que las exposiciones puedan ser hechas en forma simple y rápida. El panel también provee circuitos eléctricos de protección que previenen de daño al equipo.





**Foto No.2.1.:** Unidad de control de un equipo de rayos X

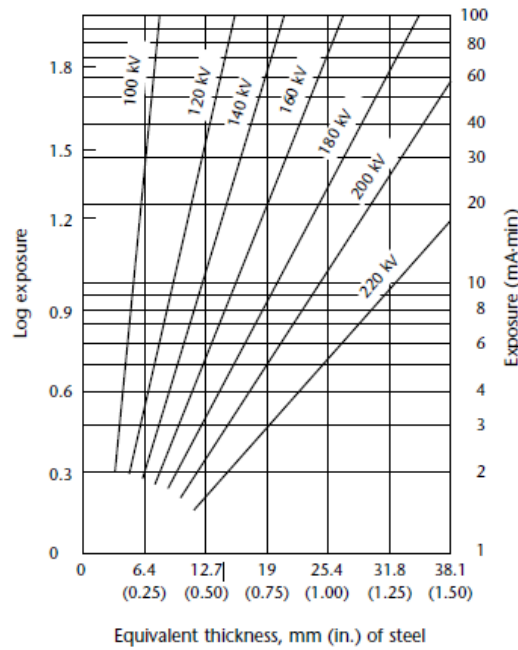
Los controles característicos de una unidad de control de rayos X son los siguientes:

- Selector de voltaje de alimentación que puede ajustarse a 110v, 220v, etc.
- Interruptor de encendido y apagado, proporciona la energía eléctrica al equipo.
- Selector de alto voltaje y voltímetro calibrado en kilovolts. Permite ajustar la tensión aplicada entre cátodo y ánodo.
- Selector de amperaje y amperímetro calibrado en miliamperes. Permite ajustar la corriente del filamento.
- Cronometro. Permite seleccionar el tiempo de exposición.
- Encendido del generador. Inicia la generación de rayos X.
- Apagado del generador. Finaliza la generación de rayos X.
- Foco-piloto (color rojo). Indica cuando el equipo está generando rayos X.

### 2.2.2. Curvas de Exposición de Rayos X.

Los cuadros de exposición de rayos X, tal como el mostrado en la **Fig.No.2.5.**, ilustran la relación entre el espesor del material, kilovoltaje y exposición. Cada cuadro aplica solo para un grupo específico de condiciones: un tipo de equipo de rayos X, un tipo de distancia fuente película; para cada fabricación y tipo de película; para cada condición de procesamiento; y para cada densidad en la cual el cuadro es basada [2].

FIGURE 30. Typical X-ray exposure chart for steel may be applied to film X (see Fig. 33), with lead foil screens, at 1.5 film density and 1.0 m (40 in.) source-to-film distance.



**Fig.No.2.5.:** Cuadro de exposición de rayos X típico para acero.

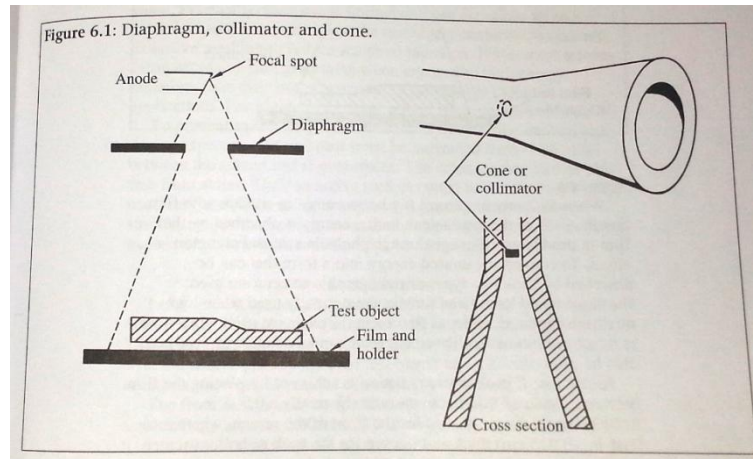
Fuente: HANDBOOK Radiographic Testing p.165 Fig.30

Los cuadros de exposiciones son útiles para determinar las exposiciones de los objetos de prueba de espesores uniformes, pero deberían ser usados solo como una guía cuando se radiografía un objeto de prueba con amplias variaciones de espesores. Los cuadros proporcionados por los fabricantes son exactos solo en  $\pm 10\%$ , debido a que dos equipos de rayos X no son idénticos. Para una radiografía de calidad, los cuadros de exposición de los rayos X basados en los materiales más frecuentemente radiografiados, en la película más comúnmente usada, y con una distancia fuente-película elegida arbitrariamente, son preparados para cada equipo de rayos X en uso.

### 2.2.3. Equipo accesorio: Colimadores y Diafragmas

Los diafragmas, colimadores y conos son barreras de plomo u otros materiales densos, como tungsteno ensamblado en los tubos de los equipos de rayos X o construidos para contener la fuente de los rayos Gamma. Ellos son diseñados para limitar el área de radiación, como se muestra en la **Fig. No.2.6**. Ellos disminuyen la cantidad de radiación dispersa limitando el haz hacia el área de objeto de prueba deseado. Muchas maquinas de rayos X se han construido con diafragmas

ajustables diseñados para que los haces cubran una área de tamaño de película estándar a distancias fijas.



**Fig. No.2.6.:** Diafragmas, colimadores y conos

*Fuente:* CLASSROOM TRAINING BOOK Radiographic Testing p.83 Fig.6.1

### 2.3. Principios de la Radiografía de Película.

Una radiografía es un registro fotográfico (sombra o negativo) de un objeto que ha sido situado en la trayectoria de un rayo X o de rayos Gamma, entre el ánodo del tubo y la película o entre la fuente de radiación Gamma y la película. Naturalmente se deduce por lo tanto que la apariencia de una imagen ya registrada es influenciada por las posiciones relativas del objeto-película, y por la dirección del haz. Por estas razones, el conocimiento de los principios elementales de la formación de las sombras es importante para aquellos que hacen e interpretan las radiografías [10].

#### 2.3.1. Penumbra Geométrica.

El ancho del límite borroso, no claro de la imagen registrada en la película es conocida como *penumbra geométrica*. Se puede afirmar que esta es, por lo general, una consecuencia de los factores geométricos y es directamente proporcional al tamaño del punto focal, al espesor del objeto que se radiografía y a la distancia del objeto a la película e inversamente proporcional a la distancia entre la fuente y el objeto. Esta relación se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$U_g = F \frac{d}{D_o}$$

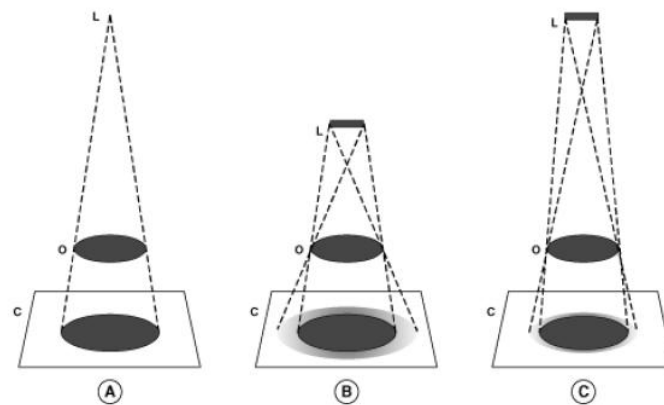
En donde:

$F$  =Tamaño de la fuente de radiación, punto focal.

$d$  = Distancia objeto-película

$D_o$ =Distancia fuente-objeto

La penumbra geométrica mínima se obtiene cuando la fuente de la radiación es pequeña, la distancia de la fuente al objeto es relativamente grande y la separación entre el objeto y la película es reducida, como se muestra en la **Fig. No. 2.7. Gráfica A**



**Fig. No.2.7.:** Efecto del cambio de la dimensión de fuente y del cambio entre las posiciones relativas entre la fuente y película en el tamaño de la penumbra geométrica.

*Fuente:* KODAK Radiography in Modern Industry p.21 Fig.11

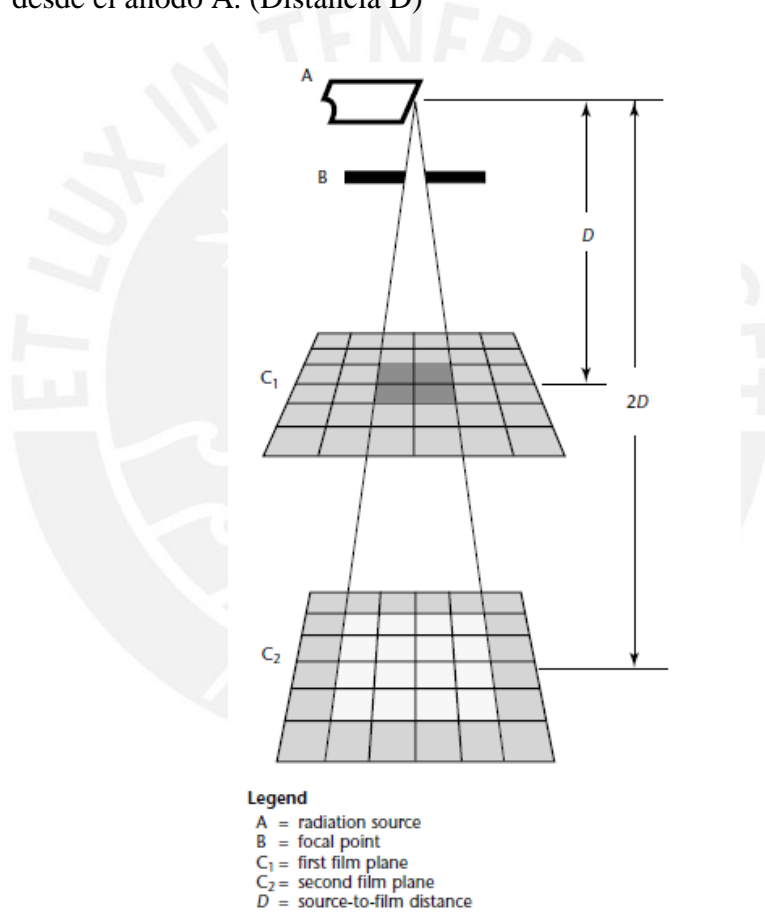
Experimentalmente, se ha determinado que distorsiones iguales o mayores a 0.5mm (0.020pulg) de penumbra son percibidas por el ojo humano como una línea fina, por lo que es la penumbra máxima permisible para algunos documentos y que varía según el espesor radiografiado [10].

### 2.3.2. Ley de los Cuadrados Inversos.

Cuando la salida del tubo de rayos X se mantiene constante o cuando se usa una fuente radioactiva en particular, la intensidad de radiación que alcanza el espécimen de prueba (objeto) es gobernada por la distancia entre el punto focal y el espécimen, variando inversamente con el

cuadrado de la distancia. La explicación que sigue es en términos de los rayos X y la luz pero puede aplicarse también a los rayos Gamma.

Debido a que los rayos X obedecen las leyes de la radiación electromagnética, ellos divergen cuando son emitidos desde el ánodo y cubren un área cada vez más grande con una intensidad disminuida a medida que viajan desde la fuente. Este principio se ilustra en la **Fig. No.2.8.**, en el cual se asume que la intensidad de los rayos X emitida en el ánodo A permanece constante y que los rayos X que pasan a través de la abertura B cubren un área de  $25.8 \text{ cm}^2$  ( $4\text{in}^2$ ) cuando alcanzan la superficie de registro  $C_1$ , la cual esta a una distancia de 305mm (12in) desde el ánodo A. (Distancia D)



**Fig.No.2.8.:** Diagrama esquemático que ilustra la ley del cuadrado inverso

*Fuente:* HANDBOOK Radiographic Testing p.147 Fig.10

Cuando la superficie de registro se mueve 305mm (12in) mas lejos del ánodo, hacia  $C_2$ , para que la distancia ( $2D$ ) desde el ánodo sea 610mm (24in) o el doble de su primer valor, los rayos X cubrirán  $103.4 \text{ cm}^2$  ( $16\text{in}^2$ )-un área 4 veces más grande que la registrada en  $C_1$ . De ello se deduce, por lo tanto, que la radiación por centímetro cuadrado en la



superficie  $C_2$ , es solo un cuarto de la alcanzada en el nivel  $C_1$ . La exposición que sería adecuada en  $C_1$  debe ser aumentada cuatro veces para producir en  $C_2$  una radiografía de igual densidad. En la práctica esto se consigue incrementando el tiempo o incrementado el miliamperaje.

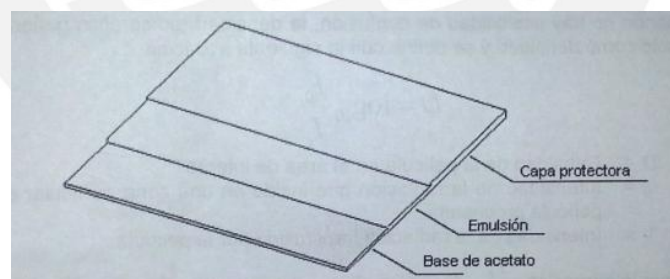
La ley del inverso cuadrado puede ser expresado algebraicamente como sigue:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{D_2^2}{D_1^2}$$

Donde  $I_1$ , y  $I_2$  son las intensidades de radiación a las distancias  $D_1$  y  $D_2$  respectivamente.

#### 2.4. La Película Radiográfica.

La película radiográfica consiste de una hoja de plástico transparente delgado, o una base, cubierta en uno o ambos lados con una emulsión gelatinosa, cerca de 0.001 pulg. (0.003cm) de espesor, la cual contiene granos muy finos de bromuro de plata (AgBr). La emulsión gelatinosa coloreada suavemente es casi transparente a los rayos X, y es principalmente el bromuro de plata que absorberá los rayos X o los rayos Gamma.



**Fig.No.2.9.:** Estructura de la película radiográfica  
Fuente: PUCP Radiografía Industrial Daniel Merino p.91 Fig.5.1

Cuando se exponen los rayos X, rayos Gamma o luz visible, los bromuros de plata experimentan una reacción que acelera al proceso químico y que los convierte en plata metálica negra. Colocando la emulsión en ambos lados de la base duplica la cantidad de radiación que sensibiliza al compuesto de plata, y aumenta la velocidad. Las capas de emulsión son lo suficientemente delgadas para que el revelado, fijación y secado puedan ser completados en un tiempo razonable.

La exposición a la radiación crea una imagen latente (oculta) en la película, y el proceso químico hace la imagen visible. Debido a la fuente de radiación, el objeto de prueba y las condiciones de la exposición determinan la cantidad de radiación que alcanza la película en cualquier punto dado, el radiólogo está involucrado con aquellas características de la película que fijan la densidad y nitidez de la imagen de la película procesada en la radiografía finalizada.

Cuando los rayos X o los rayos Gamma inciden sobre los bromuros de plata, se produce un cambio en la estructura física de los granos. Este cambio es de tal naturaleza que no puede ser detectado por métodos físicos ordinarios.

Cuando la película expuesta es tratada con una solución química (el revelador), se produce una reacción causando la formación de plata metálica negra. Es esta plata suspendida en ambos lados de la gelatina de la base, la que constituye la imagen. Debido a que las propiedades de los rayos X y los rayos Gamma son diferentes a la de la luz y otras formas de radiación, la emulsión debe ser diferente de aquellas usadas en otros tipos de fotografía [10].

#### 2.4.1. Densidad Fotográfica.

La densidad fotográfica se refiere a la medición cuantitativa del ennegrecimiento de la película, que es también llamado *densidad óptica* y *densidad sentisométrica*. Cuando no existe peligro de confusión, a la densidad fotográfica se la conoce simplemente como *densidad*.

La densidad se define por la siguiente ecuación:

$$D = \log \frac{I_o}{I_t}$$

En donde  $D$ =densidad;  $I_o$ =la intensidad de la luz incidente sobre la película; y  $I_t$ =intensidad de la luz transmitida.

En la **Tabla No.2.1.**, se muestran algunas relaciones entre la transmitancia, porcentaje de transmitancia, opacidad y densidad. En la tabla se muestra que un incremento en la densidad de 0.3 reduce la luz transmitida a la mitad de su valor anterior. En general, debido a que la densidad es un logaritmo, un cierto incremento en la densidad siempre corresponde al mismo porcentaje de disminución en la transmitancia [2].

**Tabla No.2.1.: Relaciones de transmitancia, porcentaje de transmitancia, opacidad y densidad**

Transmittance $I_t \cdot I_o^{-1}$	Percent Transmittance $I_t \cdot I_o^{-1} \times 100$	Opacity $I_o \cdot I_t^{-1}$	Density $\log I_o \cdot I_t^{-1}$
1.00	100	1	0
0.50	50	2	0.3
0.25	25	4	0.6
0.10	10	10	1.0
0.01	1	100	2.0
0.001	0.1	1000	3.0
0.0001	0.01	10 000	4.0

*Fuente:* HANDBOOK Radiographic Testing p.164 Tabla 4

#### 2.4.2. Contraste de Película.

El contraste de película es la habilidad de la película para detectar y registrar diferentes exposiciones de radiación así como las diferencias en la densidad. La película radiográfica es fabricada con una variedad de emulsiones que brindan diferentes contrastes de película y otras propiedades, tales como la velocidad y la granularidad. Los valores de contraste en cualquier película en particular son usualmente expresados como una relación entre la exposición de la película y el resultado de la densidad de la película. La relación se expresa en las curvas características de la película [10].

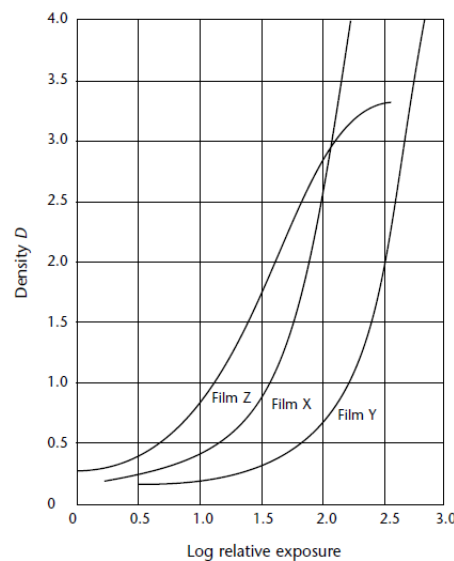
El contraste de la película está determinado por los siguientes factores:

1. Tamaño de grano y tipo de película.
2. Composición química de los productos químicos de procesamiento de película.
3. Concentraciones de los productos químicos de procesamiento de película.
4. Tiempo de revelado.
5. Temperatura de revelado.
6. Tipo de agitación.



### 2.4.3. Curvas Sentisométricas.

Las curvas características, algunas veces referidas como *Curvas Sentisométricas* o curvas H y D (por Hurter y Driffield, quienes las usaron por primera vez en 1890), expresan la relación entre la exposición aplicada al material fotográfico y el resultado de la densidad de película radiográfica. En la **Fig. No.2.10.**, se muestran las curvas características de 3 películas típicas, expuestas entre pantallas de láminas de plomo a los rayos X. Dichas curvas se obtienen dando a la película una serie de exposiciones conocidas, determinando las densidades producidas por estas exposiciones y luego graficando la densidad y el logaritmo de la exposición relativa [2].



**Fig. No.2.10.:** Curvas características de 3 películas de rayos X típicas, expuestas entre pantallas de plomo.

*Fuente:* HANDBOOK Radiographic Testing p.167 Fig.33

La exposición está definida como el producto de la intensidad de la radiación que alcanza el objeto, y el tiempo en el que el objeto está expuesto a esa radiación.

Las curvas características son gráficas que muestran como la cantidad de radiación expuesta en el material fotográfico se relaciona con la densidad óptica de la imagen. Una curva diferente se obtiene para la misma película, usando diferentes reveladores y tiempos de revelado.

Una película no expuesta, pero revelada tiene una baja densidad, conocida con *base niebla*, (la niebla será mayor si la película es revelada por un tiempo mayor).

Los niveles de salida de los equipos de rayos X son directamente proporcionales a la corriente del tubo y al tiempo; además, es también directamente proporcional a su producto. Matemáticamente,  $E=Mt$ , donde  $E$  es la Exposición,  $M$  es la corriente del tubo en miliamperios (mA) y  $t$  es el Tiempo de Exposición. Es esta relación que permite que la exposición de rayos X, a un kilovoltaje dado, sea especificada en términos de mili ampere-minutos o mili ampere segundos sin fijar valores específicos de la corriente del tubo o tiempo.

En forma similar las exposiciones de rayos Gamma, es especificado como  $E=Mt$ , donde  $E$  es la Exposición,  $M$  es la Actividad de la Fuente y  $t$  es el Tiempo de Exposición. Además la exposición de los rayos Gamma puede ser expresada en curie-minutos, milicurie-minutos o milicurie-segundos, sin fijar valores específicos de la actividad de la fuente o tiempo [10].

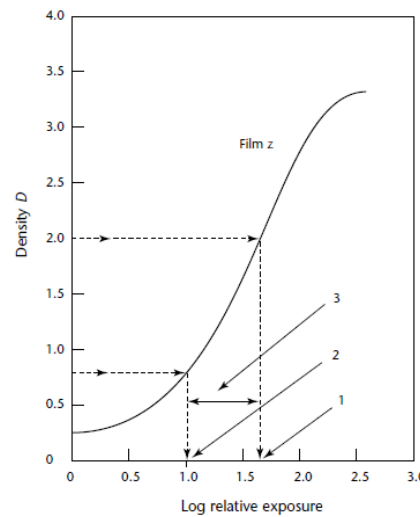
La exposición relativa es utilizada debido a que no existen unidades convenientes, adecuadas a todos los kilovoltajes y condiciones de dispersión, en la cual expresar las exposiciones radiográficas. Las exposiciones dadas a una película son expresadas en términos de alguna exposición en particular, que se dan en una escala relativa. En la práctica de radiografía, esta falta de unidades para la intensidad de los rayos X o cantidad no representa algún impedimento, como se verá más adelante. El logaritmo de la exposición relativa, más que la exposición relativa en sí, tiene un gran número de ventajas. Esta se constituye de otra escala diferente. Además, en la radiografía, las relaciones de exposición o intensidades son usualmente más significativas que las exposiciones de las intensidades mismas. Los pares de exposiciones que tienen la misma relación serán separadas por el mismo intervalo en una escala del logaritmo de la exposición relativa, sin importar los valores absolutos que puedan tener.

#### 2.4.3.1 Uso de las Curvas Características.

Las curvas características pueden ser usadas para resolver problemas cuantitativos que se originan en la radiografía, en la preparación de cuadros técnicos y en la investigación radiográfica. Las curvas características hechas bajo las

condiciones radiográficas actuales deberían ser usadas para resolver problemas prácticos. Sin embargo no siempre es posible producir curvas características en un departamento de radiografía y por tanto deben usarse curvas características ya establecidas en otro lugar. Tales curvas son adecuadas para muchos propósitos aunque debe recordarse que la forma de la curva característica y la velocidad relativa de la película con respecto a la de otra depende fuertemente en las condiciones de revelado. La exactitud que se logra cuando se usan las curvas características preparadas está gobernada en gran medida por la similitud entre las condiciones de revelado usadas en producir las curvas características y de las películas cuyas densidades van a ser evaluadas.

El uso cuantitativo de las curvas características esta mostrado en la **Fig. No.2.11.**, note que **D**, es usado para la densidad y **log E**, para el logaritmo de la exposición relativa.



## Legend

1. Log  $E = 1.62$  at  $D = 2.0$ .
2. Log  $E = 1.00$  at  $D = 0.8$ .
3. Difference in log  $E$  is 0.62.

**Fig. No.2.11.:** Curva característica de la Película Z

*Fuente:* HANDBOOK Radiographic Testing p.168 Fig.34

En este ejemplo (**Fig. No.2.11.**), se supone una radiografía hecha de la película Z, con una exposición de 12mA·min que tiene una densidad de 0.8 en la región de máximo interés. Se desea por tanto incrementar la densidad a 2.0.

1.  $\log E$  a  $D=2.0$  es 1.62
2.  $\log E$  a  $D=0.8$  es 1.00
3. La diferencia en  $\log E$  es 0.62. El antilogaritmo de esta diferencia es 4.2

Por tanto, la exposición original se multiplica por 4.2, dando un valor de  $50\text{mA}\cdot\text{min}$  para producir una densidad de 2.0 [2].

#### 2.4.4. Densitómetros.

El densitómetro es un instrumento óptico para medir las densidades fotográficas. La densidad de película de un rango requerido es usualmente especificada en los procedimientos radiográficos. Los densitómetros deben estar disponibles para observar que las especificaciones sean cumplidas. El densitómetro es esencial para crear las curvas características de la película.

Existen diferentes tipos de densitómetros, ya sean visuales o fotoeléctricos, ambos están disponibles comercialmente. Para propósitos prácticos de la radiografía industrial, no existe una gran importancia en la alta precisión de un densitómetro. Una propiedad mucho más importante es la fiabilidad, que el densitómetro debe reproducir lecturas del día a día.

### 2.5. Técnicas Especiales de Radiación: La Radiografía en Movimiento

#### 2.5.1. Introducción

La radiografía en movimiento es una técnica de radiografía donde el objeto que es radiografiado y/o la fuente de radiación esta en movimiento durante la exposición [1]. La radiografía en movimiento es simple y está basada en los procedimientos estándar de radiografía con algunas leves modificaciones en la configuración durante la exposición. Casi cualquier sistema radiográfico podría ser adaptado para usarse como radiografía en movimiento si el tubo de rayos X es capaz de moverse en el sentido de escaneo deseado.

Muchas técnicas especiales de radiografía en movimiento se encuentran en uso, cada una de ellas diseñadas para servir a un propósito y aplicación específica. Estas técnicas usan arreglos mecánicos para mover la máquina de rayos X, el objeto de prueba o, en muchos casos cámaras fotográficas de movimiento cargadas con películas radiográficas [10].

El único requerimiento para la radiografía en movimiento es que durante la exposición, la posición de la película y el objeto de prueba relativo entre ambas deben permanecer fijos. Este requerimiento se cumple sincronizando el movimiento del objeto de prueba y la película o fijando el objeto de prueba y la película en posición y moviendo solo la fuente de radiación [10].

### 2.5.2. Ventajas de la Radiografía en Movimiento.

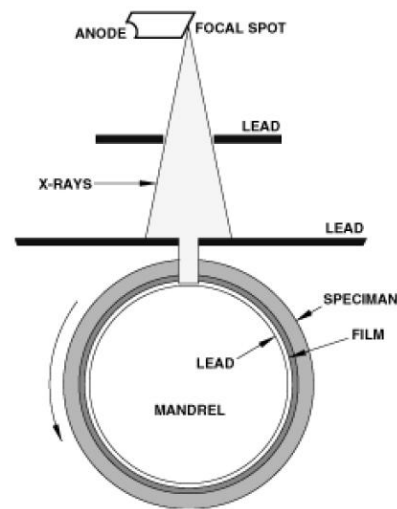
La principal ventaja de la radiografía en movimiento es que se necesita menos tiempo para el ajuste y operación. La inspección de largas soldaduras por los métodos convencionales, requieren la reposición frecuente del objeto de prueba con respecto a la fuente y película; en consecuencia, existe una cantidad de tiempo considerable ocupado en el ajuste de los equipos para las exposiciones sucesivas. Con la radiografía en movimiento se requiere una proporción mucho más pequeña del tiempo de inspección total para el ajuste y calibración. Por tanto la radiografía en movimiento se cumple raras veces con una fuente radioactiva [7].

### 2.5.3. Aplicaciones

#### a. Radiografía Rotativa de Objetos Circulares.

En esta técnica, que podríamos llamar *pseudopanoramica*, el objeto (por ejemplo, una unión soldada circular en un tubo de gran diámetro) se monta sobre unos rodillos, que le imprimen un lento movimiento de rotación (Ver **Fig. No.2.12.**).

La película se enrolla en un mandril cilíndrico y circular, cubierta con una hoja de plomo, y se cubre con un revestimiento hermético a la luz, que sea también suficientemente robusto para proteger la película contra abrasión [4].



**Fig. No.2.12.:** Plano de configuración para radiografía en movimiento de especímenes anulares

*Fuente:* KODAK Radiography in Modern Industry p.144 Fig.86

Por el exterior se coloca una ranura colimadora y, a cierta distancia, la fuente. La velocidad periférica del mandril  $V_p$ , puede ser calculado a partir del tiempo de exposición  $T$ ,

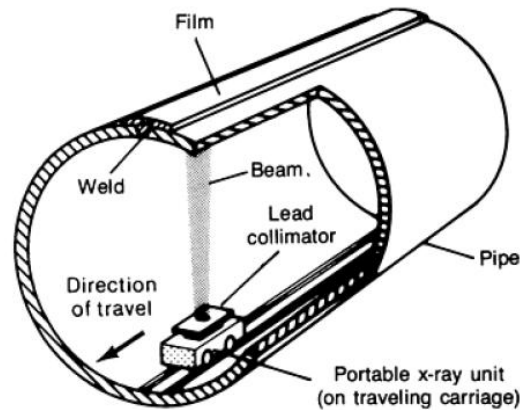
$$V_p = \frac{w}{T}$$

Donde  $w$ , es el ancho del haz de radiación. La pantalla de plomo debe ser relativamente gruesa. Cualquier radiación transmitida por la pantalla tendrá el mismo efecto sobre la calidad radiográfica que una radiación difusa adicional de igual magnitud [4].

#### b. Radiografía de Objetos Alargados.

La radiografía en movimiento es útil cuando se inspeccionan grandes áreas, por ejemplo se puede aplicar para inspeccionar soldaduras longitudinales en tuberías muy largas. El método consiste en que una unidad de rayos X portátil está montada a un carrito móvil en el interior del tubo y se coloca de modo que un haz de rayos X colimado incide sobre la soldadura, como se muestra en la **Fig. No.2.13**. El carrito se mueve lentamente a lo largo de la tubería, sucesivamente exponiendo sobre una serie de películas colocadas a lo largo de la superficie exterior sobre la soldadura. El valor adecuado de la velocidad es igual al ancho del haz, medido en la dirección del movimiento relativo, dividido por el tiempo de exposición requerido.





**Fig. No.2.13.:** Arreglo para la radiografía en movimiento de pared simple y simple imagen de soldadura longitudinal en una línea de tubería.

*Fuente:* ASM Handbook, Nondestructive Evaluation and Quality Control Fig.53 (a)

Técnicas similares a las descritas anteriormente, para radiografiar soldaduras longitudinales en tubos de gran diámetro, pueden ser también adaptadas para otras formas de productos cuando la inspección radiográfica es aplicada a grandes objetos de prueba. También, puede ser deseable para adaptar la radiografía en movimiento en la inspección de piezas relativamente pequeñas, especialmente cuando el haz divergente usado en radiografía normal causaría una distorsión inaceptable en los bordes de la radiografía [2].

#### 2.5.4. Penumbra Geométrica en Movimiento.

Las técnicas de película usadas para radiografía en movimiento causan un tipo específico de penumbra llamada *penumbra en movimiento*. Cualquier cantidad de movimiento relativo de la fuente o del objeto de prueba con respecto al plano de conversión de la imagen resulta en distorsión de la imagen; mientras mayor es la cantidad de movimiento, la distorsión también es mayor. En la radiografía convencional, se considera una buena práctica la eliminación de fuentes de movimiento, vibraciones de tal manera que la penumbra debido al movimiento no afecte la calidad radiográfica de la película [7].

La cantidad de penumbra causada por el movimiento relativo de la fuente con respecto al objeto de prueba y la película en la radiografía en movimiento puede ser evaluada a partir de las características de la configuración, de la misma forma que la penumbra geométrica es evaluada en las técnicas convencionales. La penumbra en movimiento  $U_M$ , se describe de la siguiente forma:

$$U_M = \frac{wt}{L_o}$$

Donde  $w$  es el ancho del haz de radiación en la dirección de movimiento,  $t$  es el espesor del objeto de prueba, y  $L_o$  es la distancia desde la fuente hasta el objeto.

La penumbra en movimiento generalmente es mayor para la radiografía en movimiento que para la penumbra geométrica considerando una técnica convencional equivalente. Esto limita el uso de las técnicas en movimiento para objetos de prueba con espesores delgados o a situaciones en las cuales se puedan utilizar grandes distancias entre la Fuente-Película. Es esencial que no haya movimiento relativo entre el objeto de prueba y la película, de tal manera que solo el movimiento de la fuente contribuya a la penumbra en movimiento [7].

**a. Limitaciones de Penumbra en Movimiento.** Según el código ASME Sección V, en su edición 2013, Artículo 2, Apéndice I “In motion Radiography”, recomienda valores máximos para la penumbra geométrica y para la penumbra en movimiento, a continuación los valores:

Material Thickness, in. (mm)	$U_g$ Maximum, in. (mm)
Under 2 (50)	0.020 (0.51)
2 through 3 (50–75)	0.030 (0.76)
Over 3 through 4 (75–100)	0.040 (1.02)
Greater than 4 (100)	0.070 (1.78)

NOTE: Material thickness is the thickness on which the IQI is based.

Fuente: Código ASME Sección V Edición 2013, Artículo 2, p.10



### 2.5.5. Consideraciones Especiales para la Aplicación de la Radiografía en Movimiento.

El código ASME Sección V, en su Artículo II Apéndices Mandatorios describe los requerimientos generales de calibración y procedimientos operativos para la inspección con radiografía en movimiento. La variable más importante a tener en cuenta en este tipo de inspección es el ancho del haz:

#### a. Calibración del Ancho del Haz.

El ancho del haz se controla mediante un diafragma metálico, por ejemplo plomo. Dicho diafragma, de acuerdo a la energía seleccionada, será de al menos 10 veces el valor de la capa media [1]. El ancho del haz que se detalla en la **Fig. No.2.14.**, se determina de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$w = \frac{c(F + a)}{b} + a$$

Donde,

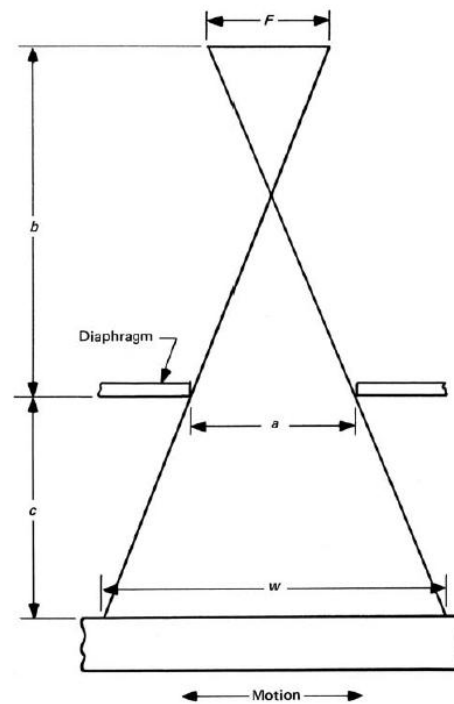
$w$  = ancho del haz en el lado fuente de la soldadura medido en la dirección de movimiento.

$a$  = ancho de la abertura del diafragma en la dirección del movimiento

$b$  = distancia desde la fuente hacia el lado soldadura del diafragma.

$c$  = distancia desde el lado soldadura del diafragma hacia el lado fuente de la superficie de la soldadura

$F$  = Tamaño de la fuente: la máxima dimensión proyectada de la fuente de radiación (o punto focal) en el plano perpendicular a la distancia  $b+c$  desde la soldadura que está siendo radiografiada.



**Fig. No.2.14.:** Calibración del ancho del haz.

*Fuente:* Código ASME Sección V Edición 2013, Artículo 2, p.17 Fig. I-263

## 2.5. Consideraciones de Seguridad Radiológica.

El proceso de prueba radiográfica requiere la utilización de fuentes de rayos X ó fuentes de rayos Gamma, que generan grandes cantidades de radiación. La radiación puede causar daños a las células del tejido vivo, por lo tanto es esencial que el personal este protegido en forma adecuada y este consciente del trabajo que realiza. Las pruebas radiográficas y todo el personal que esté involucrado a ellas deben estar en constante capacitación de los peligros de la radiación y estar al tanto de las regulaciones de seguridad aplicables. [10]

Los medidores de radiación están diseñados para detectar los rayos X y la radiación Gamma. Los medidores de radiación conocidos como *survey meters* son instrumentos importantes debido a que la radiación no puede ser detectada por la vista, sonido, tacto, olor o gusto. Las observaciones estrictas del estado, y regulaciones del gobierno son mandatorios. Muchas jurisdicciones requieren certificaciones en temas de seguridad en radiación para asegurar que los técnicos sean conscientes de las regulaciones de seguridad. [10]

## CAPITULO III: Material y Método

### 3.1. Introducción.

El presente capítulo refiere al Modelo Técnico que sirve como objeto de estudio y al método, técnicas y procedimientos de obtención de los datos experimentales, los cuales nos servirán de base para formular juicios de valor que fundamenten científicamente el estudio de investigación.

El Modelo Técnico del presente estudio de investigación refiere al equipo de rayos X marca Philips Modelo G301, operando a kilo voltajes de 150kv, 200kv, 250kv y 300kv a una corriente de 5mA.

Para la obtención de los datos experimentales fue necesario adaptar un carrito móvil de velocidad variable con un sistema para trasladar el objeto a ser radiografiado, es este caso un patrón de acero, de diferentes espesores **Ver Foto No.3.1.** Adicional a ello hemos requerido la fabricación de un sistema de colimación que nos permita variar el valor del parámetro “b” (distancia desde la fuente hacia el lado soldadura del diafragma) **Ver Foto No.3.3.** Todo este modulo de investigación ha servido para el desarrollo experimental del proyecto de investigación el cual se realizo e instalo con el asesoramiento técnico y riguroso del Msc. Ing. Aníbal Rozas Gallegos en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú.



**Foto No.3.1.:** Patrón escalonado de acero, objeto de prueba (números en mm)

### 3.2. Equipo.

#### 3.2.1. Equipo de Rayos X y Sistema de Colimación del Haz.

El equipo de rayos X G301 es un tubo de rayos X, que opera con un transformador de corriente alterna el cual le provee de energía para la emisión de rayos X. Sus características principales son las siguientes:

- Marca : Philips
- Modelo y Tipo : G301, direccional
- Procedencia : Alemania
- Diámetro del Tubo : 230mm
- Dimensión del punto focal : 3.5mm
- Peso del equipo : 60kg.
- Tipo de Enfriamiento : Por agua
- Rango de Energías : 0-300kv
- Alimentación : CA



Foto No.3.2. Tubo de Rayos X G301

##### 3.2.1.1 Sistema de Colimación del Haz.

El haz de rayos X presenta un sistema de colimación constituido por una consola la cual mantiene suspendido a un diafragma metálico que para el presente estudio es una plancha de plomo. Este sistema regula la altura de colimación, es decir la distancia desde la emisión de los rayos X hasta el diafragma que sirve de colimador “b”.

### 3.2.1.2 Colimadores y Características.

En el presente trabajo de investigación se han utilizado colimadores hechos de planchas de plomo cuyos espesores dependen de la energía seleccionada para cada prueba y en función de al menos 10 veces el espesor de capa media. Esto para cumplir los requerimientos del código ASME Sección V Artículo 2, Apéndice I. En los anexos adjuntos se muestra el cálculo detallado para la obtención de cada espesor de plancha.



Foto No.3.3. Sistema de Colimación del Haz



Foto No.3.4.: Colimadores de plomo.

### 3.2.2. Sistema de Traslado del Espécimen a ser Radiografiado.

El espécimen que ha sido radiografiado (patrón de acero de diferentes espesores 2-20mm) para obtener los datos experimentales del presente estudio de investigación, fue trasladado a velocidad constante mediante



un carrito eléctrico con alimentación de corriente alterna adaptado de un carrito de oxicorte y cuyas velocidades varían entre 2.3-15.8mm/s. Este dispositivo además de trasladarse sobre un riel, presenta un sistema para sostener el espécimen metálico y puede regular la altura del objeto con respecto al diafragma de colimación.

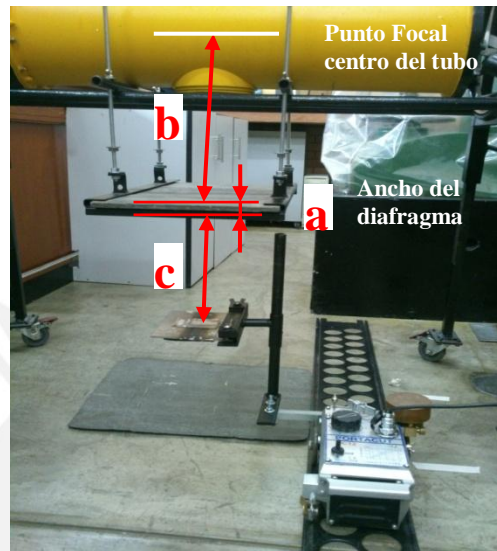


Foto No.3.5.: Carrito y Sistema porta objeto

### 3.2.3. Película Radiográfica y Módulo de Revelado.

La película radiográfica utilizada en el presente estudio de investigación fue elegida de la marca AGFA tipo D7 Structurix. Las películas fueron reveladas en el modulo de revelado del Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú.



Foto No.3.6.: Especificaciones Técnicas de Película Radiográfica

### 3.2.4. Instrumentos de Medición.

- Cronometro Digital, Orden: Centésimas de Segundos
- Densitómetro Digital

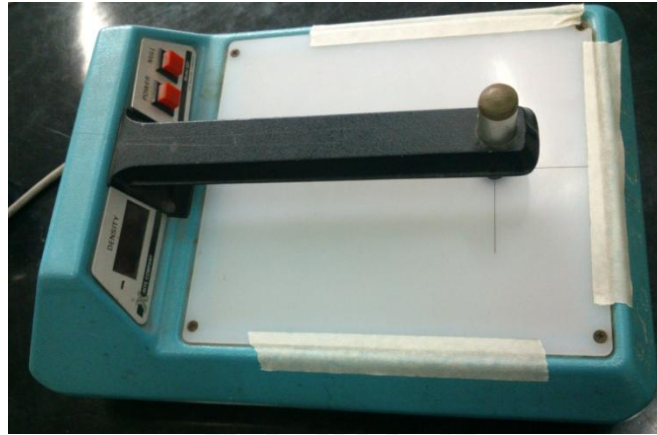


Foto No.3.7. Densitómetro Digital

### 3.3. Método: Técnicas y Procedimiento

#### 3.3.1. Técnicas.

El estudio de las placas radiográficas obtenidas con el objeto en movimiento y el haz de rayos X fijo, se realizó con la ayuda de un tubo de rayos X cuya emisión de las radiaciones se calibraron de acuerdo a los alcances y requerimientos generales estipulados en el Artículo 2, Apéndice I “In motion Radiography” del código ASME Sección V Edición 2013.

##### 3.3.1.1 Calibración Para la Toma de Placa Radiográfica en Movimiento

El ancho del haz fue controlado mediante un diafragma metálico, en este caso de plomo, cuyo espesor se seleccionó acorde con la energía de radiación utilizada y que de acuerdo al código de referencia, este debería ser de al menos 10 veces el espesor de capa media.

El ancho del haz se muestra en la **Fig. No.3.1** y se determinó de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$w = \frac{c(F + a)}{b} + a$$

Donde,

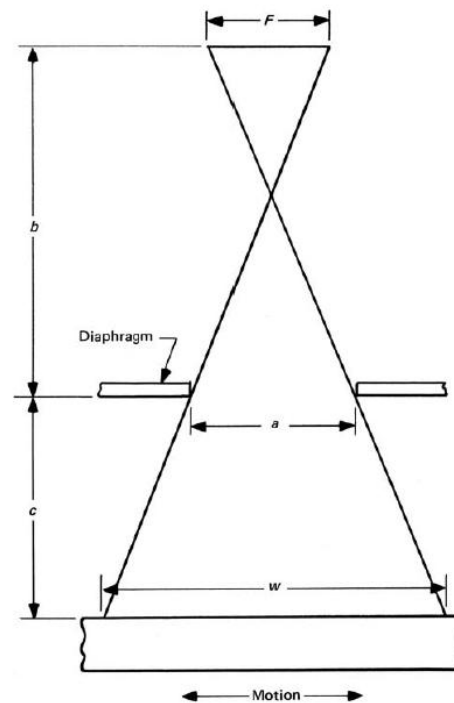
$w$  = ancho del haz en el lado fuente de la soldadura medido en la dirección de movimiento.

$a$  = ancho de la abertura del diafragma en la dirección del movimiento

$b$  = distancia desde la fuente hacia el lado soldadura del diafragma.

$c$  = distancia desde el lado soldadura del diafragma hacia el lado fuente de la superficie de la soldadura

$F$  = Tamaño de la fuente: la máxima dimensión proyectada de la fuente de radiación (o punto focal) en el plano perpendicular a la distancia  $b+c$  desde la soldadura que está siendo radiografiada.



**Fig. No.3.1.:** Determinación del ancho del haz.

*Fuente:* Código ASME Sección V Edición 2013, Artículo 2, p.17 Fig. I-263



### 3.3.2. Procedimiento Experimental para el Estudio de las placas Radiográficas Obtenidas Mediante la Aplicación de la Radiografía en Movimiento

Los parámetros que se incluyen en el presente estudio de investigación son la Densidad de Película, Kilo voltaje de la Fuente, Distancia del Foco de radiación al Objeto “D”, abertura del diafragma “a”, Distancia desde la fuente hacia el lado soldadura del diafragma “b”, Distancia desde el lado soldadura del diafragma hasta el lado fuente de la soldadura “c” y la Velocidad del objeto en movimiento. Entonces para poder realizar las radiografías en movimiento se utilizó un carrito con motor eléctrico el cual transportaba el objeto a una velocidad constante a través de un riel, la velocidad del carrito se reguló mediante una perilla en una escala del 1 al 10, por tanto se tuvo control de la velocidad del carrito transportador mediante la variación de voltaje a través de una perilla.

El control de los valores de kilovoltaje del tubo de rayos X se realizó a través de una perilla instalada en el transformador de mando del equipo, el cual tenía una escala analógica de 0 a 300 Kv en la que se pudo leer directamente el valor de kilovoltaje empleado en cada prueba radiográfica.

La abertura del diafragma se realizó en forma manual mediante la colocación de 2 planchas de plomo, la lectura del tamaño de dicha abertura se midió a través de una regla metálica calibrada. La distancia desde la fuente hacia el lado de soldadura del diafragma se reguló mediante el sistema de regulación del diafragma y el valor de dicha longitud se realizó también con regla metálica calibrada.

También se reguló el valor de la distancia desde el lado de la soldadura del diafragma hasta el lado fuente de la superficie de soldadura, para ello el sistema porta plancha instalado en el carrito eléctrico tenía un sistema para ajustar la altura, la medición se realizó manualmente con regla metálica calibrada.

Finalmente la placa radiográfica se obtuvo haciendo pasar totalmente y a velocidad constante el patrón escalonado por debajo del haz de radiación colimado mediante el diafragma de plomo, luego de obtener la placa radiográfica se procesó en el cuarto oscuro de revelado. Debido a la variación de espesores del patrón escalonado se realizó la medición de diferentes densidades en las zonas obtenidas en la placa. Para ello se utilizó un densitómetro digital.

### 3.3.2.1. Magnitudes y Parámetros Seteados durante los Ensayos.

- Kilovoltaje del Tubo de Rayos X (P)
- Velocidad del Carrito Eléctrico (V)
- Abertura del Diafragma (a)
- Distancia desde la fuente de radiación al objeto a ser radiografiado (D)

### 3.3.2.2. Fórmulas Empleadas.

#### a. Penumbra Geométrica ( $U_g$ )

$$U_g = \frac{Fd}{D}$$

Donde,

$F$ = Tamaño de la fuente: la máxima dimensión proyectada de la fuente de radiación (o punto focal efectivo) en el plano perpendicular a la distancia  $D$  desde la soldadura u objeto que está siendo radiografiado

$d$ = Distancia desde el lado fuente de la soldadura u objeto que está siendo radiografiado hasta la película.

#### b. Penumbra en Movimiento ( $U_M$ )

$$U_M = \frac{wd}{D}$$

Donde,

$w$ = Ancho del haz en el lado fuente de la soldadura u objeto medido en la dirección de movimiento

$d$ = Distancia desde el lado fuente de la soldadura u objeto que está siendo radiografiado hasta la película.

$D$ = Distancia desde la fuente de radiación hasta la soldadura u objeto que está siendo radiografiado.

**c. Factor de Corrección de Densidad (K)**

$$K = 10^{(exp_2 - exp_1)}$$

Donde,

$Exp_1$  = Valor de exposición de la densidad obtenida, leída de la curva sentisométrica de la película

$Exp_2$  = Valor de exposición de la densidad deseada, leída de la curva sentisométrica de la película

**d. Velocidad del carrito (V)**

$$V = \frac{w}{T_{exp}}$$

Donde,

$W$  = Ancho del haz en el lado fuente de la soldadura u objeto, medido en la dirección de movimiento

$T_{exp}$  = Tiempo de exposición.

**e. Velocidad Corregida ( $V_c$ )**

$$V_c = \frac{V}{K_1}$$

Donde,

$V$  = Velocidad del carrito

$K_1$  = Factor de corrección de Densidad.

**f. Ancho del Haz (W)**

$$w = \frac{c(F + a)}{b} + a$$

Donde,

$a$  = ancho de la abertura del diafragma en la dirección del movimiento

$b$  = distancia desde la fuente hacia el lado soldadura del diafragma.

$c$  = distancia desde el lado soldadura del diafragma hacia el lado fuente de la superficie de la soldadura

$F$  = Tamaño de la fuente: la máxima dimensión proyectada de la fuente de radiación (o punto focal) en el plano perpendicular a la distancia  $b+c$  desde la soldadura que está siendo radiografiada.

**g. Distancia Fuente Objeto**

$$D = b + c$$

Donde,

$b$  = distancia desde la fuente hacia el lado soldadura del diafragma.

$c$  = distancia desde el lado soldadura del diafragma hacia el lado fuente de la superficie de la soldadura.

**3.3.2.3. Pruebas Iniciales.**

Las pruebas iniciales incluyeron la radiografía convencional del objeto de prueba a una distancia Fuente-Película de 700mm y a un voltaje de 300KV. Se utilizó película marca AGFA tipo D7 Structurix. Durante estas pruebas preliminares se determinó las densidades obtenidas en la película radiográfica de cada espesor del objeto de prueba, y a partir de estos resultados, conjuntamente con La Ley de Los Inversos Cuadrados se determinaron tiempos de exposición cortos en función de las velocidades disponibles que teníamos.

Estas pruebas, también nos ayudaron a determinar los valores de las distancias Fuente-Película a utilizar en nuestro estudio, y nos dieron una idea de los espesores probables a radiografiar mediante la técnica de radiografía en movimiento.

#### 3.3.2.4. Pruebas Definitivas.

Las pruebas definitivas se dividen en 2 partes. La primera parte en la que se mantiene constante el valor de la distancia Fuente-Película y se varía el tamaño de la abertura del diafragma. La segunda parte involucra la variación de la distancia Fuente Película y se mantiene constante el valor de la abertura del diafragma. Ambas partes de los ensayos fueron realizados a diferentes Kilovoltajes de la fuente y a diferentes velocidades del objeto de prueba.

#### 3.3.2.5. Procedimiento de Medición de Densidad de Película.

Se realizó la medición de la densidad de película obtenida en cada una de las diez secciones de la placa radiográfica tomada al patrón escalonado, para ello se utilizó un densitómetro digital calibrado. La precisión del densitómetro fue del orden de las centésimas y se realizó la calibración del equipo cada 50 lecturas.

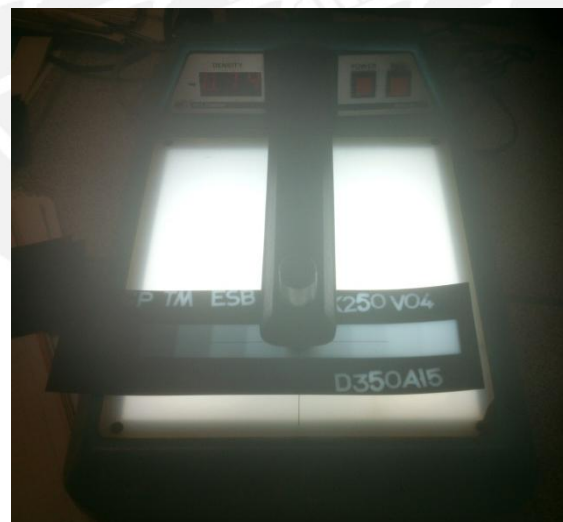


Foto No.3.9.: Medición de Densidades

## CAPITULO IV: Resultados y Discusión

### 4.1. RESULTADOS.

#### 4.1.1. Introducción.

El trabajo experimental con el tubo de rayos X modelo G301 de la marca Philips, se desarrolló en el Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú, y tuvo como principales parámetros establecidos los siguientes:

**Cuadro No.4.1.:** Principales Parámetros y Características

PRINCIPALES PARÁMETROS	VALORES UTILIZADOS	UNIDADES DE MEDIDA
Distancia Fuente Película (D)	350, 450, 550	mm.
Tamaño de la Abertura del Diafragma (a)	10, 15, 20	mm.
Potencia del Tubo de Rayos X	150, 200, 250, 300	KV
Velocidades (V)	2.29-15	mm/s

#### 4.1.2. Relación de Tablas.

**TABLA No. 4.1:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=300 y a=10mm

**TABLA No. 4.2:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=250 y a=10mm

**TABLA No. 4.3:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=200 y a=10mm

**TABLA No. 4.4:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=150 y a=10mm

**TABLA No. 4.5:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=300 y a=15mm

**TABLA No. 4.6:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=250 y a=15mm

**TABLA No. 4.7:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=200 y a=15mm

**TABLA No. 4.8:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=200 y a=20mm

**TABLA No. 4.9:** Parámetros medidos y calculados a D=350mm, KV=150 y a=20mm

**TABLA No. 4.10:** Parámetros medidos y calculados a D=450mm, KV=300 y a=10mm

**TABLA No. 4.11:** Parámetros medidos y calculados a D=450mm, KV=250 y a=10mm



**TABLA No. 4.12: Parámetros medidos y calculados a  $D=450\text{mm}$ ,  $KV=200$  y  $a=10\text{mm}$**

**TABLA No. 4.13: Parámetros medidos y calculados a  $D=450\text{mm}$ ,  $KV=300$  y  $a=15\text{mm}$**

**TABLA No. 4.14: Parámetros medidos y calculados a  $D=450\text{mm}$ ,  $KV=250$  y  $a=15\text{mm}$**

**TABLA No. 4.15: Parámetros medidos y calculados a  $D=450\text{mm}$ ,  $KV=200$  y  $a=15\text{mm}$**

**TABLA No. 4.16: Parámetros medidos y calculados a  $D=450\text{mm}$ ,  $KV=250$  y  $a=20\text{mm}$**

**TABLA No. 4.17: Parámetros medidos y calculados a  $D=450\text{mm}$ ,  $KV=200$  y  $a=20\text{mm}$**

**TABLA No. 4.18: Parámetros medidos y calculados a  $D=450\text{mm}$ ,  $KV=150$  y  $a=20\text{mm}$**

**TABLA No. 4.19: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=300$  y  $a=10\text{mm}$**

**TABLA No. 4.20: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=250$  y  $a=10\text{mm}$**

**TABLA No. 4.21: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=200$  y  $a=10\text{mm}$**

**TABLA No. 4.22: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=300$  y  $a=15\text{mm}$**

**TABLA No. 4.23: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=250$  y  $a=15\text{mm}$**

**TABLA No. 4.24: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=200$  y  $a=15\text{mm}$**

**TABLA No. 4.25: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=300$  y  $a=20\text{mm}$**

**TABLA No. 4.26: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=250$  y  $a=20\text{mm}$**

**TABLA No. 4.27: Parámetros medidos y calculados a  $D=550\text{mm}$ ,  $KV=200$  y  $a=20\text{mm}$**

**TABLA No. 4.1:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO							
Tipo de Película:				AGFA D7							
Corriente del Tubo				5 mA							
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C							
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5							
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS							
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)	
1	8	5.18	2.95	261	89	14.58	0.08	0.33	0.64	8.02	
2	10	5.18	2.51	261	89	14.58	0.10	0.42	0.79	6.52	
3	12	5.18	2.13	261	89	14.58	0.12	0.50	0.91	5.68	
4											
5											

**TABLA No. 4.2:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO							
Tipo de Película:				AGFA D7							
Corriente del Tubo				5 mA							
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C							
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5							
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS							
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)	
1	6	5.18	2.66	261	89	14.58	0.06	0.25	0.72	7.15	
2	8	5.18	2.09	261	89	14.58	0.08	0.33	0.93	5.55	
3	10	5.18	1.66	261	89	14.58	0.10	0.42	1.2	4.31	
4	12	2.29	3.16	261	89	14.58	0.12	0.50	0.6	3.8	
5											
6											

**TABLA No. 4.3:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO							
Tipo de Película:				AGFA D7							
Corriente del Tubo				5 mA							
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C							
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5							
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS							
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)	
1	2	5.18	2.97	261	89	14.58	0.02	0.08	0.64	8.02	
2	4	5.18	1.99	261	89	14.58	0.04	0.17	1	5.18	
3	6	5.18	1.4	261	89	14.58	0.06	0.25	1.35	3.84	
4	8	2.29	2.65	261	89	14.58	0.08	0.33	0.74	3.09	
5											
6											

**TABLA No. 4.4:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO							
Tipo de Película:				AGFA D7							
Corriente del Tubo				5 mA							
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C							
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5							
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS							
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> mm/s)	
1	2	5.18	1.42	261	89	14.58	0.02	0.08	1.32	3.93	
2	4	2.29	2.11	261	89	14.58	0.04	0.17	0.93	2.45	
3											
4											

**TABLA No. 4.5:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO							
Tipo de Película:				AGFA D7							
Corriente del Tubo				5 mA							
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C							
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5							
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS							
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)	
1	6	15	1.96	307	43	17.5	0.06	0.30	1.02	14.66	
2	8	5.18	3.29	307	43	17.5	0.08	0.40	0.58	9	
3	10	5.18	2.83	307	43	17.5	0.10	0.50	0.68	7.66	
4											
5											

**TABLA No. 4.6:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO							
Tipo de Película:				AGFA D7							
Corriente del Tubo				5 mA							
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C							
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5							
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS							
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)	
1	4	15	1.93	307	43	17.5	0.04	0.20	1.02	14.66	
2	6	5.18	2.85	307	43	17.5	0.06	0.30	0.68	7.66	
3	8	5.18	2.31	307	43	17.5	0.08	0.40	0.83	6.23	
4	10	5.18	1.88	307	43	17.5	0.10	0.50	1.05	4.95	
5											
6											

**TABLA No. 4.7:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	15	1.67	307	43	17.5	0.02	0.10	1.15	13.06
2	4	5.18	2.35	307	43	17.5	0.04	0.20	0.81	6.37
3	6	5.18	1.68	307	43	17.5	0.06	0.30	1.15	4.51
4	8	2.29	2.35	307	43	17.5	0.08	0.40	0.81	2.82
5										
6										

**TABLA No. 4.8:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	4	15	2.05	252	98	29.17	0.04	0.33	0.95	15.7
2	6	5.18	3	252	98	29.17	0.06	0.50	0.85	6.09
3										
4										

**TABLA No. 4.9:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO							
Tipo de Película:				AGFA D7							
Corriente del Tubo				5 mA							
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C							
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5							
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS							
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)	
1	2	5.18	2.42	252	98	29.17	0.02	0.17	0.79	6.52	
2	4	5.18	1.33	252	98	29.17	0.04	0.33	1.41	3.67	
3	6	2.29	2.28	252	98	29.17	0.06	0.50	0.83	2.75	
4											
5											

**TABLA No. 4.10:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO							
Tipo de Película:				AGFA D7							
Corriente del Tubo				5 mA							
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C							
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5							
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS							
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)	
1	4	15	1.67	378	72	12.5	0.03	0.11	1.148	13.06	
2	6	5.18	3.06	378	72	12.5	0.05	0.17	0.62	8.4	
3	8	5.18	2.42	378	72	12.5	0.06	0.22	0.79	6.52	
4	10	5.18	1.92	378	72	12.5	0.08	0.28	1.023	5.06	
5	12	2.29	3.07	378	72	12.5	0.09	0.33	0.62	3.71	
6	14	2.29	2.55	378	72	12.5	0.11	0.39	0.72	3.16	
7	16	2.29	2.08	378	72	12.5	0.12	0.44	0.93	2.45	



**TABLA No. 4.11:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>I</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	15	1.68	378	72	12.5	0.02	0.06	1.15	13.06
2	4	5.18	2.69	378	72	12.5	0.03	0.11	0.724	7.15
3	6	5.18	1.96	378	72	12.5	0.05	0.17	1.023	5.06
4	8	2.29	2.78	378	72	12.5	0.06	0.22	0.69	3.31
5	10	2.29	2.17	378	72	12.5	0.08	0.28	0.91	2.51
6										
7										

**TABLA No. 4.12:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>I</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	5.18	2.5	378	72	12.5	0.02	0.06	0.78	6.67
2	4	2.29	2.94	378	72	12.5	0.03	0.11	0.63	3.63
3	6	2.29	2	378	72	12.5	0.05	0.17	1	2.29
4										
5										

**TABLA No. 4.13:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	6	15	1.64	375	75	18.75	0.05	0.25	1.17	12.77
2	8	5.18	3.26	375	75	18.75	0.06	0.33	0.59	8.8
3	10	5.18	2.69	375	75	18.75	0.08	0.42	0.72	7.15
4	12	5.18	2.19	375	75	18.75	0.09	0.50	0.89	5.81
5										
6										

**TABLA No. 4.14:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	4	15	1.46	375	75	18.75	0.03	0.17	1.318	11.38
2	6	5.18	2.54	375	75	18.75	0.05	0.25	0.76	6.83
3	8	5.18	1.91	375	75	18.75	0.06	0.33	1.035	5
4	10	2.29	3.07	375	75	18.75	0.08	0.42	0.62	3.71
5	12	2.29	2.47	375	75	18.75	0.09	0.50	0.78	2.95
6										
7										

**TABLA No. 4.15:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	5.18	3.2	375	75	18.75	0.02	0.08	0.6	8.6
2	4	5.18	1.97	375	75	18.75	0.03	0.17	1.023	5.06
3	6	2.29	2.53	375	75	18.75	0.05	0.25	0.78	2.95
4										
5										

**TABLA No. 4.16:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	6	5.18	2.94	333	117	28.13	0.05	0.38	0.64	8.02
2	8	5.18	2.37	333	117	28.13	0.06	0.50	0.81	6.37
3										
4										

**TABLA No. 4.17:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	4	5.18	2.34	333	117	28.13	0.03	0.25	0.81	6.37
2	6	5.18	1.69	333	117	28.13	0.05	0.38	1.15	4.51
3	8	2.29	2.82	333	117	28.13	0.06	0.50	0.68	3.39
4										
5										

**TABLA No. 4.18:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	5.18	1.75	333	117	28.13	0.02	0.13	1.096	4.72
2	4	2.29	2.07	333	117	28.13	0.03	0.25	0.93	2.45
3										
4										

**TABLA No. 4.19:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	15	1.77	430	120	13.75	0.01	0.05	1.072	14
2	4	5.18	2.83	430	120	13.75	0.03	0.10	0.66	7.84
3	6	5.18	2.14	430	120	13.75	0.04	0.15	0.91	5.68
4	8	5.18	1.68	430	120	13.75	0.05	0.20	1.17	4.4
5	10	2.29	2.77	430	120	13.75	0.06	0.25	0.69	3.31
6	12	2.29	2.24	430	120	13.75	0.08	0.30	0.87	2.63
7										

**TABLA No. 4.20:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	5.18	2.84	430	120	13.75	0.01	0.05	0.68	7.66
2	4	5.18	1.86	430	120	13.75	0.03	0.10	1.05	4.95
3	6	2.29	2.71	430	120	13.75	0.04	0.15	0.69	3.31
4	8	2.29	2.03	430	120	13.75	0.05	0.20	1	2.29
5										
6										

**TABLA No. 4.21:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	5.18	1.74	430	120	13.75	0.01	0.05	1.1	4.72
2	4	2.29	2.01	430	120	13.75	0.03	0.10	1	2.29
3										
4										

**TABLA No. 4.22:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	v	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	4	15	1.57	491	59	17.19	0.03	0.13	1.23	12.19
2	6	5.18	2.76	491	59	17.19	0.04	0.19	0.69	7.48
3	8	5.18	2.18	491	59	17.19	0.05	0.25	0.91	5.68
4	10	5.18	1.75	491	59	17.19	0.06	0.31	1.072	4.83
5	12	5.18	1.43	491	59	17.19	0.08	0.38	1.32	3.92
6	14	2.29	2.32	491	59	17.19	0.09	0.44	0.81	2.82
7										



**TABLA No. 4.23:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	15	1.58	491	59	17.19	0.01	0.06	1.2	12.47
2	4	5.18	2.41	491	59	17.19	0.03	0.13	0.79	6.52
3	6	5.18	1.77	491	59	17.19	0.04	0.19	1.1	4.72
4	8	5.18	1.35	491	59	17.19	0.05	0.25	1.38	3.75
5	10	2.29	2.04	491	59	17.19	0.06	0.31	0.98	2.34
6										
7										

**TABLA No. 4.24:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	5.18	2.36	491	59	17.19	0.01	0.06	0.79	6.52
2	4	2.29	2.7	491	59	17.19	0.03	0.13	0.71	3.23
3										
4										

**TABLA No. 4.25:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	4	15	1.99	491	59	22.92	0.03	0.17	1	15
2	6	5.18	3.47	491	59	22.92	0.04	0.25	0.55	9.43
3	8	5.18	2.84	491	59	22.92	0.05	0.33	0.66	7.84
4	10	5.18	2.28	491	59	22.92	0.06	0.42	0.87	5.94
5	12	5.18	1.84	491	59	22.92	0.08	0.50	1.047	4.95
6										
7										

**TABLA No. 4.26:**

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	U <sub>g</sub> (mm)	U <sub>M</sub> (mm)	K <sub>1</sub>	V <sub>c</sub> (mm/s)
1	2	15	2	491	59	22.92	0.01	0.08	1	15
2	4	5.18	3.08	491	59	22.92	0.03	0.17	0.63	8.21
3	6	5.18	2.28	491	59	22.92	0.04	0.25	0.87	5.95
4	8	2.29	3.37	491	59	22.92	0.05	0.33	0.56	4.07
5	10	2.29	2.7	491	59	22.92	0.06	0.42	0.71	3.23
6	12	2.29	2.12	491	59	22.92	0.08	0.50	0.91	2.51
7										

TABLA No. 4.27:

Objeto de prueba:				PATRON ESCALONADO DE ACERO						
Tipo de Película:				AGFA D7						
Corriente del Tubo				5 mA						
Tiempo de Revelado:				5 min. a 20°C						
Tamaño del Punto Focal (mm.):				3.5						
PARAMETROS MEDIDOS				PARAMETROS CALCULADOS						
Pto No.	Espesor (mm)	Velocidad (mm/s)	Densidad Obtenida	b (mm)	c (mm)	w (mm)	$U_g$ (mm)	$U_M$ (mm)	$K_1$	$V_c$ (mm/s)
1	2	5.18	2.75	491	59	22.92	0.01	0.08	0.71	7.32
2	4	5.18	1.69	491	59	22.92	0.03	0.17	1.122	4.62
3	6	2.29	2.31	491	59	22.92	0.04	0.25	0.81	2.82
4										
5										

#### 4.1.3. Relación de Gráficos.

**GRÁFICO No. 4.1:** Diagrama comparativo de Exposición  $D=350\text{mm}$  y  $a=10\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$  y  $20\text{mm}$  KV variable.

**GRÁFICO No. 4.2:** Diagrama comparativo de Exposición  $D=450\text{mm}$  y  $a=10\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$  y  $20\text{mm}$  KV variable.

**GRÁFICO No. 4.3:** Diagrama comparativo de Exposición  $D=550\text{mm}$  y  $a=10\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$  y  $20\text{mm}$  KV variable.

**GRÁFICO No. 4.4:** Diagrama comparativo de Exposición KV= $150$ ,  $200$ ,  $250$  y  $300$ ,  $a=10\text{mm}$ , D variable

**GRÁFICO No. 4.5:** Diagrama comparativo de Exposición KV=  $200$ ,  $250$  y  $300$ ,  $a=15\text{mm}$ , D variable.

**GRÁFICO No. 4.6:** Diagrama comparativo de Exposición KV= $150$ ,  $200$ ,  $250$  y  $300$ ,  $a=20\text{mm}$ , D variable.

**GRÁFICO No. 4.1:** Diagrama comparativo de Exposición D=350mm y a=10mm, 15mm

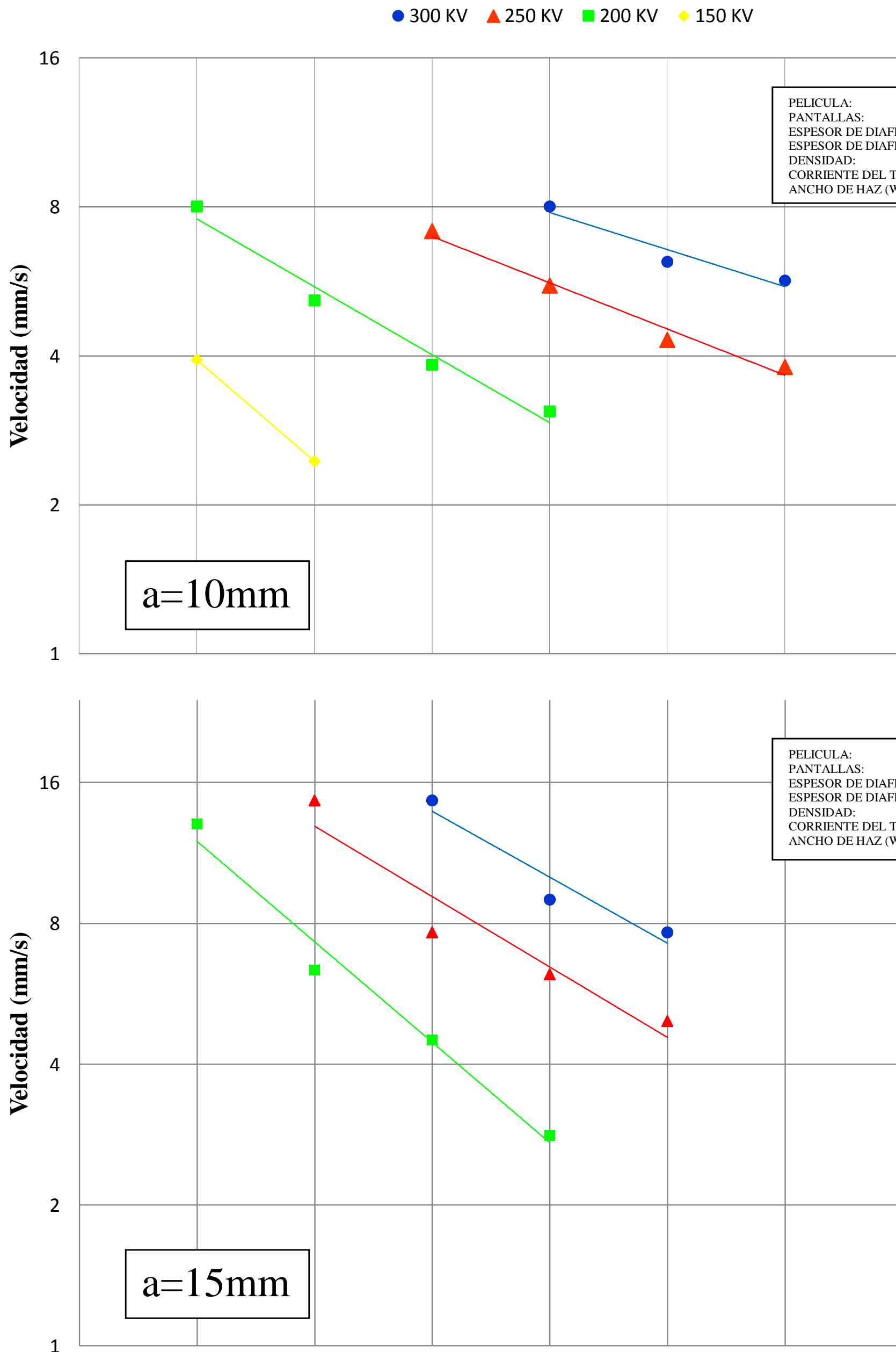


GRÁFICO No. 4.2: Diagrama comparativo de Exposición D=450mm y a=10mm, 15mm

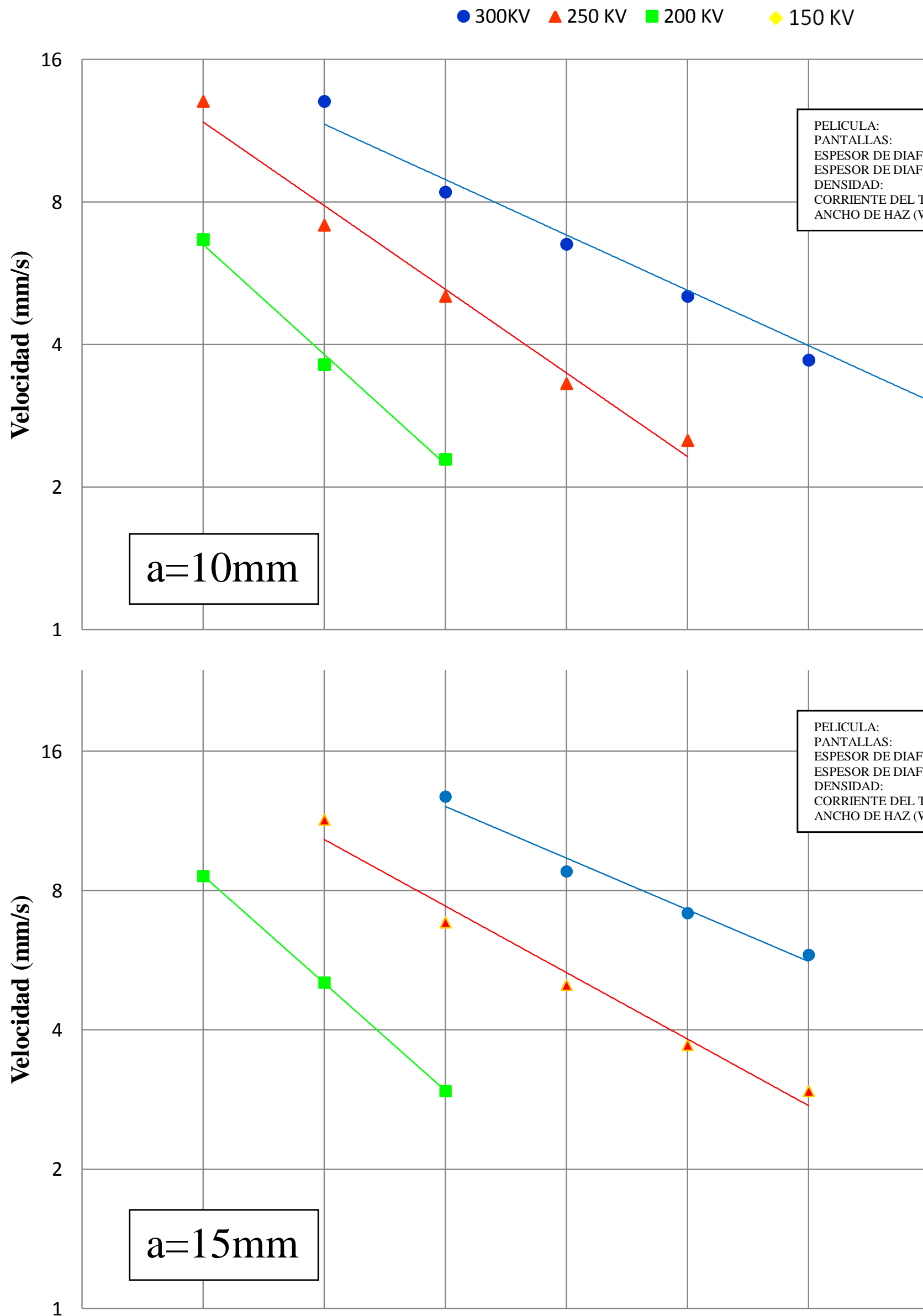
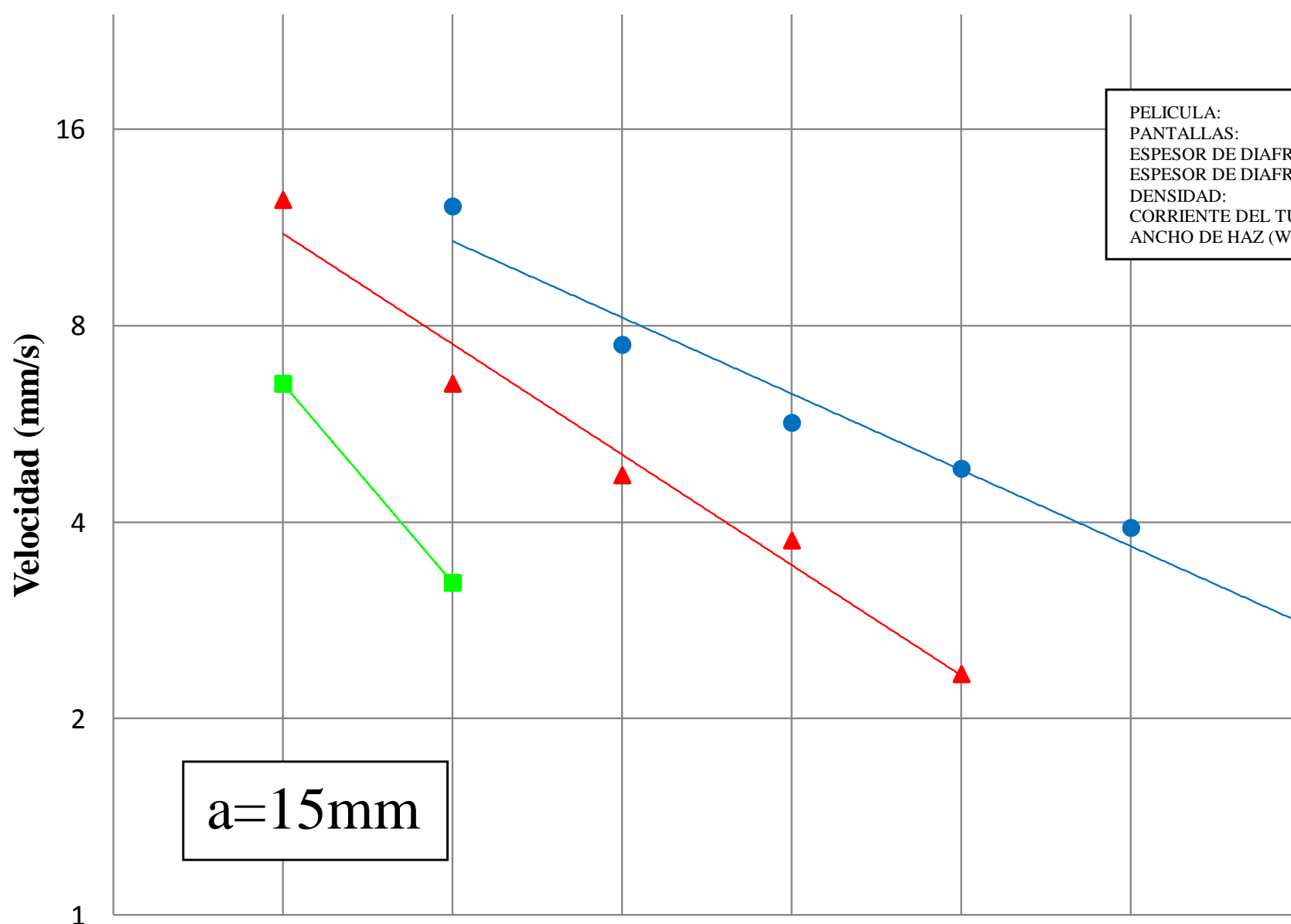
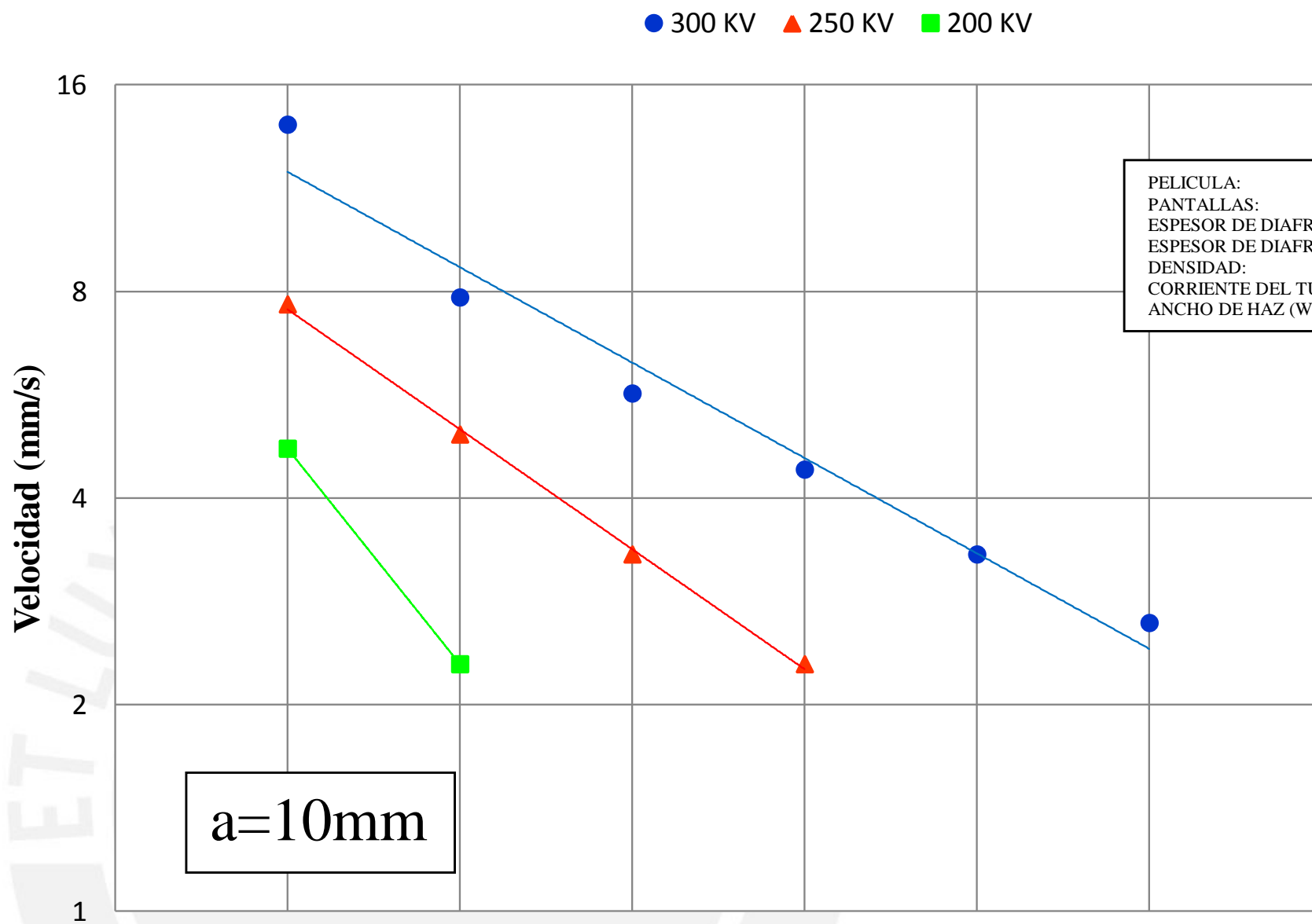
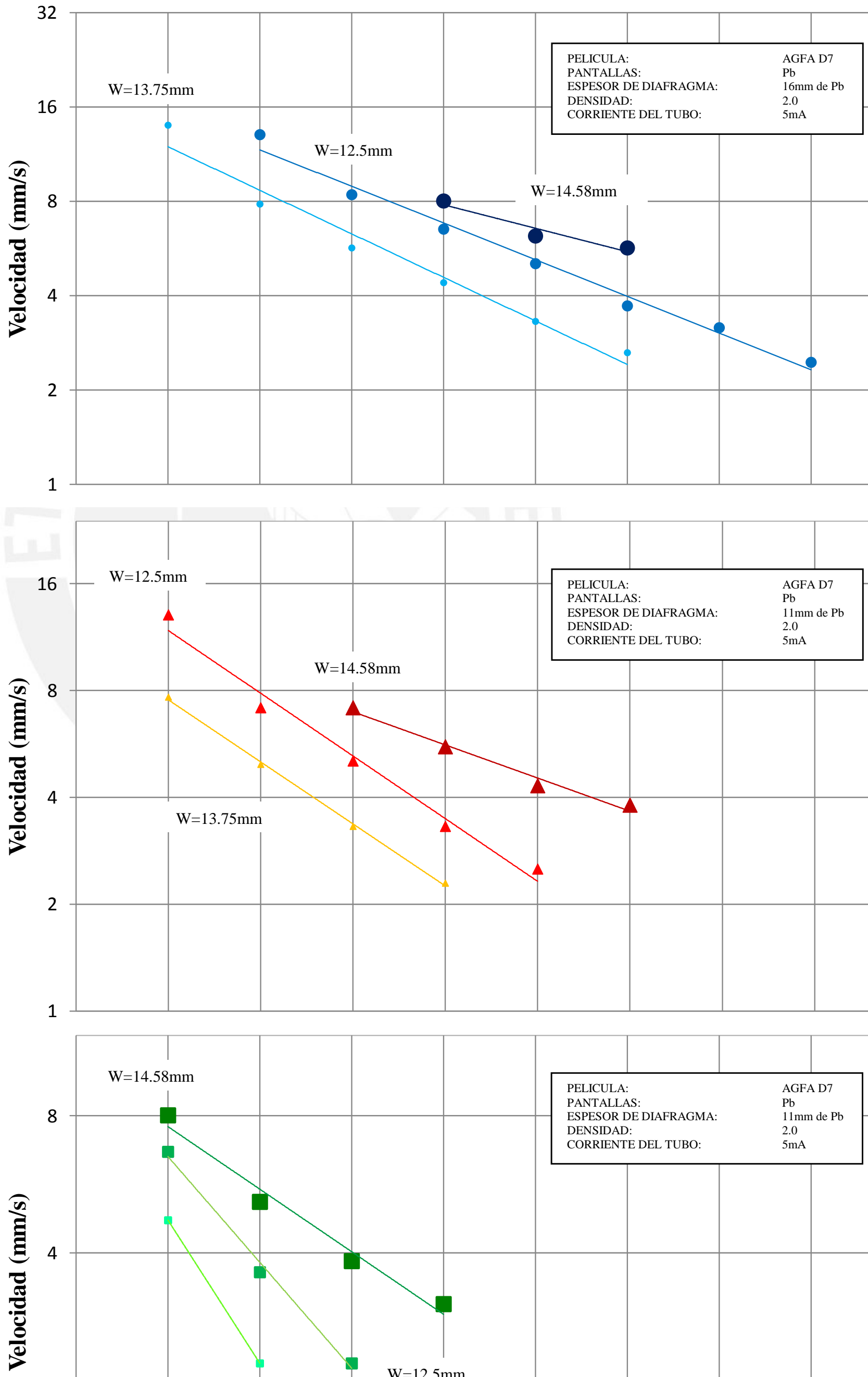




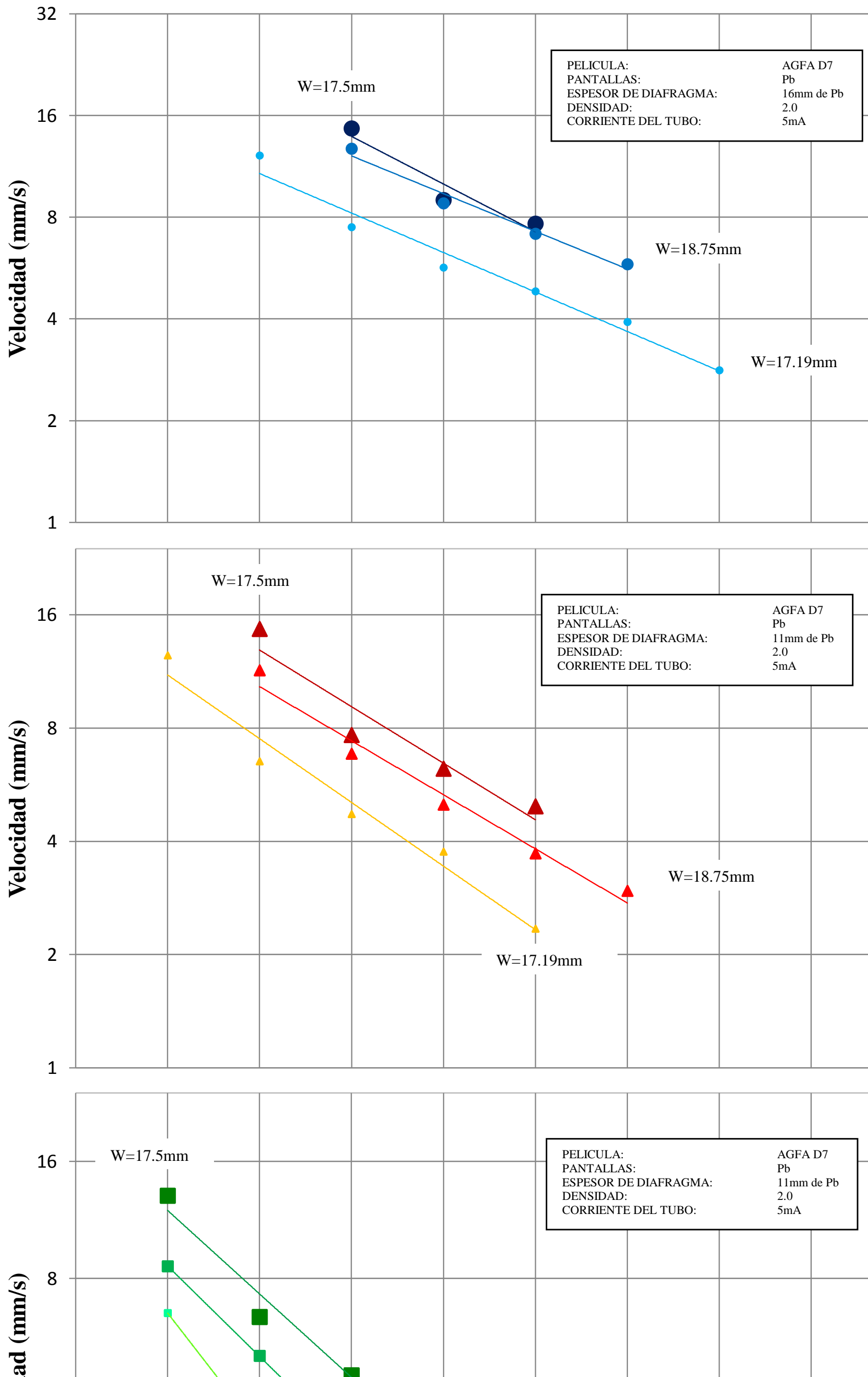
GRÁFICO No. 4.3: Diagrama comparativo de Exposición D=550mm y a=10mm, 15mm



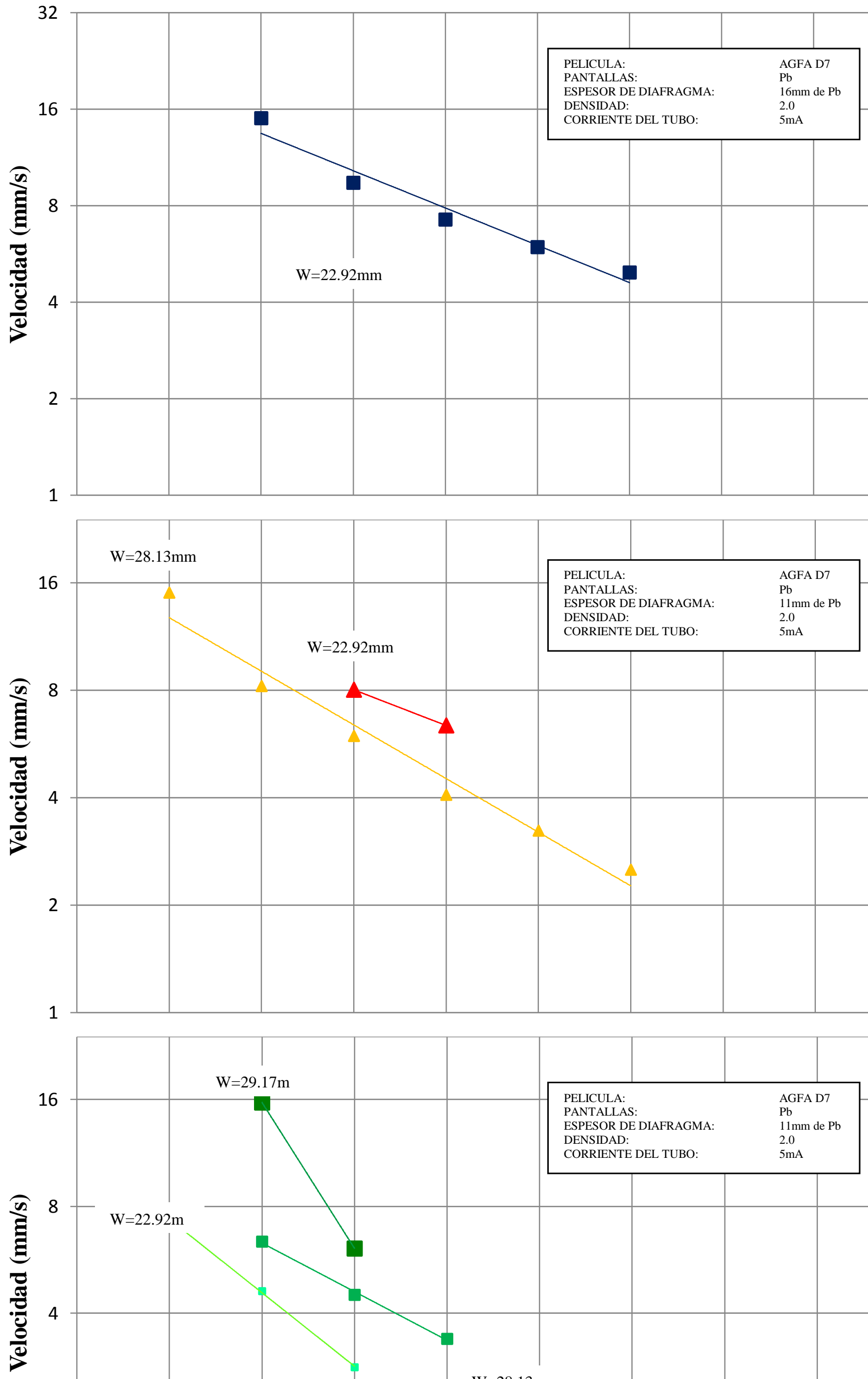
**GRÁFICO No. 4.4:** Diagrama comparativo de Exposición KV=150, 200, 250 y 300,



**GRÁFICO No. 4.5:** Diagrama comparativo de Exposición KV= 200, 250 y 300, a=



**GRÁFICO No. 4.6:** Diagrama comparativo de Exposición KV=150, 200, 250 y 300,



## 4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

**4.2.1** Antes de presentar nuestros resultados y discusión de los mismos, debemos establecer que todas nuestras gráficas obtenidas están limitadas a un rango de velocidades entre 2.3 y 15mm/s, las cuales fueron velocidades disponibles para nuestro estudio de investigación. También la gráficas están establecidas para una densidad de película  $D=2$  y con penumbras en movimiento y penumbras geométricas por debajo de 0.51mm. Estas curvas muestran la relación entre la velocidad de desplazamiento del objeto de prueba vs el espesor del objeto.

En el Gráfico No.4.1 se presentan los diagramas de exposición para el tubo de rayos X modelo G301 levantadas experimentalmente para una distancia Fuente-Película  $D=350\text{mm}$  y abertura de diafragma “a” variable 10, 15 y 20mm. En principio observamos notablemente la tendencias de las curvas con pendiente negativa a diferencia de los diagramas de exposición para radiografía convencional que tienen pendiente positiva, esto debido básicamente a la relación  $V=W/t$ , lo que grafica una curva exponencial de esas características.

Podemos entonces observar en esta gráfica que al disminuir la potencia de la fuente el rango de espesores a radiografiar es más limitado en tanto que a 150 Kv y abertura de diafragma  $a=10$  solo podemos radiografiar espesores entre 2 y 4 mm. Sin embargo podemos observar que el máximo espesor a radiografiar se da para potencias de 250Kv y 300 Kv con velocidades de 3.8 y 5.68mm/s respectivamente.

Al aumentar el valor de la abertura del diafragma el ancho del haz colimado también aumenta por lo que podemos manejar mayor velocidades de objeto aunque se limitan los espesores a radiografiar por el tema de la penumbra en movimiento que depende directamente del ancho del haz w. Se observa pues para el caso de  $a=15$  un máximo de espesor a radiografiar de 10mm y para el caso de  $a=20$  un máximo de espesor a radiografiar de tan solo 6mm.

Observamos también en esta gráfica que al tener el valor máximo de abertura de diafragma  $a=20$  y bajos kilovoltajes como 150Kv obtenemos una curva más acentuada de espesores delgados a radiografiar, esto debido al mayor tiempo de exposición que tiene la película debido al aumento del ancho del haz derivado básicamente de la abertura del diafragma.

**4.2.2** En el Gráfico No.4.2, se muestran las curvas de exposición para el tubo de rayos X modelo G301 a una distancia Fuente-Película de 450mm y aberturas de diafragma de  $a=10$ , 15 y 20mm. Al observar estas gráficas podemos señalar lo siguiente:

Debido al aumento de la distancia Fuente-Película a 450mm los valores de la penumbra geométrica mejoran lo que se traduce en la posibilidad de radiografiar mayores espesores, es así que a la potencia de 300Kv y abertura de diafragma  $a=10$  el espesor máximo que se radiografió fue de 16mm, de la misma manera las curvas de exposición a menores potencias muestran un rango más amplio de espesores a radiografiar, entre 2 y 6mm para 200kv y entre 2 y 10mm para 250kv. Sin embargo debido al aumento de la distancia fuente película la intensidad de radiación disminuye por lo que a la potencia de 150kv no se pudo radiografiar espesor alguno debido a las bajas densidades obtenidas.

De la misma forma que la gráfica anterior se puede observar también que al aumentar el ancho de la abertura de diafragma los valores de espesores de plancha a radiografiar disminuye debido a que se necesitan mayores tiempos de exposición y por lo tanto menores velocidades relativas entre la fuente y el objeto. El espesor máximo a radiografiar a 250 y 300kv considerando una abertura de diafragma de  $a=15$ mm es de 12 mm en tanto que con potencias menores a 250kv y aberturas de diafragma  $a=20$  solo pudimos radiografiar espesores de 8mm.

Señalamos anteriormente que al aumentar los valores de la abertura de diafragma la posibilidad de radiografiar mayores espesores disminuye debido a las mayores velocidades relativas que se tienen. El aumento de la abertura de diafragma genera un aumento en la penumbra geométrica y penumbra en movimiento por lo que nuestro rango de espesores a radiografiar se ve limitado a estos parámetros.

**4.2.3** En el Gráfico No.4.3, se presentan las curvas de exposición para el equipo de rayos X modelo G301 con una distancia Fuente Película  $D=550$ mm y con aberturas de diafragma  $a=10,15$  y 20mm. Observamos claramente que las curvas de exposición manejan un mayor gama de espesores a radiografiar, notamos pues que a una potencia de 300kv podemos radiografiar hasta espesores de 14mm considerando un ancho de la abertura de diafragma de  $a=15$ mm y hasta de 12mm con  $a=10$  o  $a=20$ .



Con respecto a las gráficas anteriores los espesores de planchas de acero a radiografiar ha mejorado para cada una de las potencias aplicadas ya sea 300kv, 250kv y 200kv. Sin embargo no se ha podido construir curvas de exposición con energías del orden de los 150kv debido a las bajas densidades obtenidas, esto como consecuencia del aumento de los tiempos de exposición y disminución de las velocidades relativas entre la fuente y el objeto de prueba. A mayores distancias Fuente-Película se requieren velocidades muy bajas que escapan a las cantidades de velocidad que hemos manejado en nuestro presente estudio de investigación.

El mejoramiento de los diagramas de exposición en cuanto a gama de espesores a radiografiar se debe al aumento de la distancia Fuente película ya que reduce notablemente la penumbra en movimiento y la penumbra geométrica. Es así que las máximas penumbras obtenidas en esta grafica fueron  $U_M=0.44$  y penumbra geométrica  $U_g=0.09$ , correspondiente al máximo espesor radiografiado  $e=14\text{mm}$  y  $a=15\text{mm}$  con energía de 300kv.

Al obtener valores de penumbras bajos, nos brinda la posibilidad de radiografiar mayores espesores, sin embargo requerimos menores velocidades relativas, ejemplo se observa que a la potencia de 300kv y  $a=15$ , se requieren velocidades muy por debajo de los 3mm/s, para poder radiografiar espesores mayores a 14mm.

Es necesario indicar también que el aumento de la distancia Fuente-Película nos conlleva a utilizar mayores intensidades de radiación, esto para compensar las menores velocidades relativas que se necesitan debido a los mayores tiempos de exposición manejados.

- 4.2.4** En el Gráfico No.4.4 se muestran las curvas comparativas de exposición para el tubo de rayos X modelo G301, a distancias Fuente-Película de  $D=350$ , 450 y 550mm. En estas gráficas el ancho de la abertura de diafragma es constante e igual a 10mm. Con respecto a los datos obtenidos podemos señalar lo siguiente:

El mayor rango de espesores ha radiografiar se ha conseguido con potencias de 300kv es así que considerando una distancia de Fuente-Película igual a  $D=350\text{mm}$  hemos podido radiografiar espesores de 12mm a la velocidad de 5.68mm/s. Al aumentar la distancia de Fuente-Película a 450mm, hemos podido radiografiar espesores de 16mm a la velocidad de 2.45mm/s y a la distancia Fuente-Película de 550mm también se pudieron radiografiar espesores del orden de los 12mm y velocidad de 2.65mm/s.

Al analizar estos valores nos damos cuenta claramente que existe un valor de la distancia Fuente-Película óptima (en este caso  $D=450\text{mm}$ ) en la cual se pueden radiografiar espesores de hasta 16mm. Indicamos de que al tener distancias cortas, la penumbra en movimiento y la penumbra geométrica empeoran, y al considerar distancias largas las penumbras mejoran aunque con limitaciones de manejar velocidades relativas más bajas y utilizar energías de radiación más potentes para que disminuyan los tiempos de exposición.

Con respecto a la potencia de 250Kv el espesor máximo radiografiado ha sido de 12mm con  $D=350\text{mm}$ , 10mm con  $D=450\text{mm}$  y 8mm con  $D=550\text{mm}$ . Con respecto a la potencia de 200kv el espesor máximo radiografiado fue de 8mm con  $D=350\text{mm}$ , 6mm con  $D=450\text{mm}$  y 4mm con  $D=550\text{mm}$ . Se puede señalar entonces al observar estos resultados de que al disminuir las energías de radiación los espesores a radiografiar también se han limitado, es mas cuando se utilizo la energía de 150kv solo se pudo radiografiar espesores menores a 4mm con la distancia  $D=350\text{mm}$ .

En la construcción de esta gráfica se ha utilizado el menor valor de ancho de diafragma  $a=10$ , lo que significa que la colimación del haz de radiación ha tenido su menor valor en este caso  $w=12.5\text{mm}$ , con el manejo de las menores penumbras en movimiento y geométrica que para el caso del mayor espesor radiografiado fueron de 0.44 y 0.12mm respectivamente.

El comportamiento de estas curvas de exposición obedecen pues a tres factores importantes: (1) Las limitaciones de penumbra, (2) las velocidades relativas entre el objeto y la fuente de energía y (3) Las energías disponibles. El manejo conjunto de estas variables nos lleva a encontrar el valor óptimo de distancia Fuente Película que nos permita radiografiar el máximo espesor de plancha.

- 4.2.5** En el Gráfico No.4.5, se presentan los diagramas comparativos de exposición para el tubo de rayos X G301 considerando una distancia Fuente-Película variable  $D=350, 450$  y  $550\text{mm}$ . El ancho de la abertura de diafragma es constante e igual a  $15\text{mm}$ . En estas curvas comparativas podemos observar lo siguiente:

Se ha obtenido la mejor gama de espesores de plancha radiografiados a una distancia Fuente-Película de  $550\text{mm}$  y a  $300\text{kV}$  de potencia de fuente. El espesor máximo radiografiado con estos parámetros fue de  $e=14\text{mm}$  y velocidad  $V_c=2.82\text{mm/s}$ . Si disminuimos la energía de la fuente a  $250\text{kV}$  y a la misma distancia Fuente-Película de  $550\text{mm}$  el espesor máximo radiografiado fue de  $e=10\text{mm}$ , esto debido a la disminución de la energía y la capacidad de radiografiar menores espesores. Sin embargo si disminuimos la distancia Fuente-Película a  $450\text{mm}$  observamos que podemos radiografiar hasta  $e=12\text{mm}$ , aunque por la dependencia con ley del cuadrado inverso podríamos radiografiar mayores espesores, como siempre los valores obtenidos de la penumbra en movimiento limitan nuestros alcances, para este caso puntual por ejemplo  $U_M=0.50\text{mm}$ .

También observamos que si disminuimos la distancia Fuente-Película a un mas, hasta  $D=350\text{mm}$  se consigue radiografiar un espesor máximo también de  $e=10\text{mm}$  quedando restringido por una penumbra  $U_M=0.50\text{mm}$ .

Al disminuir la energía de fuente a  $200\text{Kv}$  se limitan mas los valores de los espesores a radiografiar, en este caso solo espesores de  $8\text{mm}$  a distancias de  $350\text{mm}$ . La penumbra en movimiento obtenida fue de  $0.40\text{mm}$ . No se han registrado valores con potencias de  $150\text{Kv}$  debido a las bajas densidades obtenidas

- 4.2.6** En el Gráfico No.4.6 se presenta las curvas comparativas de exposición para el tubo de rayos X modelo G301, teniendo una distancia Fuente-Película variable de  $D=350, 450$  y  $550\text{mm}$  y abertura de diafragma constante e igual a  $20\text{mm}$ . Para estas curvas tenemos las siguientes apreciaciones:

Solo se han podido radiografiar espesores de hasta  $12\text{mm}$  para una distancia Fuente-Película de  $550\text{mm}$  y considerando potencias de  $250\text{Kv}$  y  $300\text{Kv}$  con velocidades relativas de  $4.95\text{mm/s}$  y  $2.51\text{mm/s}$  respectivamente. En ambos casos la limitante fue la penumbra de  $U_M=0.50\text{mm}$ .

En estas curvas se ha utilizado la máxima abertura del diafragma  $a=20$ , podemos entonces darnos cuenta de que al acrecentar el valor de este parámetro, el ancho del haz colimado es mayor por lo tanto genera un aumento significativo de la penumbra en movimiento y la capacidad de radiografiar menores espesores.

Al analizar y discutir todas estas gráficas hemos observado de que existen valores óptimos de Distancia Fuente-Película y aberturas de diafragma así como energías utilizadas, en la cual hemos podido radiografiar grandes espesores, con penumbras geométricas aceptables. Lo importante es que es necesario utilizar grandes distancias Fuente-Película tan práctico como sea posible. Se ha observado que a distancias cortas de Fuente-Película, mayor aplicación han tenido los espesores delgados con amplia gama de energías disponibles de la fuente y a distancias largas se han podido radiografiar mayores espesores. En ambos casos se han obtenido imágenes bien definidas en las placas radiográficas.

Finalmente también hemos verificado la influencia que tiene la penumbra en movimiento y el tamaño de la abertura del diafragma dentro del estudio de la radiografía en movimiento y su aplicación para radiografiar planchas de acero. El manejo apropiado de estos parámetros a través del estudio minucioso de los datos experimentales obtenidos nos han permitido construir estas graficas con las cuales hemos obtenido juicios de valor que justifican el presente estudio de investigación.

## CAPITULO V: Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. CONCLUSIONES.

- 5.1.1.** En total se realizaron nueve (09) configuraciones distintas para la realización de las tomas radiográficas. Para cada una de ellas se obtuvieron sus puntos más notables, los cuales se expresan en los cuadros resúmenes en el capítulo Anexos. (Ver anexo A.1):
- 5.1.2.** El mayor valor de espesor de plancha de acero radiografiada se consiguió a una distancia Fuente-Película de 450mm, abertura de diafragma 10mm, velocidad de 2.45mm/s y fue de 16mm. Para esta configuración óptima se utilizó una potencia de 300 KV y se obtuvo una penumbra en movimiento de 0.44mm.
- 5.1.3.** Los datos experimentales obtenidos demostraron que a distancias cortas de Fuente-Película tenemos mayor gama de Energía para radiografiar espesores delgados y a distancias largas de Fuente película tenemos mayor gama de energías para radiografía espesores gruesos. Esto sin ir más allá de los límites de penumbra establecidos por los códigos.
- 5.1.4.** Al disminuir el ancho del diafragma, la colimación del haz de rayos X es más restringido, por lo que la penumbra en movimiento mejora notablemente y por tanto nos brinda la posibilidad de radiografiar mayores espesores con imágenes mejor definidas en la placa radiográfica. Sin embargo se deben utilizar menores velocidades relativas entre la fuente y objeto.
- 5.1.5.** A partir de los datos experimentales obtenidos, y considerando un mismo régimen de energía, una misma distancia fuente película y una misma abertura de diafragma se puede establecer la siguiente relación entre el valor de espesor a radiografiar y la velocidad del objeto:

$$\frac{V_1}{V_2} = k \frac{e_2}{e_1}$$

Donde,

$V_1$ = Velocidad relativa entre la fuente y el objeto para radiografiar el espesor  $e_1$

$V_2$ = Velocidad relativa entre la fuente y el objeto para radiografiar el espesor  $e_2$



- $e_1$ = Espesor del objeto radiografiado a la velocidad  $V_1$   
 $e_2$ = Espesor del objeto radiografiado a la velocidad  $V_2$   
 $k$ = Constante proporcional ( $\sim 0.99$ )

**5.1.8.** La calibración del equipo para la toma de la placa radiográfica en movimiento es paso previo para la utilización de los diagramas de exposición obtenidos en el presente estudio de investigación. Dicha calibración se basa principalmente en la calibración del ancho del haz de radiación mediante la siguiente fórmula.

$$w = \frac{c(F + a)}{b} + a$$

Donde,

$w$  = ancho del haz en el lado fuente de la soldadura medido en la dirección de movimiento.

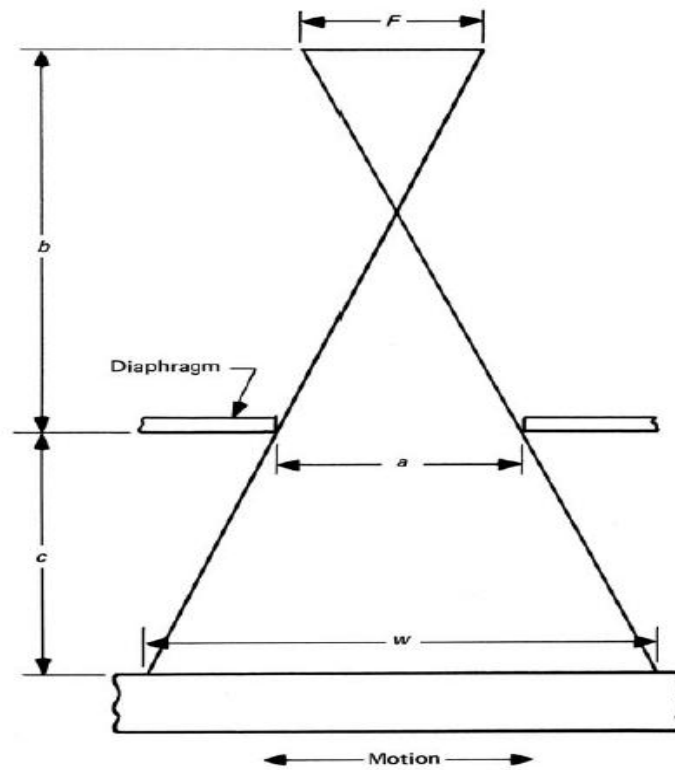
$a$  = ancho de la abertura del diafragma en la dirección del movimiento

$b$  = distancia desde la fuente hacia el lado soldadura del diafragma.

$c$  = distancia desde el lado soldadura del diafragma hacia el lado fuente de la superficie de la soldadura

$F$  = Tamaño de la fuente: la máxima dimensión proyectada de la fuente de radiación (o punto focal) en el plano perpendicular a la distancia  $b+c$  desde la soldadura que está siendo radiografiada.





**Fig. 5.1.:** Determinación del ancho del haz.

*Fuente:* Código ASME Sección V Edición 2013, Artículo 2, p.10

- 5.1.7.** Los diagramas de exposición obtenidos (Gráficos No.4.1, 4.2 y 4.3) serán utilizados conjuntamente con un cuadro de valores para la calibración del haz de radiación.

Para un mejor y fácil uso de los diagramas de exposición obtenidos se ha resumido las principales variables de calibración del haz de radiación en los siguientes cuadros:

**Cuadro No. 5.1.** Valores para calibración del haz de radiación a una Distancia Fuente Película de 350mm.

Distancia Foco Película (mm)		350		
Tipo de Película:		AGFA D7		
Corriente del Tubo		5 mA		
Tiempo de Revelado:		5 min. a 20°C		
Tamaño del Punto Focal (mm.):		3.5		
PARAMETROS PARA CONFIGURACION DEL HAZ				
a(mm)	KV	b(mm)	c(mm)	No. Gráfico
10	150	261	89	4.1
	200	261	89	
	250	261	89	
	300	261	89	
15	150	-	-	
	200	307	43	
	250	307	43	
	300	307	43	
20	150	252	98	
	200	252	98	
	250	-	-	
	300	-	-	

**Cuadro No. 5.2.** Valores para calibración del haz de radiación a una Distancia Fuente Película de 350mm.

Distancia Foco Película (mm)		450		
Tipo de Película:		AGFA D7		
Corriente del Tubo		5 mA		
Tiempo de Revelado:		5 min. a 20°C		
Tamaño del Punto Focal (mm.):		3.5		
PARAMETROS PARA CONFIGURACION DEL HAZ				
a(mm)	KV	b(mm)	c(mm)	No. Gráfico
10	150	-	-	4.2
	200	378	72	
	250	378	72	
	300	378	72	
15	150	-	-	
	200	375	75	
	250	375	75	
	300	375	75	
20	150	333	117	
	200	333	117	
	250	333	117	
	300	-	-	

**Cuadro No. 5.3.** Valores para calibración del haz de radiación a una Distancia Fuente Película de 550mm.

Distancia Foco Película (mm)		550		
Tipo de Película:		AGFA D7		
Corriente del Tubo		5 mA		
Tiempo de Revelado:		5 min. a 20°C		
Tamaño del Punto Focal (mm.):		3.5		
PARAMETROS PARA CONFIGURACION DEL HAZ				
a(mm)	KV	b(mm)	c(mm)	No. Gráfico
10	150	-	-	4.3
	200	430	120	
	250	430	120	
	300	430	120	
15	150	-	-	
	200	491	59	
	250	491	59	
	300	491	59	
20	150	-	-	
	200	491	59	
	250	491	59	
	300	491	59	

5.1.6. La configuración de los equipos, límites permisibles de penumbra y seteo de parámetros para las tomas radiográficas se basaron en los requerimientos indicados en la norma ASME Sección V, Artículo 2, Apéndice I “In Motion Radiography”, Edición 2013.

## 5.2. RECOMENDACIONES.

- 5.2.1 Realizar un mejoramiento del sistema de colimación del haz de rayos X utilizando otro tipo de materiales diferentes al plomo.
- 5.2.2 Utilizar el presente estudio de investigación para realizar el diseño de un mecanismo para radiografiar soldaduras circunferenciales de tuberías.
- 5.2.3 Continuar con la realización de otros trabajos de investigación de esta índole, con diferentes tubos de rayos X y otros rangos de velocidades.
- 5.2.4 Promover el uso de los rayos X en vez de la radiación Gama debido a las condiciones de seguridad y a los mejores parámetros de calidad obtenidos en las placas radiográficas al utilizar los rayos X.



## CAPITULO VI: Bibliografía

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V “Nondestructive Examination” 2013.
2. ASNT, *Nondestructive Testing Handbook*, Third Edition: Volume 4, Radiographic Testing, 2002.
3. Daniel Merino Ponce, *Radiografía Industrial*, PUCP Facultad de Ciencias e Ingeniería – Sección Ingeniería Mecánica 2009.
4. Centro de Investigaciones en Materiales y Ensayos No destructivos CIMEND-IIF, *Radiografía Industrial Nivel III*, La Paz Bolivia 2001.
5. Kodak, *Radiography in Modern Industry*, Fourth Edition.
6. Real Time Radiography Course Booklet.
7. ASM Handbook, *Radiography*.
8. CIDESI, *Radiografía Industrial Nivel I*, 2008.
9. D. Rikard, D. Kolan, *Radiography and Ultrasonic Calculation Workbooks*, 2004.
10. American Society for Nondestructive Testing, *Radiographic Testing Classroom Training Book*, Volume 4 Third Edition 2011.
11. [http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/film/Film/GEIT-40007ES\\_ndt-film-brochure.pdf](http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/film/Film/GEIT-40007ES_ndt-film-brochure.pdf)
12. Finlayson, R.D.; Cornes, J. K.; Liesch, D.S.; Sturrock, W.R. *The Development of an In-motion Radiography System of Large Area Aircraft Scanning*, Defense Research Establishment Pacific, Victoria BC (CAN) 2013
13. Conway B., Ringo “Developing and Modyfying a Technique in Film Radiography” *Materials Evaluation*, Vol. 69, No. 4, 2011, pp. 442-451.
14. U. Ewert, B. Redmer, C. Radel “*Mobile X-Ray Inspection of Light Weight Materials*” YXLON International GmbH, Hamburg, Germany. AeroNDT 2008.
15. Roy E. Wysnewski “Revelations at Low Kilovoltage” *Materials Evaluation*, Vol. 70, No. 12, 2012, pp. 1373-1380.
16. Rick Laux “Theoretical Application of Dual Robotic Systems for Radiographic Tomography” *Materials Evaluation*, Vol. 71, No. 5, 2013, pp. 513-516.
17. Glenn Light, Sally Hamlin “Demonstration of Pulsed X-ray Machine Radiography as an Alternative to Industry Radiography Cameras: Demonstration Pilot Project” *Materials Evaluation*, Vol. 66, No. 3, 2008, pp. 285-289.
18. Ramasamy Subbarayan “Ensuring Performance Compliance of Radiographic Examination in Project Construction” *ASNT Fall Conference and Quality Testing Show 2009*, pp. 237-239.
19. Ryan McCurdy, Andrew Slayton, Chuck Stirm and Phillip C. Berry “X-ray Beam Quality Evaluation of a Linear Accelerator” *Materials Evaluation*, Vol. 70, No. 9, 2012, pp. 1039-1043.

20. Uwe Ewert, Uwe Zscherpel, Klara Heyne, Mirko Jechow and Klaus Bavendiek “Image Quality in Digital Industrial Radiography” *Materials Evaluation*, Vol. 70. No. 8, 2012, pp. 955-964
21. G. W. Stupian “Dose in Microfocus Radiographic Inspections” The Aerospace Corporation ASNT Research Symposium and Spring Conference 2011 pp. 36-39
22. Steven A. Mango and Karin Topfer “Predictive Model of Key Performance Measures for Computed Radiography” *Materials Evaluation*, Vol. 67. No. 1, pp. 17-22
23. Edward Dugan, Dan Shedlock and Alan Jacobs “X-ray Backscatter Imaging for NDE Using Radiography by Selective Detection and Snapshot” ASNT Fall Conference and Quality Testing Show 2007 pp 126-133
24. Lior PICK, Ofra KLEINBERGER Vidisco Ltd. “Technical Highlights for NDT Digital Radiography (X-ray) Inspection” Digital Imaging XII: Program Papers and Abstracts Mashantucket, CT, July 2009 pp. 25-29
25. Lior Pick, Ron Pincu and Ofra Kleinberger “Digital Radiography for High-enegey NDT Applications” *Materials Evaluation*, Vol. 69. No. 4, 2011, pp. 453-459
26. David Fry and Uwe Ewert “Measuring Microfocal Spots Using Digital Radiography” ASNT Fall Conference and Quality Testing, Columbus OH, October 2009 pp. 11-18
27. Ron Pincu “The Transition from Conventional RD to Digital RD” ASNT Fall Conference and Quality Testing Show, Las Vegas, November 2007 pp. 56-64
28. Mathew B. Thompson and Jason B. Hayne “The Use of Real-time Radiography in the Safe Disposal of Radioactively Contaminated Containers” Digital Imaging XII: Program Papers and Abstracts, Mashantucket, CT, July 2009 pp.20-22
29. Timothy Brown, Alireza Khotanzad “Automated Detection of Counterfeit Integrated Circuits Using Radiography” ASNT Research Symposium and Spring Conference, Williamsburg, VA, March 2010 pp.48-52